



Università degli Studi di Napoli Federico II

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile
e Ambientale

Dottorato in Ingegneria dei sistemi civili
34 ciclo a.a 2021-2022

Mix design di malte ecosostenibili confezionate con aggregati riciclati in Calcestruzzo Aerato Autoclavato

Candidato
Federica Vitale



Coordinatore del corso di Dottorato
Prof. Ing. Andrea Papola

Tutor
Prof. Ing. Maurizio Nicoletta

Cotutor
Prof. Ing. Fabio Iucolano

DI
C
Ma
PI



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DEI SISTEMI CIVILI

XXXIV CICLO

TITOLO DELLA RICERCA:

***MIX DESIGN* DI MALTE ECOSOSTENIBILI
CONFEZIONATE CON AGGREGATI RICICLATI
IN CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO**

SETTORE DISCIPLINARE DI RIFERIMENTO: ICAR 11 - PRODUZIONE EDILIZIA

SETTORE DISCIPLINARE CORRELATO: ING/IND 22 - SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI

CANDIDATO

FEDERICA VITALE

COORDINATORE DI DOTTORATO
PROF. ING. ANDREA PAPOLA

TUTOR
PROF. ING. MAURIZIO NICOLELLA

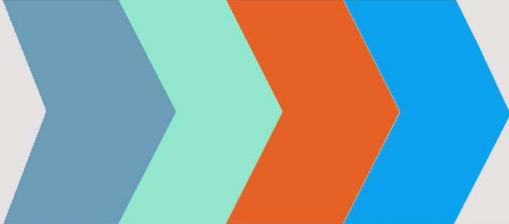
Co-TUTOR
PROF. ING. FABIO IUCOLANO

SOMMARIO

INTRODUZIONE	1
OBIETTIVI E FINALITÀ DELLA RICERCA	7
PARTE I - IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO	12
Capitolo 1 - La sostenibilità e la sua declinazione edilizia	12
Introduzione	
1.1) Sostenibilità e sviluppo sostenibile: definizione ed evoluzione dei concetti	13
• IL CAPOSALDO DELLO SVILUPPO SOSTENIBILE: IL RAPPORTO BRUNDTLAND	
• IL SUMMIT DELLA TERRA DEL 1992	
• IL PROTOCOLLO DI KYOTO DEL 1997	
• GLI OBIETTIVI DI SVILUPPO SOSTENIBILE DELL'AGENDA 2030	
• IL MODELLO DI VENN PER LA SOSTENIBILITÀ	
• IL MODELLO MATEMATICO DI SOSTENIBILITÀ DEBOLE	
• IL MODELLO A QUATTRO DIMENSIONI DELLA SOSTENIBILITÀ	
• IL MODELLO GERARCHICO DELLA SOSTENIBILITÀ	
• I MODELLI FTSE E TTSE PER LA SOSTENIBILITÀ	
1.2) Gli obiettivi di sostenibilità ed economia circolare nei panorami europeo e nazionale	27
• IL TRATTATO DI AMSTERDAM	
• IL PROGRAMMA EUROPEO SUL CAMBIAMENTO CLIMATICO	
• IL PACCHETTO CLIMA ED ENERGIA	
• L'EMISSION TRADING SYSTEM	
• IL QUADRO CLIMA ED ENERGIA	
• IL GREEN DEAL	
1.3) La sostenibilità in edilizia	32
• LA PRIMA DEFINIZIONE DI EDILIZIA SOSTENIBILE: KIBERT.	
• L'EDILIZIA E GLI OBIETTIVI DI SVILUPPO SOSTENIBILE DELL'AGENDA 2030	
Capitolo 2 - Le strategie edilizie sostenibili: le Materie Prime Secondarie	37
Introduzione	
2.1) Le scale della sostenibilità edilizia: l'edificio come sistema	38
• L'ORGANISMO EDILIZIO: DEFINIZIONI NORMATIVE	
• ESIGENZA, REQUISITI E PRESTAZIONI: DEFINIZIONI	

<ul style="list-style-type: none"> • IL SISTEMA TECNOLOGICO SECONDO LA UNI 8290-1:1981 • LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE: I PROTOCOLLI DI CERTIFICAZIONE <ul style="list-style-type: none"> ••IL PROTOCOLLO LEED 	49
<p>2.2) Il riciclo e il riutilizzo dei materiali in edilizia: definizioni e riferimenti normativi</p> <ul style="list-style-type: none"> • IL TRATTAMENTO DEI RIFIUTI. RIFERIMENTI NORMATIVI E DEFINIZIONI <ul style="list-style-type: none"> ••I RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE. RIFERIMENTI NORMATIVI E DEFINIZIONI • LE MATERIE PRIME SECONDARIE ED IL PRINCIPIO DELL'END OF WASTE: LA CESSAZIONE DELLA QUALIFICA DI RIFIUTO 	49
<p>Capitolo 3 - L'edilizia insostenibile: gli inerti</p> <p>Introduzione</p>	57
<p>3.1) Il consumo degli inerti in edilizia: i conglomerati</p>	58
<p>3.2) Il mix design dei conglomerati</p>	60
<p>3.3) Gli inerti riciclati: tipologia, tecniche e tecnologie di produzione</p> <ul style="list-style-type: none"> • DEFINIZIONE DI INERTI RICICLATO E ARTIFICIALE • LA TECNOLOGIA DI PRODUZIONE DEGLI INERTI RICICLATI <ul style="list-style-type: none"> ••GLI IMPIANTI FISSI ••GLI IMPIANTI MOBILI • LA COMPATIBILITÀ AMBIENTALE DEGLI AGGREGATI RICICLATI • GLI INCENTIVI ALL'UTILIZZO DI AGGREGATI RICICLATI NELLE OPERE PUBBLICHE • PROVENIENZA E REIMPIEGO DEGLI AGGREGATI RICICLATI 	65
PARTE II - I MATERIALI	
<p>Capitolo 4 - Le malte e l'inerte riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato</p>	75
<p>4.1) Le malte</p> <ul style="list-style-type: none"> • DEFINIZIONE • LA CONDUCIBILITÀ TERMICA DELLE MALTE <ul style="list-style-type: none"> ••LA MODELLAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ: I MODELLI PER SISTEMI POROSI ••PROPRIETÀ E VARIABILI DI MISCELA INFLUENTI SULLA CONDUCIBILITÀ TERMICA DELLE MALTE • LA CLASSIFICAZIONE SECONDO LA UNI EN 998:2016 	75
<p>4.2) L'inerte: il Calcestruzzo Aerato Autoclavato come rifiuto-risorsa</p> <ul style="list-style-type: none"> • I MATERIALI CELLULARI. DEFINIZIONE E TIPOLOGIE <ul style="list-style-type: none"> ••IL CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO. PROCESSO PRODUTTIVO ••IL CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO. PROPRIETÀ MACROSCOPICHE ••IL GESSO E L'ATTACCO SOLFATICO 	85
PARTE III - IL METODO	
<p>Capitolo 5 - L'attività sperimentale di confezionamento e caratterizzazione delle malte con AAC riciclato</p>	95
<p>5.1) Stato dell'arte: le malte confezionate con "inerti riciclati edili"</p>	95

• LA METODOLOGIA	
• I RISULTATI	
5.2) Struttura e cronoprogramma dell'attività sperimentale	126
5.2)1. Fase 1: obiettivi, materiali e metodi, risultati	128
• RIFERIMENTI NORMATIVI	
• OBIETTIVI	
• MATERIALI E METODI	
• RISULTATI	
• DISCUSSIONI	
5.2)2. Fase 2: obiettivi, materiali e metodi, risultati	150
• RIFERIMENTI NORMATIVI	
• OBIETTIVI	
• MATERIALI E METODI	
• RISULTATI	
• DISCUSSIONI	
5.2)3. Fase 3: obiettivi, materiali e metodi, risultati	179
• RIFERIMENTI NORMATIVI	
• OBIETTIVI	
• MATERIALI E METODI	
• RISULTATI	
• DISCUSSIONI	
5.3) Considerazioni di sintesi	222
CONCLUSIONI	240
BIBLIOGRAFIA	246



ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1. Consumo di energia ed emissioni di gas climalteranti a livello mondiale divisi per settori. Fonte: Rapporto dell'Agencia Internazionale per l'Energia, 2020.	2
Figura 2. Produzione di rifiuti speciali e non speciali nel triennio 2017-2019 in Italia: indicazione delle percentuali relative al settore delle Costruzioni e Demolizioni. Fonte: Rapporto Rifiuti Speciali ISPRA 2021.	2
Figura 3. Produzione di rifiuti non speciali nell'anno 2019 in Italia divisi per settori. Fonte: Rapporto Rifiuti Speciali ISPRA 2021.	3
Figura 4. Rifiuti da Costruzione e Demolizioni prodotti (a) e avviati a trattamento (b) nel triennio 2017-2019, aggregati per categorie. Fonte: Rapporto Rifiuti Speciali ISPRA 2021.	4
Figura 5. Flusso di lavoro degli obiettivi dell'attività di ricerca: sequenza delle fasi. Fonte: Immagine ad opera dell'autore del testo.	11
Figura 6. Schematizzazione grafica triangolare del concetto di sviluppo sostenibile: sfere economica, sociale ed ambientale mutuamente interagenti. Fonte: Ruggerio, C.A. Sustainability and sustainable development: a review of principles and definitions. Sci. Total Environ., vol. 786, p.3, 2021.	15
Figura 7. I diciassette obiettivi per lo sviluppo sostenibile dell'Agenda 2030 dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite, Parigi, 2015. Fonte: www.salute.gov.it , consultazione: 2021.	19
Figura 8. Schema secondo diagramma di Venn della sostenibilità: cerchi di uguale dimensione intersecantisi e simmetrici rispetto ad un punto centrale. Fonte: Immagine ad opera dell'autore del testo.	22
Figura 9. Schema quadripartito della sostenibilità: centralità della società alla quale si uniscono istituzioni, ambiente ed economia. Fonte: Immagine ad opera dell'autore del testo.	24
Figura 10. Schema gerarchico della sostenibilità a cerchi concentrici. L'economia è considerata sottoinsieme della società, a sua volta contenuta nell'ambiente. Fonte: Immagine ad opera dell'autore del testo.	24
Figura 11. FTSE - First Tier Sustainability Equilibrium. Sostenibilità rappresentata con cerchi in movimento rotatorio completamente sovrapposti. Fonte: Moir, S.; Carter, K. Diagrammatic representations of sustainability - A review and synthesis. Assoc. Res. Constr. Manag. ARCOM 2012 - Proc. 28th Annu. Conf., 2012.	25
Figura 12. First Tier Sustainability Equilibrium: aggiunta della dimensione temporale. Fonte: Moir, S.; Carter, K. Diagrammatic representations of sustainability - A review and synthesis. Assoc. Res. Constr. Manag. ARCOM 2012 - Proc. 28th Annu. Conf., 2012.	25
Figura 13. Combinazione del FTSE - First Tier Sustainability Equilibrium con la dimensione temporale per ottenere il TTSE - Two Tiered Sustainability Equilibrium. Fonte: Moir, S.; Carter, K. Diagrammatic representations of sustainability - A review and synthesis. Assoc. Res. Constr. Manag. ARCOM 2012 - Proc. 28th Annu. Conf., 2012.	26
Figura 14. Il sistema di scambio delle quote di emissioni di gas serra dell'Unione Europea: le fasi. Fonte: www.isprambiente.gov.it , consultazione: 2021.	29

Figura 15. I pilastri del Green Deal europeo. Fonte: Rapporto annuale efficienza energetica ENEA, p.22, 2020.	31
Figura 16. “Le questioni inerenti alle costruzioni sostenibili”. L'immagine riporta le categorie generali ed i parametri di dettaglio dell'edilizia sostenibile. Fonte: Kibert, C. Establishing Principles and a Model for Sustainable Construction. Ind. Eng. 1994, p.4.	33
Figura 17. Gli obiettivi dell'Agenda 2030 perseguibili con azioni riguardanti il mondo delle costruzioni secondo il World Green Building Council. Fonte: www.worldgbc.org , consultazione: 2021.	35
Figura 18. Schematizzazione della sequenza esigenziale-prestazionale del processo edilizio: la collettività manifesta bisogni, interpretati dagli attori politici e tecnici per individuare le esigenze. Alle esigenze corrisponde la traduzione tecnica in requisiti rispetto ai quali le opere edili sono progettate. Alla realizzazione segue la verifica della rispondenza dell'opera (le prestazioni) ai requisiti e dunque alle esigenze. In caso affermativo, i bisogni si diranno soddisfatti. Fonte: immagine realizzata dall'autore del testo.	40
Figura 19. Rappresentazione grafica della decomposizione secondo la gerarchia della UNI 8290-1:1981: a sinistra, unità tecnologica “chiusura superiore” e relativi livelli subordinati, a destra, classe di unità tecnologica “struttura portante” e relativi livelli subordinati. Fonte: Mandolesi E., Edilizia, vol.1, Hoepli, Milano, 1978.	43
Figura 20. Rappresentazione grafica della decomposizione secondo la gerarchia della UNI 8290-1:1981 dell'elemento tecnico “setto murario” nei materiali costituenti: malta di allettamento e mattone. Fonte: Mandolesi E., Edilizia, vol.1, Hoepli, Milano, 1978.	44
Figura 21. Schematizzazione della stratigrafia di una parete perimetrale verticale costituita da quattro elementi tecnici: rivestimento di finitura esterno, supporto esterno, isolamento termico, supporto interno, rivestimento di finitura interno. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	45
Figura 22. Stralcio di lista di controllo LEED: il requisito Materiali e risorse è decomposto in un prerequisito ed otto crediti. Fonte: www.gbccitalia.org , consultazione: 2021.	48
Figura 23. Stralcio di lista di controllo LEED: il requisito Gestione delle acque è decomposto in un prerequisito e tre crediti. Fonte: www.gbccitalia.org , consultazione: 2021.	48
Figura 24. La piramide della gerarchia dei rifiuti della Direttiva Europea 2008/98/CE. Fonte: Rifiuti come risorse di un'economia circolare. Scheda ambiente UTILITALIA, 2017.	52
Figura 25. Grafico che riporta in ordinata il tasso di recupero e riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione (%) per gli anni nell'intervallo 2010-2017. Fonte: www.annuario.isprambiente.it , consultazione: 2021.	55
Figura 26. Composizione dei tipi di cemento secondo UNI EN 197-1:2011. Fonte: UNI EN 197-1:2011.	60
Figura 27. Relazione tra tipo di cemento, resistenza meccanica e periodo di stagionatura. Fonte: www.encosrl.it/dizionario-enciclopedico-del-calcestruzzo-sezione-2/ , consultazione: 2021.	63
Figura 28. Esempio di costruzione del fuso granulometrico di un calcestruzzo e scostamento dalla curva ideale di Fuller. Fonte: Karade, S. Spreadsheet Applications in Building Material Research Studies, 2021.	64
Figura 29. Schema di un impianto di produzione di aggregati riciclati fisso. Fonte: Blengini, G.; Garbarino, E. Demolizione selettiva e riciclaggio nell'ottica del ciclo di vita. 2021, pag. 6.	68
Figura 30. Schema di un impianto di produzione di aggregati riciclati mobile. Fonte: Blengini, G.; Garbarino, E. Demolizione selettiva e riciclaggio nell'ottica del ciclo di vita. 2021, pag. 5.	68

Figura 31. Quantità di MPS prodotte in Italia, per tipologia di MPS nell'anno 2019. Fonte: Ecocerved, consultazione: 2021.	72
Figura 32. Tipologia dei rifiuti gestiti dagli impianti di produzione di aggregati riciclati dell'Associazione Nazionale dei Produttori di Aggregati Riciclati. Fonte: Rapporto L'Italia del riciclo 2020, Fondazione per lo sviluppo sostenibile FISE UNICIRCULAR, pag.167.	72
Figura 33. Modello del brick layer: la struttura cristallina è schematizzata come sequenza di grani e bordi dei grani. Fonte: Schmidt, R. Ceramic Materials Research Trends: Impedance Spectroscopy of Electroceramics. Novascience Publ. 2007.	79
Figura 34. Relazione tra la conducibilità termica di calcestruzzi e malte e le variabili (da sinistra): tempo di stagionatura, percentuale in volume di aggregati, rapporto acqua-legante. Fonte: Kim, K.-H.; Jeon, S.-E.; Kim, J.-K.; Yang, S. An experimental study on thermal conductivity of concrete. Cem. Concr. Res. 2003.	80
Figura 35. Immagini al microscopio elettronico di malte confezionate con calce aerea (a), calce aerea e cemento in proporzione di massa 8:1 (b), calce aerea e cemento in proporzione di massa 6:3 (c), calce aerea e cemento in proporzione di massa 4,5:4,5 (d), calce idraulica naturale (e). Fonte: Mosquera, M.J.; Silva, B.; Prieto, B.; Ruiz-Herrera, E. Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport. Cem. Concr. Res. 2006.	82
Figura 36. Blocco in Calcestruzzo Aerato Autoclavato. Fonte:www.gasbeton.it, consultazione: 2021.	85
Figura 37. Classificazione dei calcestruzzi cellulari in funzione della natura di pori, dell'agente espandente, del metodo di produzione e delle condizioni di preparazione e stagionatura. Fonte: Chica, L.; Alzate, A. Cellular concrete review: New trends for application in construction. Constr. Build. Mater. 2019, 200, p.639.	87
Figura 38. Pori dell'aria del Calcestruzzo Aerato Autoclavato. In: Schober, G. Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. Cem. Wapno, Bet. 2011, p.352.	90
Figura 39. Microporosità del Calcestruzzo Aerato Autoclavato: classificazione. In: Schober, G. Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. Cem. Wapno, Bet. 2011, p.355.	91
Figura 40. Classificazione della variabile "A-tipo di aggregato". Gli aggregati sono stati distinti in base alla fonte (A1, A2) ed ai materiali (A1.1-A1.5; A2.1.1-A2.1.6; A2.2.1-A2.2.4); la figura riporta la struttura gerarchica ottenuta a valle del processo. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	100
Figura 41. Classificazione della variabile "B-proporzioni della miscela". La figura riporta la struttura gerarchica ottenuta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	101
Figura 42. Sequenza di sintesi S1: database. La figura riporta uno stralcio del foglio di calcolo relativo al nodo-foglia A1.1. L'ID degli articoli sono riportati in riga, i relativi valori delle variabili B, C, D in colonna. Il numero di celle non vuote per ogni colonna è riportato nella riga campita di colore azzurro. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	103
Figura 43. Andamento dei risultati di ricerca nell'intervallo 2010-2020. Il numero di risultati è diagrammato rispetto all'anno di pubblicazione: "malta AND aggregato AND riciclato NOT calcestruzzo", "conglomerato AND aggregato AND riciclato". Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	106
Figura 44. Andamento dei risultati di ricerca nell'intervallo 2010-2020. Il numero di risultati è diagrammato rispetto all'anno di pubblicazione: "malta AND aggregato AND riciclato", "malta AND riciclato", "aggregato AND riciclato". Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	106



Figura 45. Distribuzione della tipologia di materiali degli aggregati riciclati nel set di analisi. L'immagine riporta il numero di conteggi e la percentuale di ogni categoria. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	108
Figura 46. Distribuzione della tipologia di materiali degli aggregati riciclati per le categorie A1, A2.1 e A2.2. L'immagine riporta il numero di conteggi di ogni categoria. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	109
Figura 47. Distribuzione degli aggregati riciclati rispetto alla variabile "A-tipo di aggregato". Il numero di articoli per ogni nodo è riportato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	110
Figura 48. Rapporto per le variabili di B sui nodi-foglia di B. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di B. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	113
Figura 49. Rapporto per le variabili di C1 sui nodi-foglia di C1. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di C1. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	113
Figura 50. Rapporto per le variabili di C2 sui nodi-foglia di C2. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di C2. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	114
Figura 51. Rapporto per le variabili di C3 sui nodi-foglia di C3. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di C3. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	115
Figura 52. Rapporto per le variabili di C4 sui nodi-foglia di C4. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di C4. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	115
Figura 53. Rapporto per le variabili di C5 e D sui nodi-foglia di C5 e D. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di C5 e D. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	116
Figura 54. Rapporto per le variabili B, C, D sui nodi-foglia di B, C, D per le categorie A1, A2.1 e A2.2. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di B, C, D. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	117
Figura 55. NB, C, D dei nodi-foglia di B, C, D. NB, C, D è il rapporto tra il numero di conteggi di ogni nodo-foglia di B, C e D ed il numero totale di voci (137). Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia B, C, D. I rapporti sono disposti in ordine decrescente. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	118
Figura 56. Malte idonee all'utilizzo secondo la UNI EN 998-1:2016. Il grafico riporta, per ogni classe di malta da intonaco, la percentuale di provenienza degli aggregati dalle due macrocategorie A1 e A2. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	120
Figura 57. Malte idonee all'utilizzo secondo la UNI 998-2:2016. Una volta individuate, le malte sono state distinte in funzione del tipo di aggregato. Le figure riportano il numero, in ordine decrescente, di malte da muratura per ogni nodo-foglia di A, per ogni classe di malta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	121
Figura 58. Malte risultate idonee all'impiego ai sensi della UNI EN 998-2:2016. Il grafico riporta per ogni classe di malta da muratura la percentuale di provenienza degli aggregati dalle due macrocategorie A1 e A2. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	122
Figura 59. Il materiale oggetto della sperimentazione: blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato frantumati in una granulometria compresa tra 0 e 5 mm. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	129
Figura 60. Mescolatrice planetaria impiegata per la preparazione dell'impasto. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	133
Figura 61. Schema della flessione a tre punti: il provino prismatico poggia su due rulli ed è sollecitato con un carico verticale centrato. Fonte: www.tecnolabnapoli.it , consultazione: 2021.	134

Figura 62. Condizionamento dei provini per la caratterizzazione fisica. A sinistra, inserimento nella camera e creazione del sottovuoto; a destra, inserimento dell'acqua per l'immersione dei provini. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	136
Figura 63. Caratterizzazione fisica dei provini. A sinistra, lettura della massa satura mediante bilancia idrostatica; a destra, campioni saturi con superficie asciutta. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	136
Figura 64. Curva di distribuzione granulometrica dell'aggregato riciclato in AAC. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	138
Figura 65. Minuta di prova della distribuzione granulometrica dell'aggregato riciclato in AAC. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	139
Figura 66. Fasi di misurazione delle proprietà fisiche dell'aggregato riciclato. A sinistra, aggregato immerso nel picnometro, a destra, picnometro con acqua fino al traboccamento. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	139
Figura 67. Curve dell'analisi termogravimetrica (TGA) e della derivata prima (DTG) dell'aggregato in AAC. Sono evidenziati i picchi nella DTG ed i composti associati. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	141
Figura 68. Risultato dell'analisi diffrattometrica eseguita sull'aggregato riciclato: i picchi corrispondono a composti cristallini, le zone rumorose a composti amorfi. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	141
Figura 69. Prove di resistenza a flessione, valori distinti per miscela e per provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	142
Figura 70. Prove di resistenza a flessione: grafico che diagramma la resistenza a flessione in funzione della massa di AAC su polveri totali. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi equazione e coefficiente di correlazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	143
Figura 71. Prove di resistenza a compressione, valori distinti per miscela e per provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	144
Figura 72. Prove di resistenza a compressione: grafico che diagramma la resistenza a flessione in funzione della massa di AAC su polveri totali. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi equazione e coefficiente di correlazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	144
Figura 73. Densità reale ed apparente delle malte indurite. Il grafico diagramma le grandezze in funzione della massa di AAC su polveri totali. In figura si riporta la linea di tendenza con relativo coefficiente di correlazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	145
Figura 74. Porosità ed assorbimento d'acqua. Il grafico diagramma le grandezze in funzione della massa di AAC su polveri totali. In figura si riporta la linea di tendenza con relativo coefficiente di correlazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	146
Figura 75. Analisi diffrattometrica sull'aggregato e sulle miscele 3 e 5. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	147
Figura 76. Il materiale oggetto della sperimentazione: a sinistra blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato frantumati in una granulometria compresa tra 0 e 5 mm, a destra sabbia silicea con granulometria tra 0 e 5 mm. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	153
Figura 77. Misura della massa volumica in mucchio degli aggregati secondo la UNI EN 1097-3:1999. A sinistra, pesatura dell'aggregato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato; a destra, fase di riempimento del recipiente con la sabbia silicea. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	154



Figura 78. Siglatura dei provini: lettera ad indicare il legante, numero ad indicare la percentuale di aggregato riciclato su aggregato totale. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	155
Figura 79. Stampi metallici 40x40x160mm. Da sinistra: provini con cemento, con calce aerea e con calce idraulica naturale. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	156
Figura 80. Misurazione di densità reale ed apparente, porosità e assorbimento d'acqua secondo la UNI 1936:2007: da sinistra, immersione sottovuoto dei provini e pesatura con bilancia idrostatica. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	157
Figura 81. Attrezzatura per l'esecuzione della prova di resistenza a flessione a tre punti. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	158
Figura 82. Preparazione dei provini per l'esecuzione della prova di assorbimento d'acqua per capillarità: rivestimento dei provini con la paraffina. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	159
Figura 83. Esecuzione della prova di assorbimento d'acqua per capillarità: immersione dei provini in acqua. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	160
Figura 84. Curva di distribuzione granulometrica dell'aggregato riciclato in AAC. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	161
Figura 85. Minuta di prova della distribuzione granulometrica dell'aggregato riciclato in AAC. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	161
Figura 86. Massa volumica apparente media delle miscele misurata secondo UNI EN 1015-10:2007. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	162
Figura 87. Massa volumica apparente media delle miscele in funzione del dosaggio per metro cubo di aggregato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	163
Figura 88. Prove di resistenza a flessione delle malte: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	166
Figura 89. Prove di resistenza a compressione delle malte: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	167
Figura 90. Prove di resistenza a flessione e compressione: grafico che diagramma le resistenze medie in funzione della massa di AAC per metro cubo di malta. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi coefficiente di correlazione ed equazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	168
Figura 91. Prova di assorbimento di acqua per capillarità delle malte: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	169
Figura 92. Coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità medio, distinto per legante e miscela. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	170
Figura 93. Curve dell'analisi termogravimetrica (TGA) e della derivata prima (DTG). Sono evidenziati i picchi nella DTG ed i composti associati. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	171
Figura 94. Stralcio di diagramma dell'analisi diffrattometrica (TGA) e della DTG: si evidenzia il picco relativo alla tobermorite alluminosa per la miscela C100. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	171
Figura 95. Diagramma dell'analisi diffrattometrica (TGA) e della DTG: si evidenzia la sovrapposizione quasi totale dei tratti delle curve C0, C100, L100 e NHL100 nell'intervallo termico fino ai 750°C. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	172



Figura 96. Fotografie delle sezioni dei provini 0 e 100 per ciascuno dei leganti: evidenza della porosità più diffusa e dimensionalmente maggiore all'aumentare della percentuale di aggregato riciclato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	177
Figura 97. Proporzioni in volume dei componenti nelle miscele con cemento e calce idraulica naturale. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	182
Figura 98. Fasi di preparazione dei campioni INT. Da sinistra: stampi metallici 40x40x160mm, tavola a scosse. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	186
Figura 99. Prova di aderenza al supporto: preparazione campioni su laterizio e su calcestruzzo. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	187
Figura 100. Prova di aderenza al supporto: incollaggio delle piastrine metalliche. Da sinistra: supporto in AAC, supporto in laterizio. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	187
Figura 101. Macchina per l'esecuzione della prova. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	188
Figura 102. Tipologie di rottura da prova di aderenza al supporto secondo la UNI EN 1015-12:2016. Da sinistra: Frattura di Adesione (A) per distacco all'interfaccia tra lo spessore di malta ed il supporto, Frattura di Coesione (B) per rottura nello spessore della malta e Frattura di Coesione (C) per rottura del supporto. Fonte: UNI EN 1015-12:2016.	188
Figura 103. Prova di permeabilità al vapore acqueo: da sinistra, campione cilindrico alla fase di sformatura, inserimento e sigillatura del provino nel recipiente di prova. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	189
Figura 104. Prova di permeabilità al vapore acqueo: da sinistra, inserimento della soluzione nella camera inferiore, chiusura del sistema, pesatura del sistema. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	190
Figura 105. Fasi di preparazione dei campioni MUR. Da sinistra: stampi metallici 40x40x160mm, campioni alla scasseratura, campioni al termine del periodo di stagionatura. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	191
Figura 106. Prova ad ultrasuoni: da sinistra, disposizione delle sonde, particolare dell'accoppiamento sonda-provino. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	192
Figura 107. Curve di distribuzione granulometrica degli aggregati per MUR e INT. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	193
Figura 108. Prove allo stato fresco: massa volumica delle polveri e massa volumica apparente della malta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	194
Figura 109. Andamento della massa media dei provini di ogni miscela in funzione del tempo di maturazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	195
Figura 110. Massa volumica apparente media delle miscele misurata secondo UNI EN 1015-10:2007. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	196
Figura 111. Massa volumica apparente media delle miscele in funzione del dosaggio per metro cubo di aggregato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	197
Figura 112. Prove di resistenza a flessione delle malte INT: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	197
Figura 113. Prove di resistenza a compressione delle malte INT: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	198



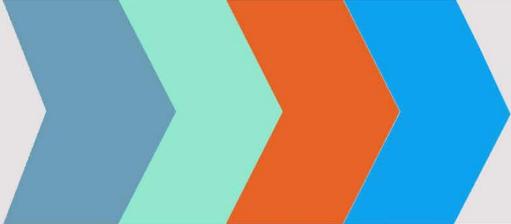
Figura 114. Prove di resistenza a flessione e compressione: resistenze medie in funzione della massa di AAC per metro cubo di malta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	199
Figura 115. Prova di assorbimento di acqua per capillarità delle malte INT: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	200
Figura 116. Prova di assorbimento di acqua per capillarità delle malte INT: inserimento dei provini nel volume d'acqua con le facce spezzate immerse. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	200
Figura 117. Preparazione dei campioni su laterizio della miscela NHL10 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	201
Figura 118. Preparazione dei campioni su calcestruzzo della miscela NHL10 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: vista dall'alto, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	202
Figura 119. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato della miscela NHL10 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	202
Figura 120. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato della miscela NHL20 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	203
Figura 121. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato con rete porta-intonaco della miscela NHL20 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	203
Figura 122. Aderenza al supporto, miscela NHL20, sono riportati i valori per ogni provino di ogni campione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	204
Figura 123. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato della miscela NHL40 per la prova di aderenza al supporto: fessure da ritiro al momento della stesura della malta. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	205
Figura 124. Preparazione dei campioni su calcestruzzo della miscela NHL40 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	205
Figura 125. Preparazione dei campioni su laterizio della miscela NHL40 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: vista dall'alto, vista laterale. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	205
Figura 126. Aderenza al supporto, miscela NHL40, sono riportati i valori per ogni provino di ogni campione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	206
Figura 127. Preparazione dei campioni su laterizio della miscela NHL30 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: vista dall'alto, vista laterale. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.	206
Figura 128. Aderenza al supporto, miscela NHL30, sono riportati i valori per ogni provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	207
Figura 129. Aderenza al supporto, grafico riassuntivo, sono riportati i valori medi per ogni campione testato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	208
Figura 130. Prova di permeabilità al vapore acqueo, malte INT: valori distinti per miscela e mediati su 3 provini. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	209



Figura 131. Prove allo stato fresco: massa volumica delle polveri e massa volumica apparente della malta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	210
Figura 132. Andamento della massa media dei provini di ogni miscela in funzione del tempo di maturazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	211
Figura 133. Massa volumica apparente media delle miscele misurata secondo UNI EN 1015-10:2007. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	212
Figura 134. Massa volumica apparente media delle miscele in funzione del dosaggio per metro cubo di aggregato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	212
Figura 135. Modulo elastico indiretto mediante prova agli ultrasuoni, malte MUR: valori medi per miscela di modulo elastico e velocità di propagazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	213
Figura 136. Prove di resistenza a flessione delle malte MUR: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	214
Figura 137. Prove di resistenza a compressione delle malte MUR: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	214
Figura 138. Prove di resistenza a flessione e compressione: grafico che diagramma le resistenze medie in funzione della massa di AAC per metro cubo di malta. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi coefficiente di correlazione ed equazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	215
Figura 139. Prove di resistenza a flessione e compressione: grafico che diagramma per ogni intervallo di miscela le variazioni relative del dosaggio di AAC e le variazioni relative delle prestazioni meccaniche medie. Sono riportati i valori della pendenza per ogni tratto (rapporto tra le due variazioni). Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	216
Figura 140. Curve dell'analisi termogravimetrica (TGA) e della derivata prima (DTG). Sono evidenziati i picchi nella DTG ed i composti associati. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	217
Figura 141. Tasso di variazione della massa nel tempo di stagionatura: il grafico a colonne raggruppate riporta per ogni intervallo di misurazione il relativo tasso di variazione della massa media dei provini. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	219
Figura 142. Frazioni volumetriche delle miscele C 32,5, C 42,5. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	223
Figura 143. Frazioni volumetriche delle miscele NHL, NHL n. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	224
Figura 144. Frazioni volumetriche delle miscele HL, L. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	225
Figura 145. Proprietà meccaniche e fisiche vs dosaggio di aggregato per metro cubo di miscela. In successione: (a), resistenza a compressione, (b), resistenza a flessione, (c), massa volumica apparente. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	228 a 230
Figura 146. Resistenza a flessione vs resistenza a compressione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	231
Figura 147. Massa volumica apparente, resistenza a compressione e flessione per gruppi omogenei di malte. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	232
Figura 148. Relazioni per 1) e 2) del flusso di mix design per le miscele con cemento. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	234



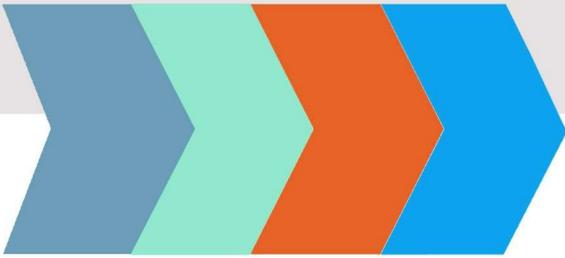
Figura 149. Relazioni per 1) e 2) del flusso di mix design per le miscele con calce. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	235
Figura 150. Relazioni per 3) del flusso di mix design per tutte le miscele. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	236
Figura 151. Curve di distribuzione granulometrica degli aggregati per le malte del gruppo "INT" e quelle adoperate nella sperimentazione di Haddad et al. [176]. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	237
Figura 152. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, selezione del tipo di legante. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	238
Figura 153. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, selezione della classe di resistenza. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	238
Figura 154. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, calcolo della massa volumica apparente della malta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	239
Figura 155. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, restituzione della composizione in massa ed in volume dei componenti. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.	239



ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1. Prospetto 1 della norma UNI EN 998-1:2016.	83
Tabella 2. Specificazioni UNI EN 998-1:2016 per malte da intonaco. Sono riportati le classi di malta ed i relativi requisiti.	104
Tabella 3. Specificazioni UNI EN 998-2:2016 per malte da muratura. Sono riportati le classi di malta ed i relativi requisiti.	105
Tabella 4. Malte da intonaco secondo le specificazioni della UNI EN 998-1:2016. Si riportano i numeri di identificazione degli articoli contenenti le malte idonee.	119
Tabella 5. Composizione delle malte testate.	133
Tabella 6. Proprietà fisiche degli aggregati secondo UNI EN 1097-6:2013.	138
Tabella 7. Risultati della DTG.	142
Tabella 8. Proprietà fisiche delle malte.	145
Tabella 9. Parametri di miscela distinti a seconda dei leganti.	155
Tabella 10. Composizione delle miscele.	156
Tabella 11. Proprietà fisiche delle malte.	164
Tabella 12. Conducibilità termica tabellare. Le celle campite corrispondono alle miscele qualificabili come intonaci termici.	165
Tabella 13. Classificazione delle miscele secondo la UNI EN 998-2:2016: si riportano i numeri parziale e complessivo di miscele per ogni categoria.	173
Tabella 14. Classificazione delle miscele secondo la UNI EN 998-1:2016: si riportano i numeri parziale e complessivo di miscele per ogni categoria.	173
Tabella 15. Parametri di miscela distinti a seconda dei leganti.	180
Tabella 16. Parametri di miscela distinti a seconda dei leganti.	184
Tabella 17. Composizione delle miscele.	185
Tabella 18. Consistenze delle miscele misurate con metodo della tavola a scosse.	194
Tabella 19. Matrice di correlazione massa volumica apparente - frazioni in volume. Da sinistra: insieme delle miscele e miscele con cemento (C32,5 e C42,5)	226
Tabella 20. Matrice di correlazione massa volumica apparente - frazioni in volume. Da sinistra: miscele con calce idraulica (NHL, NHL n, HL) e calce aerea (L)	226

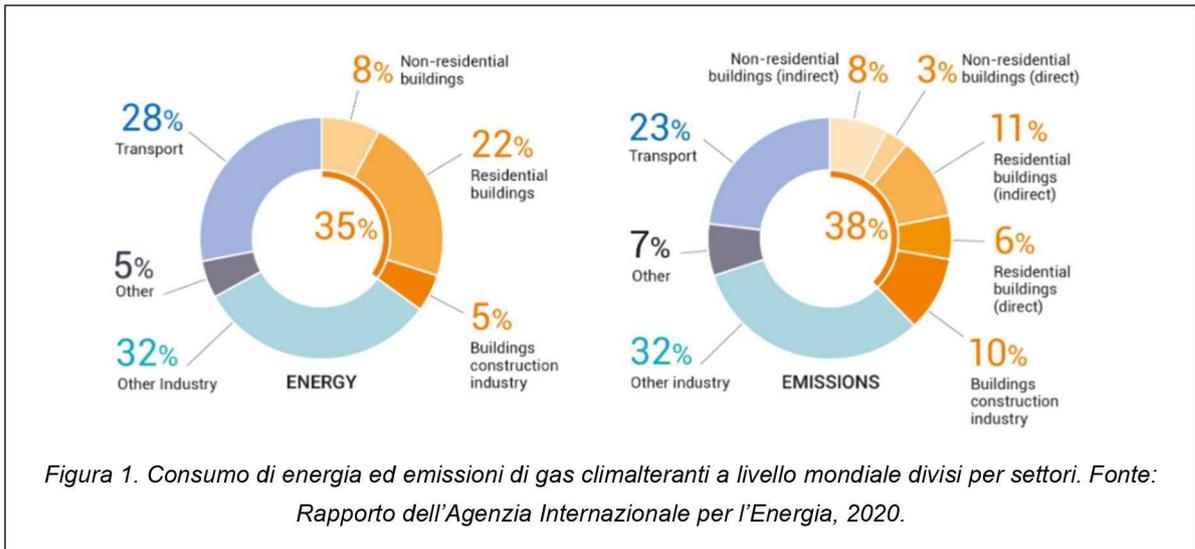
INTRODUZIONE



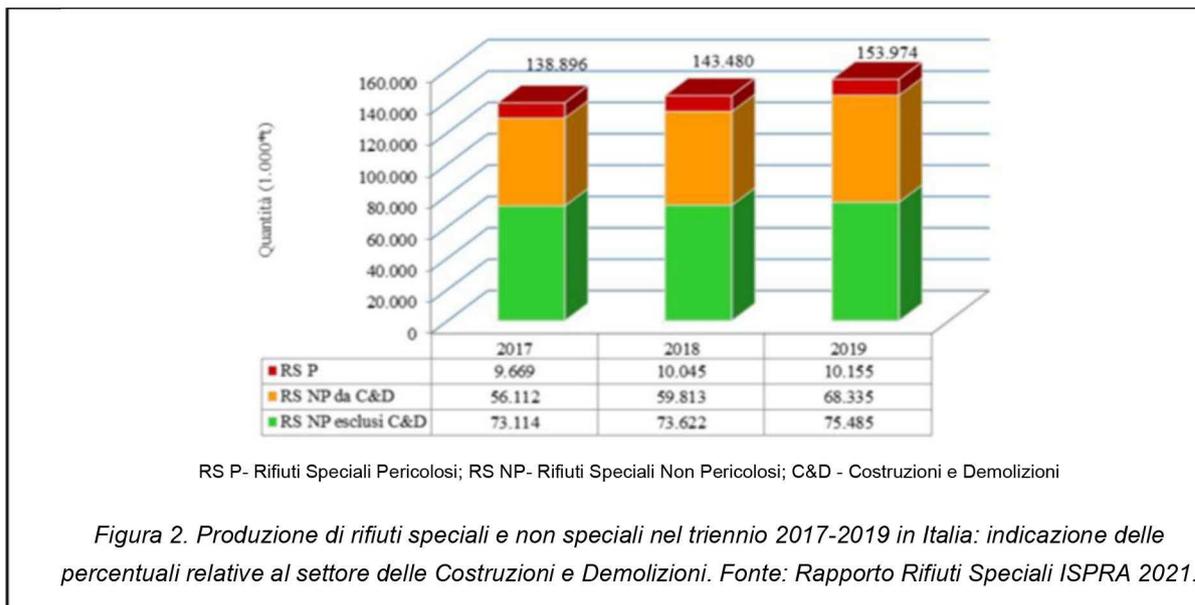
Negli ultimi decenni il tema della sostenibilità ha acquisito un ruolo progressivamente più centrale nella società, non solo in riferimento alle questioni strettamente ambientali ma anche alle politiche economiche, spesso distanti dalle istanze qualificate come “ecologiste”. L’indirizzo sostenibile è divenuto pertanto una sfida che le attività antropiche, trasversalmente, sono impegnate a fronteggiare al fine di garantire uno sviluppo che “[...] consente alla generazione presente di soddisfare i propri bisogni senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri [...]”[1]. È riflessione condivisa quella di ritenere necessaria la sostenibilità, nella sua accezione più generica, atteso lo squilibrio intercorrente tra le quantità di risorse che sono consumate, unitamente al volume di scarti e di emissioni in uscita dai processi produttivi, da un lato, e la capacità rigenerativa della natura, insufficiente a fronteggiare la crescente domanda. I concetti di “industria 4.0”, “economia circolare” e “*green economy*” sono divenuti, pertanto, gradualmente più diffusi ed hanno richiesto uno sforzo più intenso ai settori - come l’edilizia - storicamente più tradizionalisti e meno elastici all’accoglimento delle innovazioni. Tuttavia, considerati gli impatti economici, ambientali e sociali che il mondo delle costruzioni genera, l’edilizia sostenibile è un proposito certamente ambizioso ma altrettanto improrogabile [2].

Le costruzioni hanno possibilità di essere sostenibili se divengono circolari, ossia se sono in grado di minimizzare gli *input* e gli *output* dei complessi processi produttivi che le accompagnano. Basti pensare che secondo le stime del rapporto stilato nel 2020 dall’Agenzia Internazionale dell’Energia (*IEA*) gli edifici sono responsabili - su scala mondiale - del 35% del consumo di energia e del 40% di emissioni di gas climalteranti, a fronte del 32% assorbito dalle altre industrie, come riportato in Figura 1. A livello nazionale è mantenuto lo stesso andamento.

INTRODUZIONE

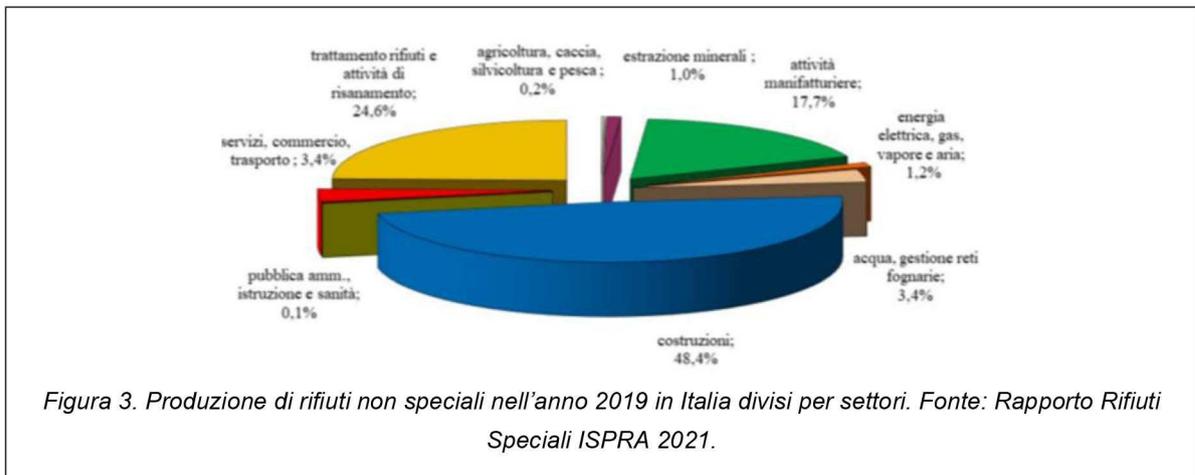


Con riferimento alla produzione di rifiuti speciali¹ sul territorio italiano, invece, nel grafico della Figura 2 estratto dal *Rapporto ISPRA Rifiuti Speciali 2021* è visibile come, nel triennio 2017-2019, il comparto delle Costruzioni e Demolizioni ha assorbito circa il 50% dei rifiuti speciali non pericolosi prodotti in Italia, con una crescita - seppur contenuta - nel periodo.



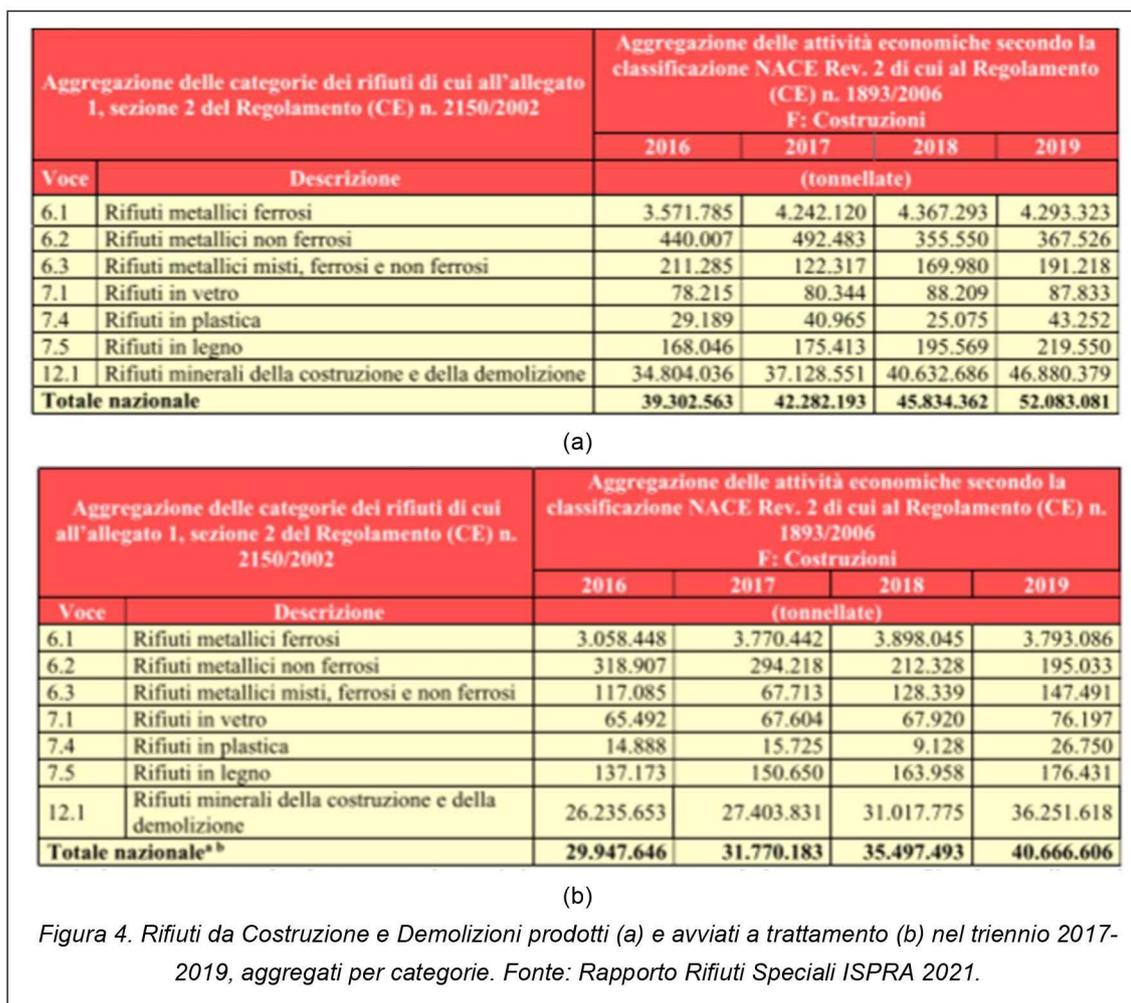
Con le segmentazioni di ulteriore dettaglio mostrate in Figura 3 si percepisce la rilevanza del comparto delle costruzioni nel soddisfacimento dei propositi inerenti alla sostenibilità: il 48% dei rifiuti non speciali prodotti nell'anno 2019 in Italia è provenuto dal settore edilizio, a fronte del 25% da processi di trattamento dei rifiuti e del 18% da attività manifatturiere.

¹ Rifiuti diversi da quelli urbani, secondo le definizioni contenute negli articoli 183 e 184 del D.Lgs. 152/06 e ss.mm.ii.



L'obiettivo di circolarità in edilizia può essere raggiunto mediante diverse strategie in merito alle quali l'attività di ricerca in commento, incardinata sui settori disciplinari della Produzione edilizia e della Scienza e tecnologia dei materiali, ha ritenuto interessante approfondire il riutilizzo dei rifiuti per la generazione delle cosiddette Materie Prime Secondarie ed in particolare per la produzione di aggregati [3]. Il percorso è stato strutturato muovendo dalla considerazione che la richiesta di inerti per il confezionamento di calcestruzzi e malte - prodotti edilizi più utilizzati dall'uomo - rappresenta una sorgente pressoria insostenibile per l'ambiente [4]. La produzione degli aggregati, infatti, prevede operazioni di sottrazione di materiale naturale e consumo di energia per la sua trasformazione e restituisce una mole di scarti spesso destinati alle discariche. Non ultima, ancora, è l'alterazione dei paesaggi ad opera delle cave, ad esempio, che può cagionare modifiche irreversibili agli ecosistemi. D'altro canto, ogni fase del processo edilizio è accompagnata dalla produzione di sfridi e scarti. Si pensi al volume di materiale residuo dalle operazioni di costruzione o demolizione degli edifici o ancora alle lavorazioni industriali per la preparazione dei materiali adoperati per le costruzioni (leganti, aggregati, blocchi, pannelli). I dati riportati dal Rapporto ISPRA in merito alla percentuale di rifiuti prodotti da Costruzioni e Demolizioni avviata a processi di riutilizzo, riciclo o recupero sono confortanti poiché mostrano, come sinteticamente riportato in Figura 4, che la pratica di trattamento dei rifiuti è aumentata negli ultimi anni, giungendo al 78% nel 2019. Tuttavia, il materiale "edile" proveniente dalle attività manifatturiere è escluso dalla computazione riportata nella figura citata.

INTRODUZIONE



In letteratura sono numerose le sperimentazioni, aumentate negli ultimi anni a testimonianza della crescente centralità del tema, aventi ad oggetto la caratterizzazione di aggregati riciclati dai prodotti di scarto edilizi (soprattutto da demolizioni e costruzioni [5–9]) o dai rifiuti urbani, in particolare di matrice plastica [10–14]. Meno battuto, invece, è il filone relativo al riciclo dei prodotti di scarto industriali i quali, diversamente dai residui originatisi in cantiere, vantano una composizione controllata e controllabile, la qual cosa rappresenta un fattore rilevante e positivo nell’ottica di velocizzazione del processo di recupero [15,16]. Relativamente all’impiego, poi, i calcestruzzi occupano una posizione di interesse prevalente rispetto alle malte, meno indagate ma altrettanto diversificate negli utilizzi e dipendenti dalle caratteristiche degli aggregati.

La ricerca, quindi, con il proposito di rafforzare il concetto di circolarità, ha posto l’attenzione sulla possibilità di produrre inerti, propriamente detti artificiali, dal riutilizzo degli scarti di un’industria di materiali per le costruzioni [17–19]. L’analisi dello stato dell’arte, a tal proposito, ha consentito di rilevare che il Calcestruzzo Aerato Autoclavato, pur trovando una crescente diffusione, è stato minormente

INTRODUZIONE

indagato rispetto ad altri prodotti edilizi come quelli ceramici o minerali espansi (perlite, vermiculite). Si è deciso pertanto di studiare il reimpiego dei suoi scarti di produzione come aggregato per il confezionamento di una malta. La circolarità dell'operazione è rafforzata dal fatto che i residui di lavorazione di un prodotto per le costruzioni, il blocco in Calcestruzzo Aerato Autoclavato, sarebbero riutilizzati per un componente - gli aggregati - necessario alla preparazione di un altro prodotto edile quale la malta, appunto.

Se il quesito scientifico posto è stato quello di verificare la percorribilità di quest'opzione circolare, la metodologia adoperata allo scopo ha previsto anzitutto la conoscenza della Materia Prima Secondaria per poi procedere alla caratterizzazione delle malte confezionate con diverse formulazioni che la contenevano, appunto. L'ottica nella quale la ricerca si è posizionata è stata quella di confronto e congiungimento delle prestazioni misurate nelle prove di laboratorio con i requisiti che le norme di settore prevedono per gli elementi tecnici, in questo caso le malte. Si è ritenuta indispensabile, infatti, l'interfaccia costante con la praticabilità "relativa" di ogni operazione effettuata nel percorso e non soltanto di quella "assoluta". Vale a dire che ciascuna delle attività messe in atto è stata valutata rispetto a termini di confronto, normativi per le prestazioni, o di convenienza "operativa" per quanto attiene ad esempio alle fasi di preparazione delle miscele. Le campagne di confezionamento sono state organizzate in tre diversi momenti, cronologicamente e logicamente ordinati. Gli obiettivi delle fasi sono stati, cioè, fissati sulla base dei risultati precedenti ed ogni momento ha previsto uno stadio di progettazione delle formulazioni e successiva caratterizzazione fisica, meccanica e chimico-mineralogica con le differenziazioni dipendenti dal campo di applicazione prospettato. In ultimo, i dati misurati complessivamente nell'attività sperimentale sono stati sintetizzati al fine di individuare relazioni funzionali tra le variabili di proporzionamento delle miscele e le prestazioni utili a classificarne l'idoneità all'utilizzo come elementi tecnici, parte del sistema tecnologico dell'edificio.

I risultati dell'attività di ricerca hanno consentito a tal proposito alcune riflessioni sulle scelte operabili sulla tipologia di legante, sulle modalità di proporzionamento delle malte e sulla granulometria e la quantità dell'aggregato riciclato, aspetti che condizionano in particolare la resistenza a compressione, discriminante l'idoneità del prodotto all'impiego come malta. Ulteriore aspetto, maggiormente legato alle questioni di carattere operativo cui si faceva menzione in precedenza, riguarda le condizioni di inserimento dell'aggregato riciclato che, in linea con quanto riportato da altri autori, comporta problematiche nella quantificazione - prima - e nella gestione - poi - dell'acqua di impasto.

INTRODUZIONE

Quanto appena esposto sinteticamente, è confluito nel presente lavoro di ricerca organizzato in una sezione di apertura, di presentazione degli obiettivi e finalità della ricerca, a cui segue il corpo centrale strutturato in tre parti.

La parte I inquadra il contesto di riferimento scientifico nel quale l'attività si inquadra ed espone, quindi, in tre capitoli i temi di rilevanza della sostenibilità nelle accezioni generale (1²) e specifica per l'edilizia (2), e ciò che concerne gli inerti (3), punto di insostenibilità nel mondo delle costruzioni.

Si procede, a questo punto, nella parte II, organizzata in un unico capitolo, a presentare i due materiali oggetto di interesse per la sperimentazione, ossia le malte (4.1) e il Calcestruzzo Aerato Autoclavato (4.2) dal cui riutilizzo si intende produrre gli aggregati riciclati.

La parte III, seguente la trattazione dei materiali, si occupa invece del metodo adoperato per il perseguimento degli obiettivi fissati e dunque espone, dopo la disamina dello stato dell'arte relativo alle malte confezionate con aggregati riciclati da materiali "edili" (5.1), le tre fasi dell'attività sperimentale (5.2) ed infine le considerazioni di sintesi sui risultati ottenuti (5.3).

A chiusura del testo, infine, le conclusioni e la bibliografia di riferimento.

² L'indicazione numerica si riferisce alla notazione adoperata per i capitoli e i paragrafi nel sommario e nel testo



OBIETTIVI E FINALITÀ DELLA RICERCA

ABSTRACT

Il paragrafo “**Obiettivi e finalità della ricerca**” richiama sinteticamente i **temi** di carattere generale che hanno guidato nella definizione del percorso di ricerca: il contenimento dei **consumi** di risorse e di energia, la **sostenibilità** richiesta al settore edilizio e l'**economia circolare**.

La rilevanza di questi temi, infatti, è divenuta il punto di partenza per l'individuazione dello specifico **quesito scientifico** a cui l'attività si è proposta di dare risposta, ossia la possibilità di impiegare un prodotto di **scarto** della **filiera edilizia**, risultante dalla produzione dei blocchi in **Calcestruzzo Aerato Autoclavato**, come **aggregato** per il confezionamento di un nuovo materiale per le costruzioni, una **malta ecosostenibile**.

Gli **obiettivi** del lavoro di tesi, direttamente derivati dal succitato quesito, l'**impostazione metodologica** adoperata allo scopo e la **sequenza** delle fasi sono quindi illustrati.

La **struttura “top-down”** del percorso ed i relativi punti introdotti nel paragrafo sono poi ripresi e dettagliatamente trattati nelle parti successive del testo.

Il perseguimento degli obiettivi fissati al 2030 dall'Unione Europea di miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio costruito, di riduzione della produzione di gas clima alteranti e di sostenibilità ed economia circolare richiedono al settore edilizio - responsabile di impatti significativi e negativi sull'ambiente - una spinta innovativa sulle soluzioni produttive alle quali, in particolare, è demandato un orientamento alla direzione di sostenibilità sia nell'aspetto dei materiali che delle tecnologie. Il mondo delle costruzioni, infatti, come anticipato, è annoverato tra i quattro settori più emissivi di gas serra in atmosfera e più energeticamente dispendiosi.

L'esigenza di ridurre l'impatto ambientale cagionato dalla filiera edilizia ha dunque indirizzato la ricerca a livello globale verso le pratiche di riuso - laddove possibile - e riciclo dei rifiuti provenienti dalle fasi di costruzione e demolizione delle opere, cosiddetti C&Ds, finalizzate a reinserire nei processi costruttivi i materiali culturalmente considerati di scarto ed a risolvere l'annoso problema dello smaltimento di detti materiali in discarica, altrimenti unica soluzione percorribile. In aggiunta, il consumo di risorse e di energia imputabile al comparto edilizio non è ascritto soltanto ai momenti di costruzione ed utilizzo delle opere, bensì anche alla fase ad essi preliminare - ossia all'apparato industriale di fornitura dei materiali per le costruzioni - ed a quella ad essi seguente, di dismissione dei manufatti.



OBIETTIVI E FINALITÀ DELLA RICERCA

Con riferimento alla fase preliminare, in particolare, i cicli produttivi di leganti, aggregati e materiali lapidei artificiali consumano ingenti quantità di risorse ed energia e producono scarti, altresì destinati allo smaltimento.

Gli inerti - o aggregati - nello specifico, tradizionalmente di origine naturale, coprono una frazione volumetrica nel conglomerato - malta o calcestruzzo - sino all'80% ed esercitano, pertanto, una consistente azione pressoria sull'ambiente essendo responsabili della sottrazione di risorse non rinnovabili ovvero non dotate di una sufficiente capacità rigenerativa.

Sulla base di queste premesse e riconoscendo come fulcri di interesse scientifico i concetti di contenimento dei consumi di risorse e di energia e di economia circolare, la ricerca in commento ha inteso approfondire la suscettività di impiego dello scarto della produzione dei blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato come aggregato riciclato per il confezionamento di una malta ecosostenibile, in ragione delle seguenti considerazioni. L'utilizzo in edilizia del Calcestruzzo Aerato Autoclavato, nel seguito AAC, è notevolmente aumentato negli ultimi decenni così come, conseguentemente, i rifiuti provenienti dalla sua produzione. Il materiale, dunque, è stato definito una *problem fraction* poiché il volume di scarti da dover smaltire proveniente dalla produzione, dalla costruzione e dalla demolizione delle opere in AAC è consistente. Il suo reimpiego come aggregato consentirebbe, quindi, di ridurre la mole di detti rifiuti, per giunta *speciali* in quanto contenenti una percentuale di gesso adoperato nella produzione dell'AAC, altrimenti destinata alla discarica. Sebbene gli aggregati siano utilizzabili anche per il confezionamento di calcestruzzi, lo studio si è focalizzato sul loro impiego in una malta in quanto dalla consultazione della letteratura di settore, come illustrato nel paragrafo 5.1, è emerso un più ampio margine di trattazione per questi conglomerati, meno frequentemente indagati rispetto ai calcestruzzi.

Una volta fissato l'obiettivo primario di verificare la possibilità di impiego del prodotto riciclato come aggregato mediante una sua prima caratterizzazione, immediatamente successivo è divenuto il proposito di strutturare una metodologia utile a definire la composizione ottimale della malta ecosostenibile, distinguendone le categorie di utilizzo per l'allettamento delle murature e come intonaco. Pur trattandosi di uno stesso materiale, difatti, l'impiego in elementi tecnici diversi richiede la rispondenza ad altrettanto diversi requisiti. Il punto di partenza per la programmazione dell'attività sperimentale, dunque, è stato la formulazione di una ipotesi applicativa per le malte con l'AAC. Rispetto a questa, poi, è stata valutata la compatibilità dei prodotti confezionati con la domanda prestazionale richiesta dalle norme. Tenuto conto della contenuta massa volumica dell'aggregato in AAC, si è



OBIETTIVI E FINALITÀ DELLA RICERCA

inizialmente approfondito l'ambito delle malte non strutturali termoisolanti, adoperabili come intonaci su pareti perimetrali e massi per solai di primo e di ultimo calpestio, elementi tecnici più disperdenti degli edifici.

L'approccio "progettuale" è stato mutuato dal *mix design* del calcestruzzo secondo cui fissate le classi di consistenza e prestazione - cui implicitamente sono connessi i parametri meccanici e di lavorabilità del conglomerato - è ricavabile la proporzione tra i componenti. La metodologia della presente ricerca ha inteso leggere la prestazione macroscopica dell'oggetto edilizio "malta con aggregato riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato" come il risultato delle interazioni micro e mesoscopiche tra i componenti legante, acqua ed aggregato, così da poterne controllare efficacemente l'impiego nella produzione edilizia.

La finalità ultima, quindi, è stata quella di riconoscere, a valle dell'attività sperimentale di confezionamento e caratterizzazione delle malte con AAC, la sussistenza di relazioni analitiche tra le prestazioni del conglomerato (livello macroscopico) e la sua composizione percentuale (livello microscopico). Le prestazioni della malta, infatti, sono espressione di fenomeni fisici governati da parametri direttamente connessi alle caratteristiche chimiche e fisiche del conglomerato nello stato fresco ed indurito. Queste, a loro volta, sono influenzate dalla formulazione in termini di legante, aggregato ed acqua. L'individuazione delle relazioni, pertanto, potrebbe consentire di strutturare uno strumento dal funzionamento algoritmico tramite cui l'insieme di variabili di *input* - descrittive dei paradigmi prestazionali - inserito a cascata nel sistema delle relazioni restituisce in *output* la formulazione della malta che ottimizza le prestazioni in ingresso. In maniera del tutto simmetrica, lo strumento potrebbe assumere una valenza predittiva potendo, a valle dell'ipotesi di una formulazione della malta in *input*, stimarne - pur con un margine di incertezza - le prestazioni corrispondenti in *output*. Nella logica di ripetibilità, sottesa alla progettualità della miscela, il ricorso ad un materiale proveniente da una filiera produttiva ha risolto la problematica connessa all'utilizzo di aggregati riciclati recuperati dai processi di costruzione e demolizione. In questo caso, infatti, non è assicurata la costanza delle proprietà fisiche e chimico-mineralogiche degli aggregati e la loro conoscenza *ex ante* essendo subordinate, dette proprietà, alla variabilità della composizione delle macerie da cui gli aggregati sono ottenuti.

L'obiettivo principale è stato raggiunto attraverso una sequenza di sub-obiettivi e fasi intermedi. *In primis* sono stati approfonditi i problemi termico, igrometrico, chimico e meccanico studiandone i fenomeni fisici di governo e le grandezze che ne misurano le prestazioni. In questa fase l'analisi ha prescinduto dal componente edilizio



OBIETTIVI E FINALITÀ DELLA RICERCA

specifico e si è limitata a qualificare i fenomeni per restituire un sistema di variabili di *input* corrispondenti a quelle generalmente inserite nelle schede tecniche dei materiali: conducibilità termica, permeabilità al vapore acqueo, percentuale di solfati e di altri gruppi chimici, resistenze meccaniche.

Il momento successivo ha congiunto gli aspetti relativi ai fenomeni fisici generali e la malta ed ha avuto come obiettivo l'individuazione delle variabili macro e microstrutturali che influenzano le grandezze individuate al primo punto. In particolare, con l'ausilio della letteratura di settore e dell'evidenza sperimentale sono state misurate le proprietà dei sistemi (massa volumica, porosità, assorbimento d'acqua) che più significativamente impattano sulle prestazioni, qualificando e quantificando - dove possibile - le relazioni. Questa congiunzione ha spostato il problema dal sistema fisico generale al sistema edilizio malta, fisicamente e chimicamente eterogeneo, la cui composizione è controllabile tramite le scelte su aggregato, legante e rapporto liquido-solidi. Per poter costruirne il *mix design* è stato necessario evidenziare l'influenza dei termini componenti il sistema sulle proprietà fisiche e chimiche della malta. Il lavoro si è proposto, dunque, di confrontare diversi scenari ottenuti con scelte su variabili di controllo quantitative (percentuale di aggregato riciclato e rapporti tra componenti liquidi e solidi) e/o qualitative (tipologia di legante e distribuzione granulometrica dell'aggregato). Questo con la premessa che le alternative cemento, calce aerea e calce idraulica *in primis* influenzano notevolmente la porosità e la massa volumica, e dunque le prestazioni meccaniche, oltre che l'*asset* mineralogico e quindi l'esposizione ad interazioni chimiche. A tal proposito è stata posta una precisa attenzione all'aspetto concernente il gesso contenuto nell'aggregato in AAC, per il quale la ricerca ha inteso indagare l'eventuale attività del gruppo solfatico, potenzialmente foriero di fenomeni di aggressione chimica interni, come ampiamente trattato dalla letteratura in materia di calcestruzzi. Nel merito dell'attività sperimentale si è proceduto, quindi, all'esecuzione di analisi chimico mineralogiche - diffrattometria ai raggi X e termogravimetria - sulle miscele confezionate per poter qualificare e quantificare l'eventuale attività del gesso, volendo escludere problematiche operative legate alla igroscopia del materiale ed alla sua tendenza alla lisciviazione. L'intero lavoro, infatti, ha costantemente guardato alla prospettiva applicativa del sistema studiato - la malta - tenendo in conto che, sia per la realizzazione di murature che per l'utilizzo come intonaco, l'ambiente di inserimento umido si sarebbe potuto rivelare incompatibile con le caratteristiche del prodotto confezionato.

Il flusso di lavoro è schematizzato in Figura 5.

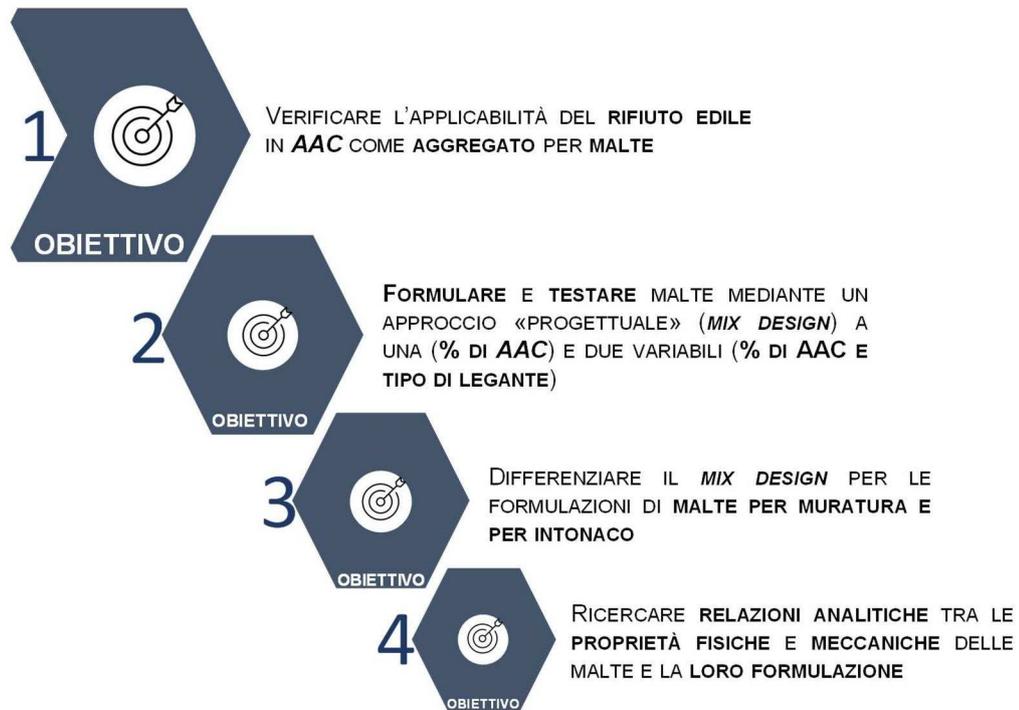


Figura 5. Flusso di lavoro degli obiettivi dell'attività di ricerca: sequenza delle fasi. Fonte: Immagine ad opera dell'autore del testo.

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

ABSTRACT

La **Parte I** del testo, sebbene posta a seguire il paragrafo “Obiettivi e finalità della ricerca”, ha costituito di questo il presupposto sia sul piano cronologico che su quello logico. La disamina del **panorama scientifico di inquadramento**, infatti, è stata utile ad individuare i **temi** di corrente **interesse generale** dai quali - mediante una fase analitica di **decomposizione** - è stato tracciato il solco dell'**attività di ricerca**.

Il **Capitolo 1**, quindi, introduce i concetti **generale** e **generico** di **sostenibilità** e **sviluppo sostenibile** per passare, procedendo per via **deduttiva**, alla sfumatura particolare e specifica di interesse per lo studio in commento: la **sostenibilità per e del settore edilizio**.

Nel **Capitolo 2**, poi, sono illustrate le **strategie** operativamente attuabili per il perseguimento degli obiettivi di **sostenibilità edilizia**. In particolare, stante le definizioni normative di organismo edilizio - trattate nel capitolo - il *focus* è posto sulla pratica di **riciclo dei materiali**, considerabili come parte elementare del sistema edificio ed in quanto tali particolarmente incisivi sulla sua sostenibilità.

Nel **Capitolo 3**, infine, nel merito dei **materiali**, si guarda ai componenti che per l'edilizia sono tra i responsabili degli **impatti** più negativi e significativi: gli **inerti**. Il loro utilizzo nelle malte e nei calcestruzzi, infatti, cagiona una domanda costante di risorse naturali - ad oggi non più sostenibile per l'ambiente - la cui **alternativa** può essere rappresentata dal ricorso ad **inerti riciclati** dei quali sono approfonditi alcuni aspetti nella sezione di chiusura del capitolo.

CAPITOLO 1

LA SOSTENIBILITÀ E LA SUA DECLINAZIONE EDILIZIA

Il capitolo ripercorre cronologicamente le tappe significative per la definizione del concetto attuale di sostenibilità e di sviluppo sostenibile, e per il delineamento degli atti tramite cui, in occasione dei diversi consessi, sono stati sanciti qualitativamente e quantitativamente gli obiettivi di sostenibilità.

L'*excursus*, nel paragrafo 1.1, con lo scopo di evidenziare l'evoluzione dell'approccio alla tematica, si sofferma sul contenuto dell'*Our common future* - rapporto prodotto nel 1987 dai lavori della Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo dell'ONU, presieduta da Gro Harlem Brundtland - ritenuto il caposaldo delle riflessioni ambientali e contenente la prima definizione strutturata di sviluppo sostenibile. Sono quindi ripercorsi i *summit* successivi alla pubblicazione del rapporto sino all'Assemblea delle Nazioni Unite tenutasi nel 2015 a Parigi, al termine della quale è stata stilata l'Agenda 2030. Per questo documento, sono evidenziati gli obiettivi che maggiormente afferiscono all'ambito delle costruzioni.

Una volta illustrate le linee di indirizzo tracciate a livello globale, il testo approfondisce nel paragrafo 1.2 le direttive emanate e le azioni programmatiche disposte dalle istituzioni europee coerentemente con i documenti sottoscritti negli appuntamenti mondiali.

In particolare, si guarda alle politiche inerenti al clima ed all'energia soffermandosi sugli aspetti più propriamente concernenti l'edilizia. Quest'ultima, infatti, pur essendo una frazione tra le molteplici concorrenti è particolarmente impattante sul perseguimento degli obiettivi di sostenibilità.

L'ultima parte - il paragrafo 1.3 - è dedicata, infine, alla specificazione delle definizioni e degli obiettivi relativi alla sostenibilità per l'ambito strettamente legato alle costruzioni civili.

1.1

SOSTENIBILITÀ E SVILUPPO SOSTENIBILE: DEFINIZIONE ED EVOLUZIONE DEI CONCETTI

Con il proposito di adoperare un approccio filologico al tema della sostenibilità si è partiti dall'etimologia latina della parola a cui corrisponde la seguente definizione:

sustīnēre, formato da *sus-*, variante di *sub-* cioè "sotto" e da *tīnēre* ossia "tenere": abilità di saper "prendersi cura"

Il vocabolo, dunque, rimanda ad un'azione - quella di prendersi cura - eseguita con abilità, supponendo cioè una consapevolezza dell'oggetto da proteggere. Ed in effetti è piuttosto esteso il percorso, non ancora concluso, resosi necessario affinché le istituzioni e le società scientifica e civile acquisissero e sviluppassero una coscienza sulle tematiche proprie della sostenibilità. Sebbene sviluppo sostenibile e sostenibilità siano adoperati come sinonimi e spesso intercambiati, diverse correnti di pensiero hanno evidenziato la contraddizione di fondo presente in tale accostamento, non essendo possibile ottenere uno sviluppo, inteso come crescita economica illimitata, su di un pianeta limitato [20].

La definizione moderna, come estratta dal dizionario italiano e nel seguito riportata, ricalca quasi totalmente quella formulata nel rapporto Brundtland e fa corrispondere alla sostenibilità (o sviluppo sostenibile, considerato in questo caso come sinonimo, appunto) la "[...] *condizione, nelle scienze economiche ed ambientali, di uno sviluppo in grado di assicurare il soddisfacimento dei bisogni della generazione presente senza compromettere la possibilità delle generazioni future di realizzare i propri [...]*". Trattasi di un'accezione di sintesi alla quale si è pervenuti attraverso le occasioni di incontro mondiali, e conseguenti riflessioni, svoltesi a partire dagli anni '70 del secolo scorso, inizialmente nutrita di sole istanze socioeconomiche, successivamente anche ambientali. Il rapporto Brundtland, in effetti, pur essendo considerato come documento apripista delle speculazioni e discussioni sullo sviluppo sostenibile, è stato a sua volta - come ogni parte di un processo complesso - il risultato di precedenti approfondimenti.

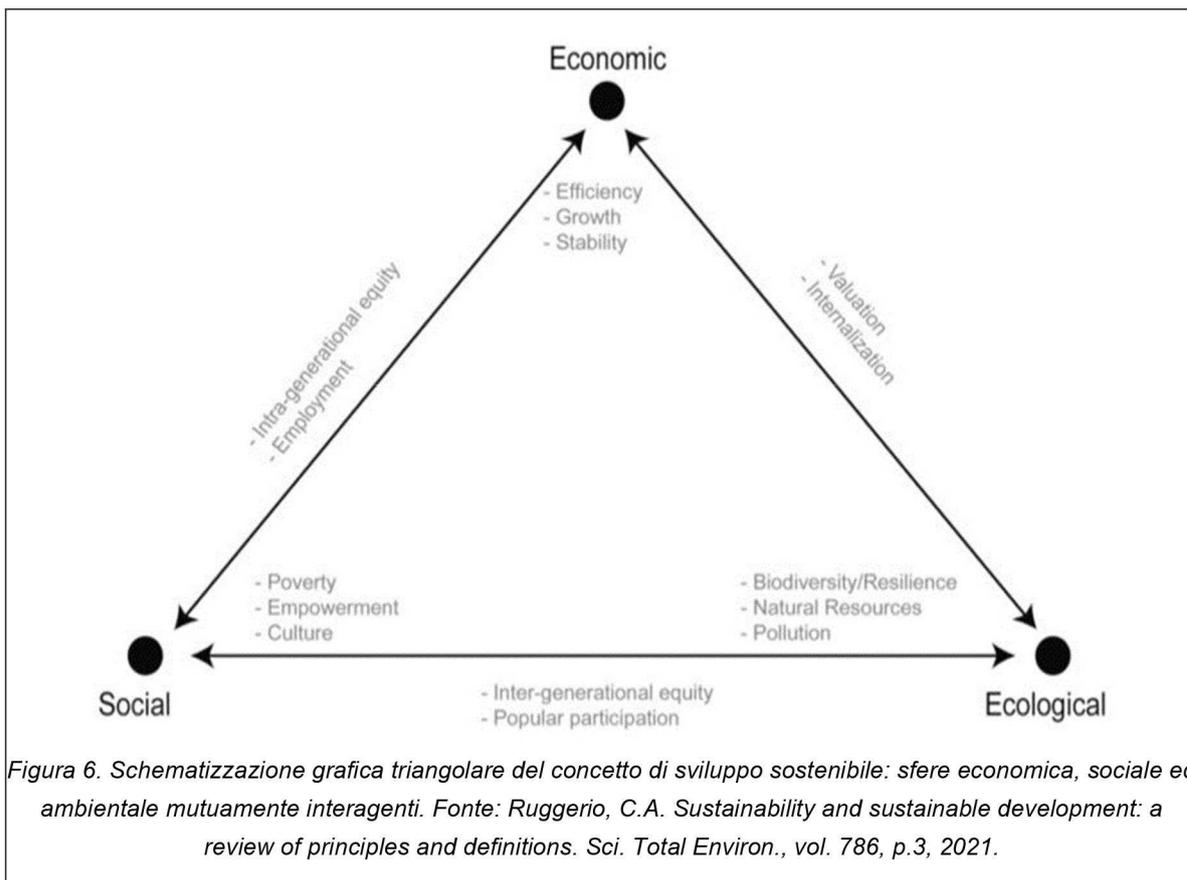
PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Procedendo per via cronologica, fu a Stoccolma, nel 1972, che per la prima volta l'ambiente divenne oggetto di un dibattito di levatura mondiale, in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sull'ambiente umano. Il modello di sviluppo e lo stile di vita occidentali entrarono in crisi [20] e furono evidenziati i limiti e le conseguenze negative - inquinamento ambientale di matrice industriale e distribuzione disomogenea della ricchezza, in particolare - di un approccio che utilizzava come unica guida la crescita economica [21]. I 26 principi della Dichiarazione di Stoccolma, unitamente alle 109 raccomandazioni del documento programmatico *Action plan*, riconoscevano tra i diritti dell'uomo quello di assicurazione di adeguate condizioni di vita e tra i doveri la gestione e la protezione delle risorse naturali la cui capacità limite, una volta superata, non avrebbe garantito all'uomo il soddisfacimento dei bisogni. Ampio spazio, inoltre, era dedicato all'analisi delle dinamiche di sviluppo economico e sociale. Si riteneva indispensabile una cooperazione tra paesi per garantire maggiore equilibrio nella distribuzione della ricchezza del mondo, anche in considerazione dello stretto legame esistente tra qualità dell'ambiente di un paese e sviluppo economico della sua popolazione. La visione del documento era antropocentrica: l'ambiente non si studiava in quanto tale, bensì perché *habitat* dell'uomo e spazio fisico nel quale le attività umane trovano svolgimento.

IL CAPOSALDO DELLO SVILUPPO SOSTENIBILE: IL RAPPORTO BRUNDTLAND. IL

Rapporto Brundtland, l'*Our common future*, pronunciato dall'omonimo Presidente della Commissione sviluppo e ambiente (*World Commission Development and Environment*) dell'Assemblea delle Nazioni Unite istituita nel 1983, assimilò le riflessioni maturate negli anni sul concetto di *eco-development* coniato dal Segretario Generale della Conferenza di Stoccolma, Maurice Strong. Il principio dell'*eco-development* auspicava ad una fase di decentralizzazione economica e politica, riconoscendo come effetti negativi della concentrazione, al contrario, la disparità sociale dicotomica "*have-have not*" e l'impovertimento ambientale localizzato [22]. Il concetto, pur essendo rimasto confinato ad una dimensione speculativa più che operativa, è stato senza dubbio precursore del legame sviluppo-ambiente naturale come poi teorizzato nell'*Our common future* [21]. La centralità della sfera economica e le contraddizioni rilevate - menzionate in precedenza - aprirono, infatti, ad un dibattito scientifico sulla necessaria distinzione tra crescita sostenibile e sviluppo sostenibile. La prima, di impronta prettamente economica, il secondo da concettualizzare in maniera multidimensionale, considerando cioè le dimensioni sociopolitica, economica ed ambientale nel complesso ed attribuendo loro equa

rilevanza nel raggiungimento di finalità comuni [23], come schematizzato nella Figura 6.



Il Brundtland sottolineava sin dalla prefazione che i lavori della commissione erano indirizzati alla messa a punto di una *global agenda for change* particolarmente concentrata sulle tematiche ambientali [1]. Si intendeva, difatti:

- pianificare strategie ambientali di lungo termine per raggiungere uno sviluppo sostenibile entro l'anno 2000;
- fare in modo che l'attenzione riservata all'ambiente potesse tradursi in una più grande cooperazione tra paesi in via di sviluppo e quelli più avanzati socialmente ed economicamente, così da perseguire obiettivi comuni che prendessero in considerazione le relazioni tra persone, risorse, ambiente e sviluppo;
- individuare modalità e mezzi attraverso cui la comunità internazionale potesse acquisire consapevolezza delle problematiche ambientali;
- stimolare la condivisione della percezione dei rischi ambientali di lungo termine e dei necessari sforzi richiesti per la protezione ed il miglioramento dell'ambiente. (traduzione personale)

Si ribadiva, inoltre, l'erroneità delle visioni precedenti nelle quali alla considerazione dell'ambiente come sfera separata dalla socialità era corrisposta la vacuità operativa nella "risoluzione di problemi solo ambientali" ed uno svuotamento

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

del significato stesso di ambiente. Altrettanto era accaduto per il concetto di sviluppo, spesso ridotto al mero proposito assistenzialista di indicare alle “nazioni povere come diventare più ricche”. Tuttavia “[...] *l’ambiente è dove viviamo e lo sviluppo è ciò che facciamo nel tentativo di migliorare il nostro destino in quella dimora [...]*” [1] e pertanto i due aspetti sono inseparabili.

I concetti espressi nei capitoli 7, 8 della parte II del rapporto Brundtland rubricata *Common Challenges*, dedicati alle questioni più propriamente tecniche dell’energia e dell’industria, appaiono particolarmente moderni. In un periodo storico successivo alla crisi petrolifera, infatti, la ricerca di fonti alternative a quelle fossili, soprattutto in ragione della presumibile crescente richiesta energetica da parte delle nazioni in via di sviluppo era avvertita come improrogabile. Le risorse ambientali, stante le proiezioni, non avrebbero in alcun modo potuto soddisfare detti bisogni. Inoltre, il riscaldamento globale e l’acidificazione erano già percepiti come rischi altamente probabili in caso di utilizzo esclusivo di fonti fossili. A tal proposito, il paragrafo *Fossil Fuels: The Continuing Dilemma* era interamente dedicato alla ricognizione dei dati sulla concentrazione di anidride carbonica nell’atmosfera - nell’anno di stesura del rapporto attorno alle 350 parti per milione - e alle stime sul relativo incremento, qualora non si fosse intervenuti in maniera appropriata, sino alla quantità di 560 parti per milione attesa per il 2030. I dati correnti, pur essendo più incoraggianti rispetto a quanto proiettato dal rapporto con un valore misurato di CO₂ all’anno 2021 di 420 ppm e stimato di 450 ppm per il 2030 [24], sono comunque ben lontani dai *target* auspicabili.

Le conseguenze dell’incontrollata crescita delle emissioni erano poi puntualmente elencate con un riferimento costante agli effetti sulla salute umana, oltre che sull’ambiente in senso strettamente ecologico. La riconosciuta compenetrazione tra le componenti naturalistiche ed antropiche, innovativa rispetto alle posizioni precedenti, sarà assorbita - come auspicato - anche nelle produzioni normative nazionali. Si pensi al DPCM 27 Dicembre 1988, *Norme tecniche per la redazione degli studi di impatto ambientale e la formulazione del giudizio di compatibilità*, promulgato in Italia negli anni successivi all’istituzione nel 1986 del Ministero dell’Ambiente, che all’Allegato I si riferiva all’ambiente come “[...] *componenti naturalistiche ed antropiche, le integrazioni tra queste ed il sistema ambientale preso nella sua globalità [...]*”. La salute pubblica, intesa come individui e comunità, era altresì annoverata tra i componenti ed i fattori ambientali sui quali valutare gli impatti causati dalle opere antropiche.

Sulla base delle motivazioni sinteticamente riportate, per il Brundtland la crescita economica doveva imperativamente essere meno energivora che in

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

passato, non soltanto attraverso l'ottimizzazione dei consumi finali ma anche di quelli intermedi legati alle infrastrutture di trasformazione e fornitura dell'energia stessa [1]. Non ultima, poi, la necessaria transizione a fonti diverse da quelle fossili, non solo alternative ma, più auspicabilmente, rinnovabili. L'edilizia, pur essendo annoverata tra le attività antropiche più incidenti in senso negativo sul consumo energetico accanto ai trasporti, all'industria ed all'agricoltura, nei punti dedicati alla *Energy Efficiency* - parte VI del capitolo 7 - era considerata come segmento per il quale gli obiettivi di efficienza energetica erano più facilmente assimilabili. Si ci riferiva, in particolare, alle fasi di utilizzo degli edifici destinati ad abitazione o a luogo di lavoro ed ai consumi per il loro riscaldamento e raffrescamento sui quali poter intervenire in fase di progettazione o di manutenzione con soluzioni tecnologiche passive (studio dell'esposizione, della ventilazione, stratigrafia delle pareti) oppure attive (cogenerazione, ricorso a fonti rinnovabili). In affiancamento agli aspetti tecnici e tecnologici, fondamentale era, tuttavia, l'educazione all'uso razionale dell'energia.

Tra i principi che concorrono a definire il rapporto Brundtland il caposaldo della politica sostenibile è compreso lo *slogan*, che accompagna il titolo del capitolo 8 dedicato all'industria, del *producing more with less*. Un imperativo che tiene conto degli impatti che l'industria ed i suoi prodotti hanno sull'ambiente in tutte le fasi del ciclo produttivo: ricerca e prelievo delle materie prime, trasformazione in prodotti, generazione di rifiuti e consumo di energia che accompagna ciascuna di queste operazioni. È innegabile che l'industria aggiunge valore e genera impatti positivi nel rispondere ai bisogni dei consumatori e dunque occorre produrre ma, al contempo, l'azione sull'ambiente può essere fortemente negativa ed è su questa che bisogna intervenire. Il problema dell'inquinamento di matrice industriale, in precedenza avvertito come localizzato e limitato ad alcuni dei comparti ambientali, negli anni della pubblicazione del rapporto fu esteso alla salute umana, complici alcuni tragici incidenti avvenuti presso siti industriali. Il riciclo dei prodotti di scarto dell'industria e/o dei rifiuti, più in generale, fu già allora ritenuto una delle più efficaci tra le strategie percorribili per ottimizzare i consumi di energia e materie prime.

A permeare ogni contenuto del rapporto Brundtland è sia il forte legame esistente tra la qualità della vita e lo sviluppo economico, sia la considerazione che mentre i paesi sottosviluppati erano caratterizzati da alti livelli di compromissione ambientale, il benessere socioeconomico si accompagnava ad elevati standard di qualità dell'ambiente. Il documento, quindi, oltre ad introdurre una locuzione e relativa definizione, divenute paradigmatiche per la letteratura scientifica e per gli atti prodotti a livello internazionale, aprì ad una stagione di riflessioni maggiormente concentrata sui temi dell'ambiente.

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

IL SUMMIT DELLA TERRA DEL 1992. Il *summit* della Terra tenutosi nel 1992 a Rio de Janeiro, ad esempio, trasse vita proprio dalla decisione dell'Assemblea Generale dell'ONU, nel 1989, di organizzare una Conferenza delle Nazioni Unite su Ambiente e Sviluppo che fosse di approfondimento degli spunti emersi dal Rapporto Brundtland. In questa occasione furono prodotti sia documenti a carattere teorico, di inquadramento scientifico-culturale del problema della sostenibilità, che attuativi. Nella prima categoria, in particolare, figurano la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (*United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC*) e la Dichiarazione di Rio sullo Sviluppo Sostenibile. Il primo atto programmatico, invece, è l'Agenda 21: un piano attuativo la cui sottoscrizione comportò, per gli stati aderenti, l'assunzione di impegni politici sui temi della sostenibilità. A dare impulso alla Convenzione Quadro fu l'Unione Europea che, sulla base di un rapporto prodotto dal Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*) istituito nel 1988, fissò obiettivi vincolanti sulle emissioni di anidride carbonica, imponendo agli stati membri di adottare misure preventive per il contenimento dei gas serra e dei fenomeni di inquinamento ad essi correlati. Il rapporto dell'*IPCC*, infatti, aveva ribadito la forte correlazione tra le emissioni antropogeniche di gas climalteranti ed il riscaldamento globale, per scongiurare il quale occorreva anzitutto ridurre i consumi di combustibili fossili. La Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici non ebbe, tuttavia, carattere legalmente vincolante per gli aderenti - come anticipato - e non fissò limiti alle emissioni, fermandosi, invece, a tracciare una direzione, nutrita di intenti comuni, verso la quale le politiche a livello globale dovevano indirizzarsi. Gli unici obblighi conseguenti all'adesione alla convenzione, citati all'articolo 4 della stessa e formali più che sostanziali, erano l'individuazione, l'attivazione ed il successivo aggiornamento - con la stilatura di rapporti contenenti le rilevazioni delle concentrazioni - delle misure finalizzate alla riduzione delle emissioni.

IL PROTOCOLLO DI KYOTO DEL 1997. Gli strumenti operativi ai quali la *UNFCCC* rimandava la fissazione delle soglie erano i protocolli, tra i quali il più significativo fu quello di Kyoto, ratificato nel 1997 in occasione della terza Conferenza delle Parti (*COP3*) della *UNFCCC* con più di 160 paesi firmatari, operativo effettivamente soltanto dal 2005. Il principio del protocollo era quello di agire considerando una “[...] comune ma differenziata responsabilità e rispettiva capacità [...]” classificando, cioè, i paesi in funzione dell'incidenza che avevano sulle emissioni, proporzionale al loro grado di industrializzazione. Per gli stati dell'Unione Europea, compresi nell'Allegato 1 del protocollo assieme ai paesi più industrializzati, il livello minimo di riduzione delle emissioni nel primo intervallo di impegno (2008-

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

2012) era del 5% rispetto ai valori registrati al 1990, considerato anno di riferimento. Detto obiettivo minimo era poi distintamente aumentato in funzione del livello di capacità tecnologica del paese: per l'Italia, ad esempio, fu fissato al 6,5%, superiore alla media dell'Allegato 1 ma inferiore a quella europea dell'8%. L'orientamento del protocollo era quello di revisione e nuova parametrizzazione degli obiettivi al termine dell'intervallo di azione, pertanto per la stagione 2013-2020 il livello medio di riduzione delle emissioni rispetto al 1990 per gli stati più avanzati è stato innalzato al 18%. Le nuove soglie sono state stabilite in occasione della Conferenza delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici tenutasi a Doha nel 2012 e contenute nell'emendamento di Doha che ha formalizzato l'impegno dei paesi firmatari - circa 150 - all'adozione delle misure più vincolanti del secondo periodo attraverso il loro recepimento nei rispettivi corpi normativi, come sarà dettagliato nel paragrafo 1.2 del presente testo.

GLI OBIETTIVI DI SVILUPPO SOSTENIBILE DELL'AGENDA 2030. Ad innestarsi sui propositi del protocollo di Kyoto è l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile definita come *programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità*. Trattasi di un documento a carattere programmatico i cui contenuti sono stati approvati in occasione dell'Assemblea Generale delle Nazioni Unite tenutasi a Parigi nel 2015 recante la firma di 193 paesi. L'Agenda ha fissato 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (*goals*) per ognuno dei quali sono individuati degli specifici traguardi (*targets*) per un complessivo di 169. Gli ambiti d'azione, come mostrato nella Figura 7 che raffigura i 17 obiettivi, sono ascrivibili essenzialmente alle categorie ambientale, economico, sociale ed istituzionale, riconosciuti come domini interagenti o dimensioni dello sviluppo sostenibile.



PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Come riportato da alcuni autori, nonostante i tentativi di rendere progressivamente più operativi gli atti siglati nelle occasioni di incontro mondiale, la difficoltà maggiore è stata - a monte - quella di definizione del concetto stesso di sviluppo sostenibile, spesso permeato di ideologia e talvolta radicalizzato, motivo per il quale si è tentato, almeno accademicamente, di spostare il problema sulla concettualizzazione della sostenibilità [20]. Le strategie di azione, infatti, sono sempre state pianificate in funzione di uno o più obiettivi, a loro volta rispondenti alla definizione di sostenibilità o sviluppo sostenibile. Alla variazione del significato attribuito ai due termini, dunque, è corrisposta un'oscillazione delle parti a loro connesse.

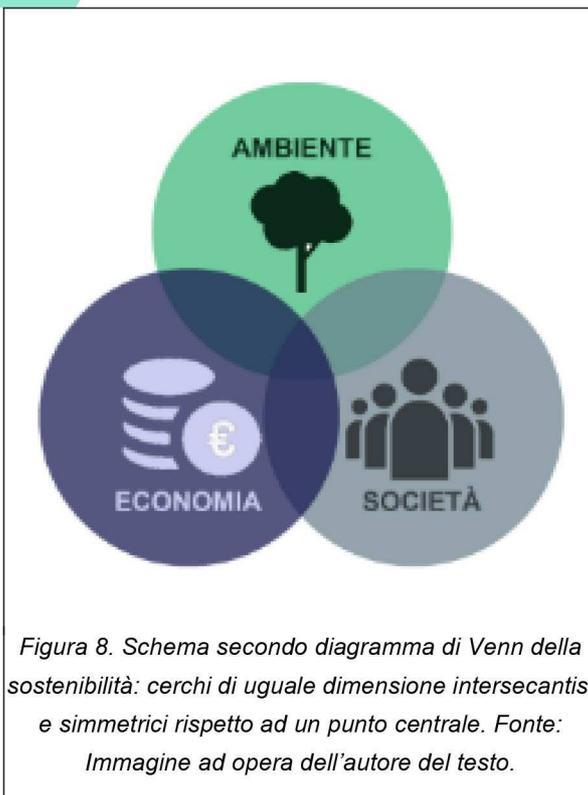
In letteratura, rilevata la contraddizione intrinseca nella locuzione “sviluppo sostenibile”, la sostenibilità è stata approcciata mutuando alcuni concetti della teoria degli ecosistemi [25]. A caratterizzare i sistemi socio-ecologici (*socio-ecological systems* - *SESs*), così definiti considerando le componenti antropiche e non, sono la resilienza, l'adattabilità e la trasformabilità [26]. I sistemi, infatti, spaziano entro una serie di domini, ciascuno con un diverso grado di “pericolosità”, e lo spostamento è dettato sia dalla dinamica interna al sistema, verso domini detti *attractors*, in quanto punti verso cui naturalmente il sistema evolverebbe, che dalle perturbazioni esterne. La resilienza, dunque, è proprio la capacità del sistema di azzerare oppure assorbire le perturbazioni esterne in modo da mantenere inalterate le sue struttura e funzioni [26].

La trasposizione di questo concetto sul piano dei sistemi socio-ecologici (*SESs*), ossia la considerazione della società come sistema “bersaglio” ed i cambiamenti ambientali come perturbazioni esterne, è alla base dei filoni di letteratura che leggono la sostenibilità come la resilienza dei *SESs* [20]. In tal senso, non è possibile eliminare i cambiamenti - i sistemi viventi sono aperti per definizione - ma bisogna agire perché non siano azzerate le risorse di rinnovamento che rendono possibile al sistema l'evoluzione e dunque la risposta alle perturbazioni. Gallopìn [27], tra gli autori allineati alle posizioni appena esposte, ha definito la sostenibilità a partire dalla schematizzazione dei flussi di energia e materia scambiati dai sistemi aperti con l'ambiente esterno come variabili di *input* (*I*) e *output* (*O*). Le variabili interne, quelle di *input*, determinano lo stato istantaneo di un sistema ad un tempo *t*, preceduto dallo stato ad un tempo *t-1*. Se si introduce una funzione *V* di valutazione dell'*output* del sistema, questo si dirà sostenibile se il prodotto netto, come definito all'Eq.1, è positivo e pressoché costante nel tempo:

$$V(O_{t+1}) \geq V(O_t) \quad (\text{Eq.1})$$

L'equazione, al di là delle difficoltà applicative segnalate dall'autore stesso per l'aleatorietà nella scelta di V e di O , ha una validità concettuale perché non riduce la sostenibilità ad una dimensione statica di "mantenimento" di una stessa condizione [20], bensì ne sottolinea il dinamismo. Il vincolo unico è che, al netto dei cambiamenti, il sistema viri in una condizione "superiore" rispetto a quella precedente (differenza tra le funzioni *output* positiva) ed in maniera graduale (differenza costante nel tempo). La definizione, in ogni caso, è generale e generica e non le sono attribuite sfumature sociali, politiche o ambientali.

IL MODELLO DI VENN PER LA SOSTENIBILITÀ. Pur nell'essere concordi nell'attribuire alla sostenibilità un significato positivo ed associarle l'idea di una condizione desiderabile, la pluralità di visioni e di paradigmi ad essa connessi è stata un ostacolo importante nell'individuazione degli obiettivi di sostenibilità, per l'appunto, e delle misure tese a soddisfarli [28]. Da qui la necessità, secondo alcuni autori, di aprire al concetto di sostenibilità multiple con le relative interpretazioni [29]. Tradizionalmente la sostenibilità, come anche lo sviluppo sostenibile, è stata definita a partire da un sistema costituito da tre insiemi - economia, società ed ambiente - mutuamente interagenti. L'importanza attribuita a ciascuno dei termini - sulla quale è difficile si raggiunga l'unanimità - ha spesso innescato dinamiche tensionali tra i gruppi sostenitori di posizioni diverse, soprattutto a livello politico ed istituzionale [28]. Esistono, difatti, versioni antropocentriche della sostenibilità, più orientate a prioritizzare gli aspetti economici e sociali, e versioni "natura-centriche" di stampo più propriamente ambientalista ed ecologista. La traduzione visiva più efficace della definizione tradizionale della sostenibilità è quella mediante un diagramma di Venn costituito da tre insiemi circolari, economia (E), società (S) ed ambiente (A), intersecantisi. Le dimensioni di ogni cerchio e delle mutue sovrapposizioni esprimono l'importanza riconosciuta ai diversi aspetti concorrenti. Generalmente, gli insiemi sono disegnati con uno stesso raggio e simmetrici rispetto ad un punto centrale così da rappresentare nell'area comune - intersezione di ambiente, economia e società - ciò che la sostenibilità vuole significare [30]. In Figura 8 è riportato un adattamento dello schema ad opera dell'autore del presente testo: le sovrapposizioni parziali (tra coppie di dimensioni) conformano gli spazi dell'equità (E+S), della vivibilità (S+A) e della realizzabilità (E+A).



Di questo modello, tuttavia, sono state evidenziate alcune limitazioni. *In primis* sembra equiparare i capitali umano ed ambientale conferendo, in allineamento alla cosiddetta *sostenibilità debole*, alla natura soltanto il ruolo di fornitore delle risorse necessarie ai sistemi economici (*inputs*) e di recettore di rifiuti (*outputs*) - o esternalità - seguendo, in un ipotetico sistema chiuso, meccanismi ciclici indefinitamente ripetibili. Secondo questa visione il soggetto della sostenibilità è il sistema economico e il suo obiettivo è la crescita economica, spesso equiparata all'idea di sviluppo sostenibile [31].

IL MODELLO MATEMATICO DI SOSTENIBILITÀ DEBOLE. Le teorie a supporto della centralità dell'aspetto economico hanno approfondito anche le possibilità di monetizzazione del capitale naturale, attribuendogli un valore monetario ed aprendo al suo commercio e, soprattutto, all'internalizzazione delle esternalità [20]. La traduzione matematica del concetto di *sostenibilità debole* è mostrata nell'Eq.2, messa a punto da Pearce e Atkinson [32]. Detta K la funzione che misura il capitale totale, la condizione è sostenibile se K è strettamente crescente nel tempo (t), ossia se la sua derivata prima è sempre positiva. K è inoltre somma di tre componenti, K_A , K_H e K_N , rispettivamente capitali artificiale, umano e naturale.

$$\frac{dK}{dt} = \frac{d(K_A + K_H + K_N)}{dt} \geq 0 \quad (\text{Eq.2})$$

Il capitale naturale comprende sia le materie prime in senso stretto (es. acqua, minerali) sia i loro punti di approvvigionamento (es. foreste, bacini acquiferi, cave), nonché i meccanismi naturali di autoconservazione (es. sequestro di anidride carbonica, controllo dell'erosione). Il capitale umano, o culturale, si riferisce invece al progresso tecnologico e quello artificiale, infine, ai prodotti ottenuti per trasformazione delle materie prime [20]. Pearce e Atkinson considerano la natura soltanto in relazione alla finalità economica, come capitale, appunto: tutto ciò che non entra nel flusso di trasformazione come risorsa ed esce come rifiuto non è compreso nell'equazione. Dall'approccio della *sostenibilità debole* sono gemmati i

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

moderni concetti dell'*economia circolare* e della *green economy*, entrambi basati sulla possibilità di arginare le problematiche ambientali attraverso il progresso tecnologico [20], e sulla ciclicità dei processi produttivi mediante il reinserimento delle esternalità.

La seconda critica mossa allo schema circolare di Venn è la ridotta leggibilità delle interazioni tra le parti ed il sistema nel complesso [21] e la percezione che le porzioni degli insiemi non comprese nelle intersezioni siano avulse dal concetto di sostenibilità [30]. Il diagramma, infatti, tende a compartimentare i tre settori e, mentre le prospettive economica ed ambientale sono più facilmente assorbite, si considerino le istanze della *sostenibilità debole* o le posizioni ecologiste, ed è più immediata l'individuazione delle strategie ad esse rispondenti, le problematiche di carattere sociale sono spesso trascurate [30]. Tenendo in conto i quattro parametri influenti sul significato di sostenibilità - scala, processo di cambiamento, spazio e tempo [33] - al modello circolare di Venn è imputata l'inadeguata lettura della scala e del tempo. Non è cioè precisato il livello istituzionale di applicabilità dello schema (locale, regionale, nazionale) e l'orizzonte temporale di riferimento: i due aspetti sono centrali poiché la predominanza di un settore, da cui scaturiscono obiettivi ed azioni, può variare a seconda del contesto organizzativo e dell'intervallo di tempo. La salute degli ecosistemi, ad esempio, ha più senso sia valutata su di un contesto più ampio, come quello regionale, mentre il benessere sociale anche su di un livello locale [28].

IL MODELLO A QUATTRO DIMENSIONI DELLA SOSTENIBILITÀ. In ragione delle limitazioni appena esposte, a questa visione tripartita sono state affiancate altre rappresentazioni. Alcuni autori, ad esempio, hanno suggerito l'aggiunta di una quarta dimensione - quella istituzionale - con l'intento di ribadire, in allineamento ai contenuti del Rapporto Brundtland, che è proprio alla struttura governativa, responsabile della difesa del pubblico interesse, che competono decisioni in materia economica ed ambientale [30]. Secondo questa visione la sostenibilità è meglio rappresentata da un triangolo ai cui vertici figurano le dimensioni ambientale, economica e sociale ed al centro quella istituzionale, come riportato nella Figura 9. La dimensione istituzionale richiama anche il concetto di contesto organizzativo, summenzionato in proposito dei quattro parametri di classificazione della sostenibilità.

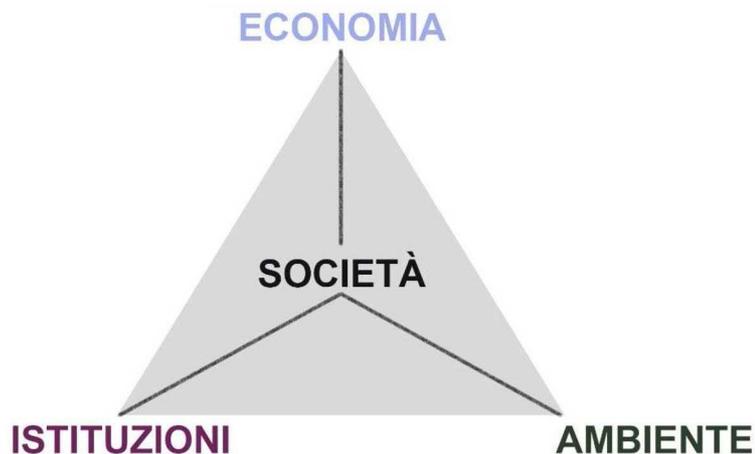


Figura 9. Schema quadripartito della sostenibilità: centralità della società alla quale si uniscono istituzioni, ambiente ed economia. Fonte: Immagine ad opera dell'autore del testo.

IL MODELLO GERARCHICO DELLA SOSTENIBILITÀ. Un'ultima lettura, tra le reinterpretazioni del classico diagramma di Venn, è quella offerta da Giddings, Hopwood e O'Brien [34] che sono partiti da due considerazioni. *In primis*, gli autori hanno rilevato che il motore di tutte le attività economiche è di natura sociale: sono le interazioni tra gruppi di persone a dettare gli scambi e le trasformazioni delle materie prime, oltre che ad innescare gli avanzamenti tecnologici [30]. *In secundis*, non esiste alcuna attività antropica che non impatta sull'ambiente, essendo questo il luogo fisico in cui le azioni trovano svolgimento. Pertanto, alla rappresentazione della sostenibilità mediante l'intersezione di tre cerchi di dimensioni equivalenti, Giddings, Hopwood e O'Brien hanno sostituito una struttura gerarchica a cerchi concentrici nella quale l'economia è un sottoinsieme della società, a sua volta contenuta nell'ambiente, come schematizzato in Figura 10.

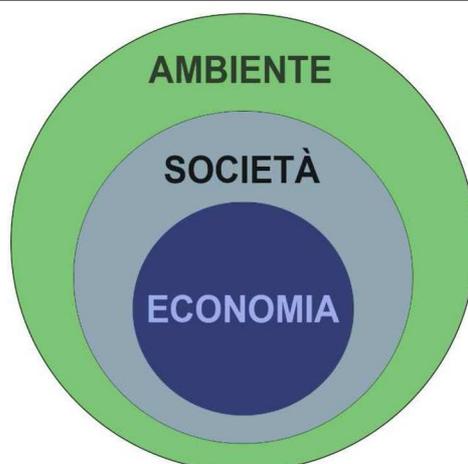
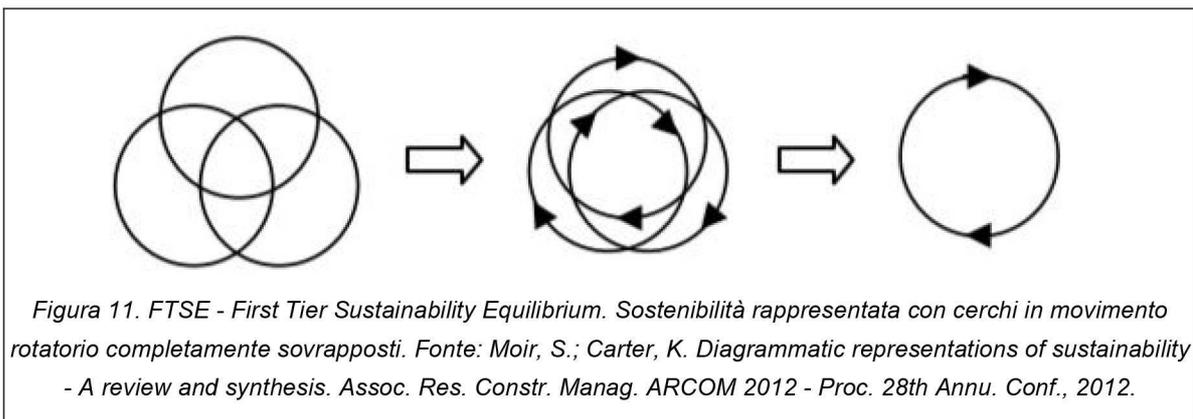


Figura 10. Schema gerarchico della sostenibilità a cerchi concentrici. L'economia è considerata sottoinsieme della società, a sua volta contenuta nell'ambiente. Fonte: Immagine ad opera dell'autore del testo.

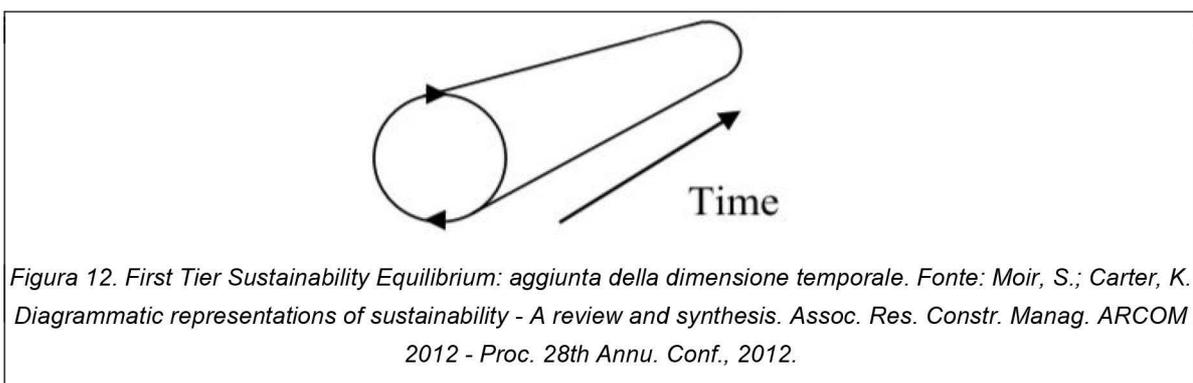
PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Il modello gerarchico può intendersi come un tentativo di ridimensionare la dominanza degli aspetti economici nell'approccio alla sostenibilità, allontanandosi così dalla *sostenibilità debole* ed orientandosi verso una sensibilità maggiore per l'ambiente. Trattasi, in ogni caso, di uno schema che compartimenta gli ambiti e pertanto si caratterizza per i limiti citati in precedenza in proposito degli altri modelli. In particolare, come osservato da Lozano [35], mancano i riferimenti ai parametri spazio e tempo e non c'è alcuna menzione alla dimensione istituzionale. L'autore, dunque, ha proposto un modello di sintesi tridimensionale a cui si giunge attraverso un processo articolato in due fasi [30].

I MODELLI FTSE E TTSE PER LA SOSTENIBILITÀ. La segmentazione degli schemi bidimensionali di Venn o dei cerchi concentrici deve evolvere verso un primo punto di equilibrio, definito *FTSE (First Tier Sustainability Equilibrium)*, caratterizzato dalla totale integrazione spaziale di società, ambiente, economia ed istituzioni e rappresentato mediante cerchi in continuo movimento rotatorio, completamente sovrapposti (Figura 11).

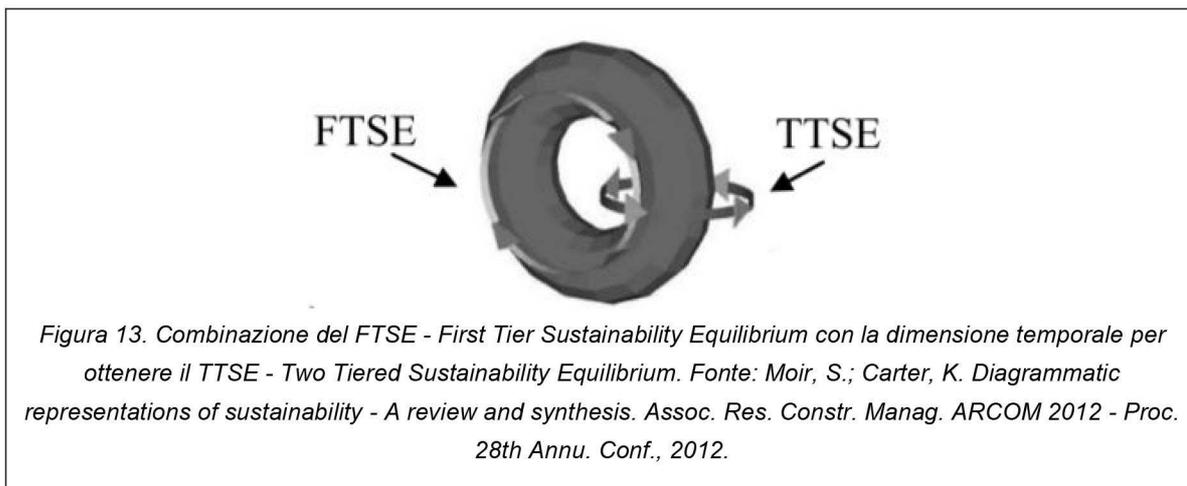


Conclusasi la prima fase, occorre valutare il fattore tempo e, quindi, la sostenibilità intergenerazionale. I cerchi sovrapposti sono estrusi lungo la direzione temporale, divenendo un cilindro, fino al raggiungimento di un punto di equilibrio (Figura 12).



PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

L'integrazione spazio-temporale è l'obiettivo della seconda fase del processo e si raggiunge combinando il *FTSE* con l'estrusione nel tempo pervenendo al *TTSE* (*Two Tiered Sustainability Equilibrium*) la cui traduzione grafica è un toro [30]. Il solido è particolarmente efficace nello schematizzare il dinamismo che dovrebbe accompagnare i processi orientati alla sostenibilità: i cerchi di equilibrio spaziale sono sovrapposti ed in movimento nel loro piano, quelli di equilibrio temporale, altresì in movimento, compiono idealmente rivoluzione lungo i primi disegnando il toro (Figura 13).



Si è giunti quindi alle sfumature di sostenibilità intragenerazionale (equilibrio spaziale) ed intergenerazionale (equilibrio temporale) che, parallelamente al percorso dissertativo della letteratura di settore, si è tentato progressivamente di assorbire sul piano istituzionale/operativo, come ravvisabile negli obiettivi dell'Agenda 2030.

Il testo prosegue analizzando le politiche e la produzione normativa che a livello europeo - e poi nazionale - sono state disposte per il recepimento dei contenuti cogenti ed il perseguimento degli obiettivi imposti.

1.2 GLI OBIETTIVI DI SOSTENIBILITÀ ED ECONOMIA CIRCOLARE NEL PANORAMA EUROPEO E NAZIONALE

Come sinteticamente illustrato al paragrafo 1.1, è a partire dagli anni '70 del ventesimo secolo che nelle sedi internazionali si è iniziato a dibattere sulle questioni inerenti allo sviluppo sostenibile ed alla sostenibilità, promuovendo negli stati aderenti processi di adeguamento agli obiettivi fissati. A livello europeo, il concetto di sviluppo sostenibile fa comparsa nel Trattato di Maastricht del 1992 (TUE - Trattato sull'Unione Europea), anno di formalizzazione dell'Unione Europea, ed è pienamente allineato alla visione tridimensionale dello sviluppo sostenibile ereditato dal Rapporto Brundtland. Il testo, al comma 3 dell'articolo 3, recita:

- “[...] *L'Unione instaura un mercato interno. Si adopera per lo sviluppo sostenibile dell'Europa, basato su una crescita economica equilibrata e sulla stabilità dei prezzi, su un'economia sociale di mercato fortemente competitiva, che mira alla piena occupazione e al progresso sociale, e su un elevato livello di tutela e di miglioramento della qualità dell'ambiente.*
- *Essa promuove il progresso scientifico e tecnologico.*
- *L'Unione combatte l'esclusione sociale e le discriminazioni e promuove la giustizia e la protezione sociali, la parità tra donne e uomini, la solidarietà tra le generazioni e la tutela dei diritti del minore.*
- *Essa promuove la coesione economica, sociale e territoriale, e la solidarietà tra gli Stati membri.*
- *Essa rispetta la ricchezza della sua diversità culturale e linguistica e vigila sulla salvaguardia e sullo sviluppo del patrimonio culturale europeo. [...]”*

IL TRATTATO DI AMSTERDAM. Gli stessi concetti sono ripresi e rafforzati nel Trattato di Amsterdam del 1997 con una modifica nella terminologia relativa alla dimensione economica. In luogo della *crescita economica equilibrata* si parla di *sviluppo sostenibile, armonioso ed equilibrato delle attività economiche*, a ridurre la dominanza dell'aspetto economico su quello sociale ed ambientale. I Trattati, in ogni caso, costituiscono soltanto la base giuridica per il riconoscimento delle istanze sostenibili tra i valori fondanti e le finalità dell'Unione Europea, senza dare definizioni puntuali ed introdurre vincoli ed obblighi, demandati invece alla legislazione secondaria. Nel Trattato sul Funzionamento dell'Unione Europea, infine, come modificato dal Trattato di Lisbona nel 2007, all'articolo 11 è specificamente citata la necessaria integrazione tra le politiche e le azioni dell'Unione Europea e la tutela dell'ambiente “[...] *in particolare nella prospettiva di promuovere lo sviluppo sostenibile [...]”*.

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Decisione 2002/358/CE del Consiglio. Già nel Consiglio Europeo di Helsinki, tenutosi nel dicembre 1999, i punti 46 a 50 della parte III, rubricata *Economia concorrenziale, sostenibile e generatrice di occupazione*, erano dedicati all'ambiente ed allo sviluppo sostenibile e si invitava la Commissione Europea ad “[...] elaborare una proposta di strategia a lungo termine per il coordinamento delle politiche ai fini di uno sviluppo sostenibile sotto il profilo economico, sociale ed ecologico, destinata ad essere presentata al Consiglio europeo nel giugno 2001. Tale strategia costituirà altresì il contributo della Comunità al riesame decennale del processo di Rio, previsto nel 2002. [...]”.

IL PROGRAMMA EUROPEO SUL CAMBIAMENTO CLIMATICO. Al Consiglio è seguita la ratifica del Programma Europeo sul Cambiamento Climatico (*ECCP - European Climate Change Program*) contenente quaranta azioni individuate dalla Commissione Europea per ottemperare agli obblighi sulla riduzione delle emissioni di gas serra derivanti dal Protocollo di Kyoto per il primo periodo di impegno (2008-2012), ritenute fattibili ed economicamente sostenibili. In particolare, le misure fissavano requisiti di efficienza energetica per le apparecchiature di uso finale, meccanismi premiali per la promozione della virtuosità energetica negli appalti pubblici, incentivi alla mobilità sostenibile.

IL PACCHETTO CLIMA ED ENERGIA. Tuttavia, i *report* elaborati nei primi anni 2000 per il monitoraggio degli avanzamenti del processo di transizione all'economia sostenibile evidenziarono la necessità di implementare ulteriori misure, più incisive ed efficaci, poiché almeno per il consumo energetico si era ancora ben lontani dagli obiettivi fissati. L'Unione Europea, quindi, ha predisposto nel 2009 un piano omnicomprensivo, noto come Pacchetto Clima-Energia o Strategia 20-20-20, contenuto nella Direttiva 2009/29/CE e valido nel periodo 2013-2020, a seguire la scadenza del primo intervallo di impegno del Protocollo di Kyoto. L'ambizioso pacchetto ha fissato il raggiungimento di tre obiettivi entro il 2020:

- ridurre le emissioni di gas serra del 20%
- ridurre i consumi energetici del 20%
- coprire almeno il 20% del fabbisogno energetico europeo per usi finali (elettricità, riscaldamento e raffrescamento, trasporti) con le energie rinnovabili

I *delta* sono calcolati rispetto all'anno base, il 1990, e monitorati mediante la compilazione di resoconti annuali. In allineamento ai precedenti approcci anche per la Strategia 20-20-20 i *target* sono differenziati in ragione del diverso grado di avanzamento dei singoli paesi. L'emanazione della Direttiva introduttiva del piano 20-20-20 è stata preceduta da una serie di documenti ed iniziative preparatori tra i

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

quali, in particolare, la Direttiva 2006/32/CE sull'efficienza degli usi finali dell'energia e dei servizi energetici e la Direttiva 2008/98/CE in materia di trattamento dei rifiuti.

L'EMISSION TRADING SYSTEM. La Direttiva 2009/29/CE oltre a formalizzare il Pacchetto Clima ed Energia ha anche apportato modifiche alla Direttiva 2003/87/CE, in particolare per quanto attiene allo schema del sistema di scambio di quote di emissioni di gas serra (*Emissions Trading System-ETS*), misura confermata anche nel piano 20-20-20 con un inasprimento delle soglie per i settori più impattanti. Questo meccanismo, in vigore dal 2005, è attualmente operativo in 31 paesi ed ha attraversato una serie di fasi dalla sua introduzione. Nel 2021 è iniziata la quarta fase che troverà conclusione nel 2030. La Figura 14 riporta sinteticamente le differenze tra le diverse fasi dell'*ETS*. L'*ETS* prevede che sia fissata la soglia annuale massima di emissioni di gas serra per ogni impianto facente parte del sistema. La moneta di scambio è rappresentata dalla quota di emissione che dà diritto al titolare di emettere una tonnellata di anidride carbonica o di gas serra equivalente. Annualmente, poi, le imprese sono tenute a cedere una quota per ogni tonnellata di emissione effettiva - una sorta di tassa sulle emissioni - e laddove il loro *plafond* sia insufficiente possono acquistare quote all'asta o da altri operatori. Secondo questo meccanismo le imprese meno virtuose hanno possibilità di rispettare comunque le soglie e non incorrere in pesanti sanzioni, mentre quelle virtuose beneficiano economicamente dallo scambio ed accumulano quote per l'anno seguente.

Fase I e II (2005 – 2012)	Fase III (2013-2020)	Fase IV (2021-2030)
Limiti nazionali alle emissioni	Unico limite alle emissioni per tutta l'UE	Unico limite europeo alle emissioni decrescente del 2.2% annuo
Periodi di trading di 3 e 5 anni	Periodo di trading di 8 anni	Periodi di trading di 10 anni con due periodi di allocazione (2021-2025 e 2026-2030)
Allocazioni a titolo gratuito basate sulle emissioni a livello di impianto	Allocazioni a titolo gratuito basate su <i>benchmark</i> prestabiliti a livello europeo e produzione storica	Allocazioni a titolo gratuito basate su <i>benchmark</i> aggiornati a livello europeo per tener conto dei progressi tecnologici e degli ultimi anni di produzione (2014-2018) e 2019-2023 per il secondo periodo di assegnazione
Allocazioni a titolo gratuito per i produttori di energia elettrica	Nessuna allocazione a titolo gratuito per i produttori di energia elettrica (ad eccezione dei così chiamati "derogati")	Nessuna allocazione a titolo gratuito per i produttori di energia elettrica (ad eccezione degli Stati Membri in cui è necessaria la modernizzazione del settore elettrico)
Nessuna variazione al quantitativo da allocare a titolo gratuito a seguito di calo nella produzione	Variazione del quantitativo da allocare a titolo gratuito a seguito di calo di oltre il 50% nella produzione	Variazioni più dinamiche delle allocazioni a titolo gratuito basate su calo di produzione di $\pm 15\%$

Figura 14. Il sistema di scambio delle quote di emissioni di gas serra dell'Unione Europea: le fasi. Fonte: www.isprambiente.gov.it, consultazione: 2021.

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Il sistema si applica ai settori della produzione di energia elettrica, a quelli industriali di grandi dimensioni particolarmente energivori quali raffinerie, acciaierie, impianti produttori di ferro, metalli, cemento, calce, vetro, carta, cartone e prodotti chimici e all'aviazione civile. Secondo le valutazioni comunitarie si tratta dei comparti più emissivi di anidride carbonica, ossido di azoto e perfluorocarburi.

Tuttavia, restano esclusi, quasi contraddittoriamente, i settori della piccola e media industria, dei trasporti, dei rifiuti, dell'agricoltura e dell'edilizia. Basti pensare che a livello europeo l'edilizia assorbe il 29% del consumo finale di energia e che il 42% dell'energia elettrica consumata è spesa per il condizionamento degli edifici³. Per riparare a questa lacuna operativa con la Decisione 2009/406/CE l'Unione Europea ha assegnato agli stati membri degli obiettivi di riduzione delle emissioni per i settori esclusi dall'*ETS*. Per l'Italia è stato fissato, entro il 2020, un *delta* rispetto al 2005 del 13%.

IL QUADRO CLIMA ED ENERGIA. Nel 2014 Il Pacchetto Clima ed Energia è stato affiancato dal Quadro Clima ed Energia che ha fissato nuovi obiettivi per il 2030, incrementando in valore assoluto le percentuali del precedente documento. Il quadro non è un atto sostitutivo ma cumulativo: dal 2021 al 2030, considerato che al 2020 i tre obiettivi prima elencati dovranno essere soddisfatti, il traguardo minimo da raggiungere per gli Stati membri è stato innalzato nel seguente modo (al solito confrontato con l'anno di riferimento, il 1990):

- incremento del 32% della copertura da fonti rinnovabili per la produzione di energia destinata a consumi finali (fino al 2018 la soglia era del 27%)
- riduzione del 40% delle emissioni di gas climalteranti (*Green Houses Gases - GHG*)
- incremento del 32,5% dell'efficienza energetica del parco edilizio esistente.

IL GREEN DEAL. Nel 2019, infine, la neoeletta Presidente della Commissione Europea Ursula Gertrud von der Leyen ha ricompreso tra i cardini dell'azione politica contenuta nella sua agenda il *Green Deal*. Un piano di illustrazione delle criticità concernenti l'ambiente, i propositi e le strategie orientate al perseguimento della decarbonizzazione dell'Europa. Al 2050, infatti, si intende giungere alla condizione di *Carbon-neutral Europe* ossia di emissioni nette di gas serra pari a zero. Nella Figura 15 sono illustrati i pilastri del *Green Deal*.

³ www.ec.europa.eu, 2020

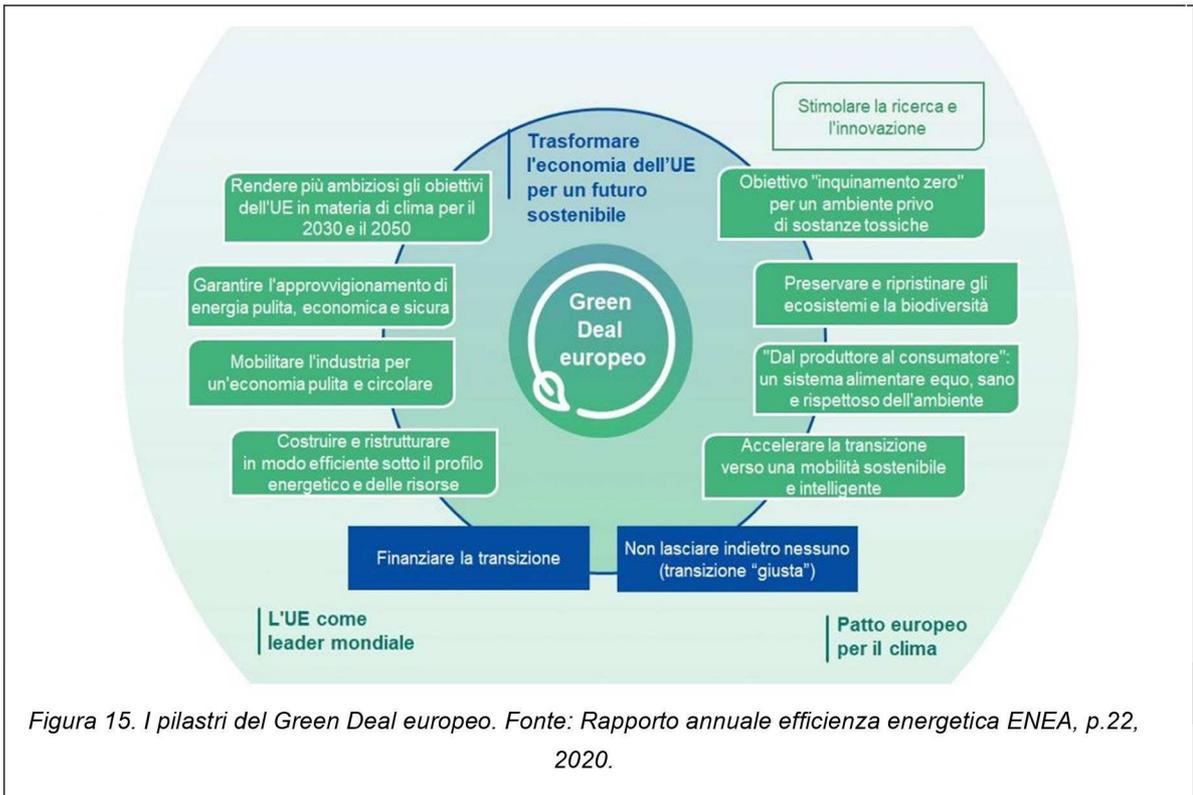


Figura 15. I pilastri del Green Deal europeo. Fonte: Rapporto annuale efficienza energetica ENEA, p.22, 2020.

1.3 LA SOSTENIBILITÀ IN EDILIZIA

Nonostante le espressioni *edificio sostenibile* ed *edilizia sostenibile* siano sempre più frequentemente adoperate, non è stata formulata una definizione puntuale e condivisa dei due concetti [36]. In letteratura, ad esempio, il tema degli edifici sostenibili è stato dibattuto ma senza convergere verso un'unica interpretazione [37].

La sostenibilità degli edifici è però rilevante ai fini del raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile e sostenibilità, atteso il peso che il comparto delle costruzioni ha a livello economico, sociale ed ambientale. Come citato al paragrafo precedente, a livello europeo ed in allineamento al *trend* dei paesi più industrializzati il settore edilizio è responsabile del 30% del consumo di energia e del 40% circa delle emissioni di gas serra totali⁴.

Negli ultimi anni sono stati introdotti metodi e strumenti tesi a qualificare e quantificare la sostenibilità degli edifici, spesso però limitandone l'estensione alla sola dimensione ambientale. L'edificio, cioè, è generalmente considerato sostenibile se costruito in maniera tale da ridurre il proprio impatto ambientale. Per impatto ambientale ci si riferisce propriamente alla variazione dello stato di qualità dei componenti ambientali per effetto di opere antropiche. Secondo alcuni autori questa interpretazione è limitativa poiché opera una valutazione in funzione del solo criterio ambientale [38]- trascurando gli altri due aspetti mediamente concorrenti alla sostenibilità - e riduce l'edificio a solo consumatore di risorse [39].

LA PRIMA DEFINIZIONE DI EDILIZIA SOSTENIBILE: KIBERT. Tra le teorizzazioni più condivise in ambito di sostenibilità delle costruzioni, nonché la prima nella quale l'aggettivo sostenibile è stato accostato al mondo edilizio [40], figura quella di Kibert pronunciata nel 1994 in occasione della sessione finale della Prima Conferenza Internazionale sull'Edilizia Sostenibile, tenutasi in Florida. Kibert definì la sostenibilità edilizia come “[...] *la creazione e la gestione responsabile di un salubre ambiente costruito basato su principi ecologici ed efficienza nell'uso delle risorse [...]*” e confrontò i criteri dell'edilizia tradizionale con quelli dell'edilizia sostenibile. Tra questi ultimi, in aggiunta ai principi di minimizzazione del consumo di risorse e di prevenzione del degrado ambientale, ricomprese anche la salubrità dell'ambiente da intendersi in senso ampio, sia come modalità operativa tesa ad assicurare una buona qualità degli ambienti interni, sia come eliminazione delle sostanze tossiche

⁴ www.ec.europa.eu, 2020

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

dall'ambiente esterno agli edifici (pesticidi, fungicidi, fertilizzanti) [41]. L'edilizia tradizionale, invece, secondo Kibert seguiva logiche imprenditoriali per le quali le prestazioni e la qualità degli edifici erano commisurate al costo che l'operatore economico intendeva sostenere nella realizzazione dei manufatti, dando priorità, dunque, agli aspetti di carattere strettamente finanziario.

La volontà di Kibert era quella di fornire all'industria delle costruzioni degli strumenti che fossero utili, *a posteriori*, per valutare la sostenibilità dei prodotti edilizi e, *a priori*, per progettargli. Per questa seconda opzione l'intento era fornire un ventaglio di approcci e soluzioni efficaci per lo scopo. Ciò equivaleva a dettagliare i criteri generali della sostenibilità edilizia, individuando parametri via via più specifici ed i relativi indicatori.

La Figura 16 riporta - ad esempio - gli aspetti da considerare secondo l'autore nel merito delle risorse, della salubrità dell'ambiente, della progettazione e degli effetti ambientali.

Resources	<ul style="list-style-type: none">• Energy Consumption• Water Use• Land Use• Materials Selection
Healthy Environment	<ul style="list-style-type: none">• Indoor Environmental Quality• Exterior Environmental Quality
Design	<ul style="list-style-type: none">• Building Design• Community Design
Environmental Effects	<ul style="list-style-type: none">• Construction Operations• Life Cycle Operation• Deconstruction

Figura 16. "Le questioni inerenti alle costruzioni sostenibili". L'immagine riporta le categorie generali ed i parametri di dettaglio dell'edilizia sostenibile. Fonte: Kibert, C. *Establishing Principles and a Model for Sustainable Construction*. Ind. Eng. 1994, p.4.

È interessante osservare come le scale su cui Kibert si sofferma siano quella macroscopica, urbanistica, quella mesoscopica, dell'edificio, e quella microscopica, dei singoli componenti dell'edificio e/o dei materiali. È questo il caso dei due parametri concorrenti al *Design*: l'autore sostiene che la componente progettuale dell'edificio (*Building design*) è cruciale negli aspetti inerenti alla tecnologia ed agli impianti ma, al contempo, occorre *pensare e progettare anche le comunità (Community design)*, sia educandole a mantenere gli edifici in condizioni adeguate, sia nel senso propriamente urbanistico, cioè dotandole delle infrastrutture idonee.

Kibert giunse ad enunciare nella stessa occasione i sei principi dell'edilizia sostenibile:

1. Minimizzare il consumo di risorse
2. Massimizzare il riutilizzo delle risorse
3. Impiegare risorse rinnovabili o riciclabili
4. Proteggere l'ambiente naturale
5. Creare un ambiente salubre e privo di sostanze tossiche
6. Ambire ad un ambiente costruito di qualità

Come osservato da alcuni autori, nella trattazione dei singoli punti emerge la tendenza a ridurre ad unici metri di valutazione della sostenibilità dell'edificio il suo consumo di risorse e di energia e le emissioni di gas ad effetto serra [42]. Questa consuetudine è stata mantenuta anche nelle sedi istituzionali, si pensi alle misure di contenimento del consumo di energia degli edifici che di fatto ricorrono alla prestazione energetica come solo parametro di misurazione della sostenibilità [2], spesso equiparando il concetto di sostenibile a quello di energeticamente efficiente [43].

L'edificio sostenibile, invece, diversamente da quello *energeticamente efficiente* o da quello *green* si confronta con questioni di carattere economico e sociale, oltre che ambientale, poiché contempla gli aspetti dell'intero ciclo di vita di un'opera. In precedenza, infatti, si indagava la sostenibilità degli edifici in riferimento soltanto al consumo di risorse e di energia riconducibile al loro utilizzo ed alla produzione dei materiali per la loro costruzione. La consapevolezza maturata nei primi anni del XXI secolo sui consistenti impatti dell'edilizia anche nelle fasi di realizzazione e dismissione delle opere, invece, ha spinto a ricercare parametri di misurazione della sostenibilità di più ampia prospettiva temporale mutuando concetti tipici dell'industria manifatturiera, come quelli della valutazione del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment - LCA*). Sono quindi entrati nel paradigma dell'edificio sostenibile concetti sociali come l'accessibilità e l'inclusività, ma anche aspetti tecnici influenti sulla dimensione economica quali la manutenibilità, l'adattabilità, la flessibilità.

L'EDILIZIA E GLI OBIETTIVI DI SVILUPPO SOSTENIBILE DELL'AGENDA 2030.

Spesso, infatti, a mancare è la giusta percezione degli impatti, positivi e negativi, riconducibili al mondo edilizio. La filiera delle costruzioni è senza dubbio una fonte economica importante a livello mondiale, oltre che sociale se si considera l'effetto sul grado occupazionale. Tuttavia, in ogni fase di vita dell'edificio, costruzione, uso e alla manutenzione, dismissione, una quantità ingente di risorse naturali ed energetiche è depleta [43]. Non trascurabile, poi, è il contributo delle attività industriali produttrici dei materiali per le costruzioni. Ad essere rilevanti, considerata l'incidenza sul totale

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

a livello globale, in particolare, sono i consumi di acqua potabile (12%), il volume di rifiuti confinato a discarica (tra il 45 e il 65%) [44], e le emissioni di gas ad effetto serra sia durante la fase di utilizzo (30%), sia per il trasporto dei materiali al cantiere (18%) [45].

Con riferimento all'Agenda 2030, alcuni autori hanno approfondito il contributo - talvolta non manifesto - dell'edilizia per il soddisfacimento dei 17 obiettivi di sviluppo sostenibile.

L'industria delle costruzioni, infatti, adopera un'ingente quantità di materiali, energia e risorse naturali e quindi è rilevante - positivamente o negativamente - per i cambiamenti climatici ma anche per la qualità della vita e la salute delle comunità [36]. Contribuisce altresì alla creazione di occupazione e dunque alla crescita economica ed al progresso, basti pensare alle soluzioni innovative proposte negli edifici e nelle infrastrutture per rendere le città più efficienti energeticamente e più verdi. I principi dell'economia circolare, infine, possono essere recepiti adoperando materiali riciclati e riciclabili ed in quanto tali sostenibili. La Figura 17 mostra alcuni degli obiettivi dell'Agenda 2030 che secondo il *World Green Building Council* sono raggiungibili con azioni sul mondo delle costruzioni. Come visibile, non si tratta soltanto di propositi ambientali, più facilmente prevedibili, ma anche economici e sociali.



Nel panorama europeo la sostenibilità degli edifici, come già anticipato, è stata misurata tendenzialmente mediante la loro efficienza energetica. Già in una

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Comunicazione della Commissione Europea del 2004, la COM(2004)60 *Verso una strategia tematica sull'ambiente urbano*, nella sezione dedicata all'edilizia sostenibile si precisavano le motivazioni per le quali la sostenibilità delle costruzioni era una priorità. In particolare, considerato il tempo speso dalle persone all'interno degli edifici, era necessario garantire condizioni di salubrità e di comfort. Tuttavia, lo smodato ricorso a sistemi energivori di condizionamento tesi a sopperire all'inadeguatezza tecnologica del parco edilizio esistente (scarso isolamento termico) rendeva spesso gli ambienti insalubri e, soprattutto, comportava forti consumi energetici ed emissioni di gas serra.

Si invitava, quindi, ad una riflessione sulle possibili soluzioni progettuali, costruttive e demolitive da introdurre, in sostituzione di quelle consolidate, per garantire la riduzione degli impatti negativi cagionati dalla filiera edilizia. Sugli edifici esistenti, in aggiunta, bisognava operare con interventi di miglioramento del rendimento energetico degli edifici qualificato come “[...] uno dei sistemi con il miglior rapporto costi/efficacia per rispettare gli impegni assunti in virtù del protocollo di Kyoto in materia di cambiamenti climatici [...]”.

Sui materiali da costruzione, invece, la Comunità Europea è intervenuta con il Regolamento 66/2010 di disciplina del marchio *Ecolabel UE*, istituito nel 1992 dal Regolamento 880/92, un'etichetta attribuibile a prodotti o servizi il cui ciclo di vita si caratterizza per un ridotto impatto ambientale. Trattasi di un processo - al quale il produttore di beni o il fornitore di servizi partecipano volontariamente - tramite il quale l'oggetto è qualificato secondo alcuni criteri ritenuti rappresentativi della sua sostenibilità ambientale. Per i prodotti, ad esempio, si tiene conto della durata media della vita, della riutilizzabilità e della riciclabilità e del contenuto di materiale riciclato. La certificazione è in capo ad un ente indipendente riconosciuto. I criteri *Ecolabel* sono armonizzati e stabiliti coinvolgendo un'ampia platea di soggetti portatori di interesse, non soltanto istituzionali ma anche realtà associative operanti nei rami ambientali o di tutela dei consumatori.

CAPITOLO 2

LE STRATEGIE EDILIZIE SOSTENIBILI: LE MATERIE PRIME SECONDARIE

Il capitolo 2 amplia la prospettiva di analisi delle questioni inerenti alla sostenibilità del mondo edilizio proiettando l'attenzione sul piano operativo.

Difatti, alla disamina dell'evoluzione delle definizioni formulate nelle sedi fisiche istituzionali ed in quelle "dissertative" della comunità scientifica, illustrata nel capitolo 1, segue nel capitolo 2 la trattazione delle metodologie codificate di valutazione della sostenibilità edilizia.

Il paragrafo 2.1 richiama, *in primis*, la definizione normativa di organismo edilizio e la struttura multidimensionale e gerarchica che ne consegue. Sono quindi approfonditi alcuni degli strumenti disponibili per la misurazione della sostenibilità degli edifici, evidenziandone le diverse scale - macroscopica (edificio e contesto urbano), mesoscopica (edificio nella totalità) e microscopica (singoli componenti dell'edificio) - e gli indicatori adoperati nei metodi.

Infine, nel paragrafo 2.2, si esamina una pratica, ascrivibile alla scala microscopica, valida per rispondere alle istanze di sostenibilità edilizia, ossia il ricorso a materiali riutilizzati o riciclati. Di questa sono inquadrati, in particolare, il contesto normativo e le definizioni.



2.1 LE SCALE DELLA SOSTENIBILITÀ EDILIZIA: L'EDIFICIO COME SISTEMA

Nonostante si sia concordi nel ritenere necessaria la divulgazione della cultura della sostenibilità nel settore delle costruzioni, la qualificazione dell'edificio come *sostenibile* è connotata da particolare difficoltà, sia concettuale che operativa. Il mondo delle costruzioni, infatti, non è in generale avvezzo alla pratica di misurazione delle prestazioni [2] ed inoltre, come anticipato al paragrafo 1.3, è intrinsecamente difficile stimare la sostenibilità di un edificio poiché manca la convergenza verso un'unica definizione del concetto [46].

Mentre in passato efficienza energetica e sostenibilità si sono spesso sovrapposte ed equivalse, attualmente il consumo di energia è considerato uno soltanto dei parametri utili a valutare la prestazione dell'edificio nel campo della sostenibilità [38]. La complessità dei manufatti edilizi, infatti, richiede un approccio multidisciplinare in ragione della numerosità di elementi costituenti e delle loro interazioni [47]. Non sono trascurabili, poi, la relazione che ogni edificio ha con lo specifico contesto nel quale è inserito [2] e la pluralità di soggetti interessati a piani ed aspetti diversi. Ciò equivale a sottolineare che l'operatore economico realizzatore o gestore del manufatto, ad esempio, sarà potenzialmente più attento agli aspetti di carattere finanziario, gli occupanti, invece, nell'espressione del giudizio inerente alla prestazione, potranno preferire altri parametri, come qualità dell'aria, sicurezza, atossicità [47].

L'ORGANISMO EDILIZIO: DEFINIZIONI NORMATIVE. La rappresentazione sistemica degli edifici è ben evidente nelle definizioni contenute nelle norme UNI 8289:1981, UNI 8290-1:1981, e UNI 10838:1999, quest'ultima di sostituzione delle previgenti UNI 7867-1:1978 e UNI 7867-4:1979. Pur con delle accezioni diversificate e dipendenti dallo specifico campo, per sistema ci si riferisce genericamente ad *un insieme di elementi reciprocamente interconnessi ed interagenti tra loro e con l'ambiente esterno la cui interdipendenza è funzionale al raggiungimento di un determinato scopo*, o ancora ad *un insieme di elementi in stretto rapporto, costituiti ed ordinati per servire a determinate operazioni*⁵. Un sistema produttivo, quale può essere considerato quello edilizio, è un insieme di elementi la cui interazione è finalizzata alla trasformazione di materie prime in prodotti e servizi con valore aggiunto, in grado di soddisfare i bisogni del consumatore. Dal trasferimento di questa definizione nel piano delle costruzioni deriva che il sistema edilizio è l'oggetto

⁵ Definizione da Treccani

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

mediante il quale si attua la produzione edilizia, ossia si realizzano edifici rispondenti a precise esigenze dei fruitori.

La complessità della struttura degli edifici, in virtù della quale è opportuno ricomprendere nell'insieme del sistema edilizio anche i processi decisionali, discende dalla necessità di confrontarsi con la funzione attribuita al prodotto-edificio, variabile. A parità di funzione, poi, le possibili declinazioni dipendenti dai contesti spaziali sono diverse. È questo il motivo per il quale i sistemi edilizi non possono essere approcciati secondo la logica della scomposizione in parti elementari legate da rapporti di causa-effetto a cui consegue un funzionamento globale prevedibile e ripetibile. I sistemi edilizi non sono sistemi *complicati* bensì *complessi*.

Il concetto di sistema, dunque, è una rappresentazione astratta utile a modellare l'organismo edilizio del quale la definizione, contenuta nella norma UNI 10838:1999 - *Terminologia riferita all'utenza, alle prestazioni, al processo edilizio ed alla qualità edilizia*, è la seguente:

"[...] per organismo edilizio si intende l'insieme strutturato di elementi spaziali ed elementi tecnici, interni ed esterni, pertinenti all'edificio, caratterizzati dalle loro funzioni e dalle loro relazioni reciproche [...]"

A comporre l'organismo edilizio, quindi, sono i sottosistemi spaziale-ambientale e tecnico- tecnologico, anch'essi definiti nella UNI 10838-1999:

"[...] sistema ambientale dell'organismo edilizio è l'insieme strutturato delle unità ambientali e degli elementi spaziali, definiti nelle loro prestazioni e nelle loro relazioni [...]"

"[...] sistema tecnologico dell'organismo edilizio è l'insieme strutturato di unità tecnologiche e/o elementi tecnici definiti nei loro requisiti tecnologici e nelle loro specificazioni di prestazioni tecnologiche [...]"

I riferimenti ai termini *unità*, *elementi*, *requisiti* e *prestazioni* sono mutuati dall'impostazione esigenziale-prestazionale che permea il processo edilizio e la relativa normativa. La sequenza esigenza-requisiti-prestazioni è strutturata per esercitare il controllo sull'effettiva rispondenza del prodotto-edificio agli obiettivi per i quali è realizzato, come schematizzato nella Figura 18.



ESIGENZA, REQUISITI E PRESTAZIONI: DEFINIZIONI. L'esigenza è ciò che di necessità si richiede per il normale svolgimento di un'attività dell'utente o di una funzione tecnologica⁶ ed ha pertanto una dimensione non misurabile, in quanto astratta ed immateriale. La norma UNI 8289:1981 *Esigenze dell'utenza finale* ha individuato sette classi di esigenze con lo scopo di definirne il quadro di riferimento e identificare, con un'opportuna trasposizione, i requisiti ed i sistemi di requisiti. Le classi di esigenza sono interpretabili come mediazione tra i bisogni dei fruitori dei beni ed i vincoli - rappresentati da fattori ambientali, culturali ed economici - che *l'ambiente naturale pone all'ambiente costruito*⁷. La norma menziona esplicitamente l'utenza finale e sembra quindi riferirsi unicamente alla fase di utilizzo degli edifici, escludendo bisogni ed esigenze degli altri attori del processo edilizio, pur prevedendo *altre classi di esigenze che si collocano a livello diverso, in connessione con l'approccio generale al processo edilizio*. Le sette classi di esigenze della UNI 8289:1981 sono le seguenti:

1. Sicurezza. Insieme delle condizioni relative alla incolumità degli utenti, nonché alla difesa e prevenzione di danni in dipendenza da fattori accidentali, nell'esercizio del sistema edilizio

⁶ Norma UNI 10838:1999

⁷ Norma UNI 8289:1981

2. Benessere. Insieme delle condizioni relative a stati del sistema edilizio adeguati alla vita, alla salute ed allo svolgimento delle attività degli utenti
3. Fruibilità. Insieme delle condizioni relative all'attitudine del sistema edilizio ad essere adeguatamente usato dagli utenti nello svolgimento delle attività
4. Aspetto. Insieme delle condizioni relative alla fruizione percettiva del sistema edilizio da parte degli utenti
5. Gestione. Insieme delle condizioni relative all'economia di esercizio del sistema edilizio
6. Integrabilità. Insieme delle condizioni relative all'attitudine delle unità e degli elementi del sistema edilizio a connettersi funzionalmente tra di loro
7. Salvaguardia dell'ambiente. Insieme delle condizioni relative al mantenimento e miglioramento degli stati dei sovra-sistemi di cui il sistema edilizio fa parte

Sulla base dello schema generale della norma, in letteratura sono state approntate classificazioni di dettaglio suggerendo per ognuna delle classi le esigenze specifiche. La sicurezza, ad esempio, è stata considerata nell'accezione strutturale oppure antincendio, così come la gestione, potendosi riferire a ciascuna delle fasi del processo edilizio, è stata letta come esigenza di economicità nella realizzazione ovvero nella manutenzione. Volendo richiamare i due sottosistemi costituenti l'organismo edilizio, le prime cinque classi di esigenze (sicurezza, benessere, fruibilità, aspetto e gestione) sono accostabili sia alla dimensione ambientale che a quella tecnologica, mentre integrabilità e salvaguardia dell'ambiente esclusivamente alla seconda.

Con l'introduzione della UNI 11277:2008 - *Sostenibilità in edilizia - Esigenze e requisiti di ecocompatibilità dei progetti di edifici residenziali e assimilabili, uffici e assimilabili, di nuova edificazione e ristrutturazione*, poi ritirata senza sostituzione, fu tentato un ampliamento dei livelli di utenza ed esigenza previsti dalla UNI 8289:1981. La norma ritirata, infatti, si prefiggeva di sviluppare un metodo armonizzato per la misurazione della compatibilità ambientale degli edifici, motivo per il quale le classi di esigenza erano ridotte a tre ed orientate marcatamente agli aspetti di sostenibilità: salvaguardia dell'ambiente, utilizzo razionale delle risorse, benessere, igiene e salute dell'utente. Per ognuna delle classi erano specificate le esigenze (18 in totale), la fase del ciclo di vita dell'opera (4 in totale) ed i requisiti (37 in totale).

La consistenza astratta e immisurabile dell'esigenza, intrinseca alla sua definizione, rende necessaria una sua traduzione tecnica e numericamente rappresentabile: il requisito. Questo parametro, dunque, quantifica e qualifica le esigenze connotandole di un insieme di caratteri misurabili. In letteratura il requisito è descritto come *la richiesta di funzionamento rivolta ad un elemento edilizio tale da soddisfare le esigenze*. A chiudere la sequenza del processo esigenziale-prestazionale è la prestazione, ossia l'effettivo grado di soddisfacimento assicurato

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

da un elemento edilizio in opera, in relazione all'uso per il quale è stato pensato. Il requisito, dunque, è frapposto tra l'esigenza - *domanda di qualità* - e la prestazione - *risposta di qualità* - e funge da termine di confronto numerico per l'espressione del giudizio sulla funzionalità del sistema edilizio.

Le definizioni normative di requisito e prestazione, contenute nella UNI 10838:1999, sono rispettivamente “[...] *traduzione di un'esigenza in fattori atti a individuarne le condizioni di soddisfacimento da parte di un organismo edilizio o di sue parti spaziali o tecniche, in determinate condizioni d'uso e di sollecitazione [...]*” e “[...] *comportamento reale dell'organismo edilizio e/o delle sue parti nelle effettive condizioni d'uso e di sollecitazione ... normalmente classificate in prestazioni ambientali e tecnologiche [...]*”. Nell'illustrazione specifica delle voci ambientale e tecnologica, poi, il testo richiama gli elementi spaziali/ambientali e tecnici.

IL SISTEMA TECNOLOGICO SECONDO LA UNI 8290-1:1981. Questi - gli elementi spaziali/ambientali e tecnici - sono oggetto di trattazione della norma UNI 8290-1:1981 - *Sistema tecnologico* per la quale costituiscono il livello inferiore della struttura gerarchica in cui il sottosistema tecnologico, come da definizione riportata in precedenza, è decomponibile. I tre insiemi indicati dalla norma derivano da operazioni di raggruppamento secondo criteri di omogeneità basati sulla funzione *convenzionalmente attribuita all'oggetto*, senza però escludere possibili ulteriori attribuzioni.

La struttura gerarchica è così organizzata:

1. Classi di unità tecnologiche (primo livello)
2. Unità tecnologiche (secondo livello)
3. Classi di elementi tecnici (terzo livello)

La scomposizione, precisa il testo, può proseguire aggiungendo livelli successivi purché costituiti da voci sempre più dettagliate ed omogeneamente accostate. La norma indica e definisce gli elementi del primo e del secondo livello, mentre non fornisce definizione di quelli del terzo livello.

Le classi di unità tecnologiche sono le seguenti:

1. Struttura portante
2. Chiusura
3. Partizione interna
4. Partizione esterna
5. Impianto di fornitura dei servizi
6. Impianto di sicurezza
7. Attrezzatura interna
8. Attrezzatura esterna

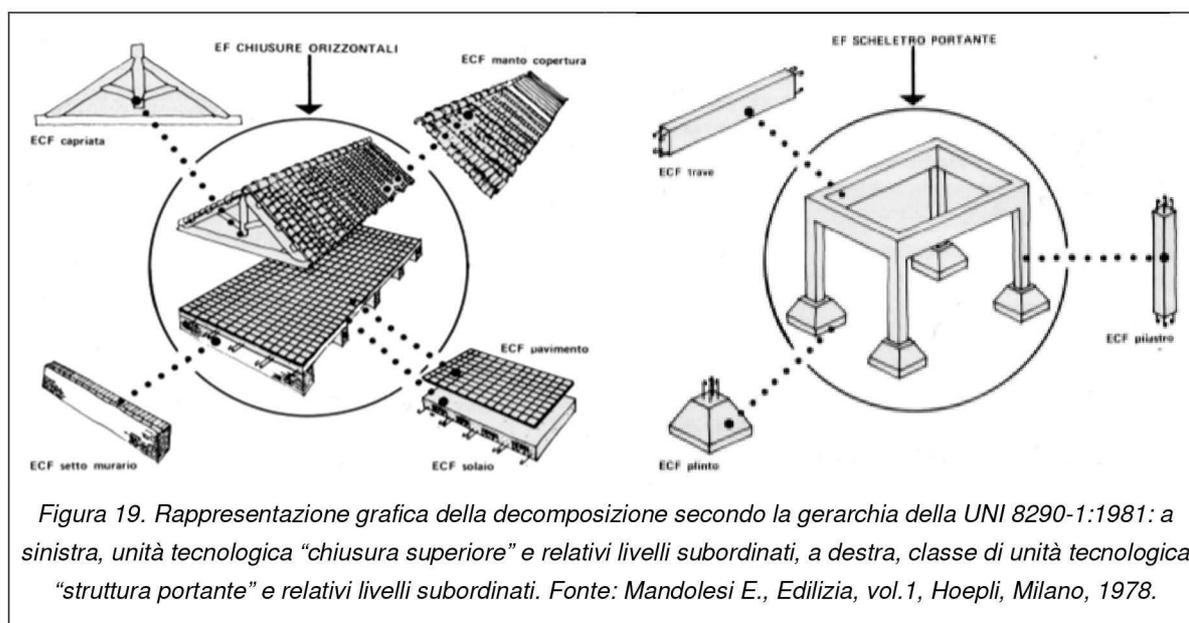
PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Si riportano a titolo esemplificativo alcune sequenze della scomposizione, indicando classe di unità tecnologiche - unità tecnologiche e classi di elementi tecnici:

1. Struttura portante
 - 1.1. Struttura di fondazione
 - 1.1.1. Struttura di fondazione diretta
 - 1.1.2. Struttura di fondazione indiretta
 - 1.2. Struttura di elevazione
 - 1.2.1. Struttura di elevazione verticale
 - 1.2.2. Struttura di elevazione orizzontale ed inclinata
 - 1.2.3. Struttura di elevazione spaziale
 - 1.3. Struttura di contenimento
 - 1.3.1. Struttura di contenimento verticale
 - 1.3.2. Struttura di contenimento orizzontale

La visione gerarchica è emblematica della complessità del sistema-edificio il cui funzionamento, nella totalità, è dipendente dalle relazioni intercorrenti non soltanto tra il singolo elemento e quelli equi-ordinati, ma anche con quelli sopra e sotto-ordinati.

I concetti sinora illustrati fungono da premessa alla considerazione che indipendentemente dal tipo di prestazione che si intende misurare, il risultato complessivo è ottenuto per sommatoria - idealmente - delle prestazioni parziali nei livelli suggeriti dalla norma ed in quelli ulteriori, eventualmente individuati per decomposizioni progressive. Il principio di decomposizione applicato ad alcune classi di unità tecnologiche è illustrato graficamente nelle Figura 19 e Figura 20.



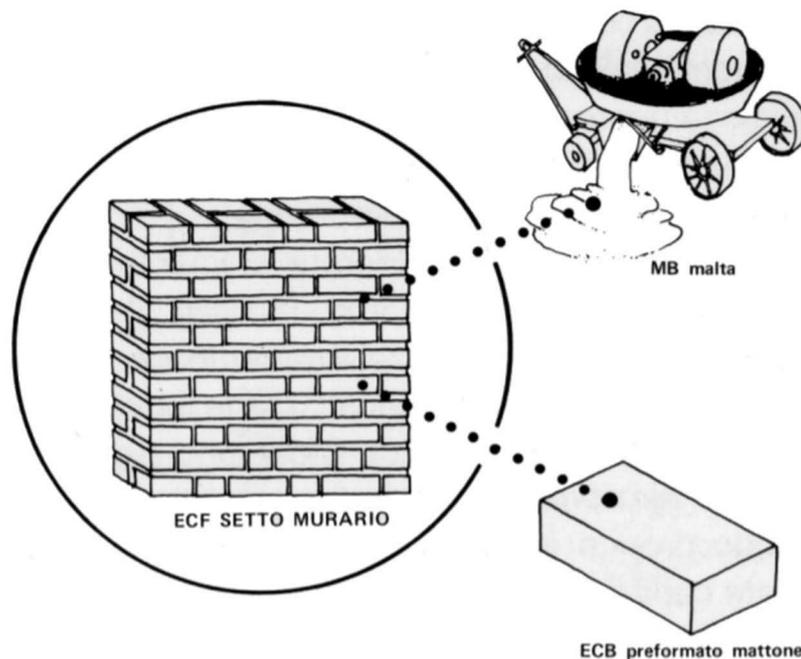
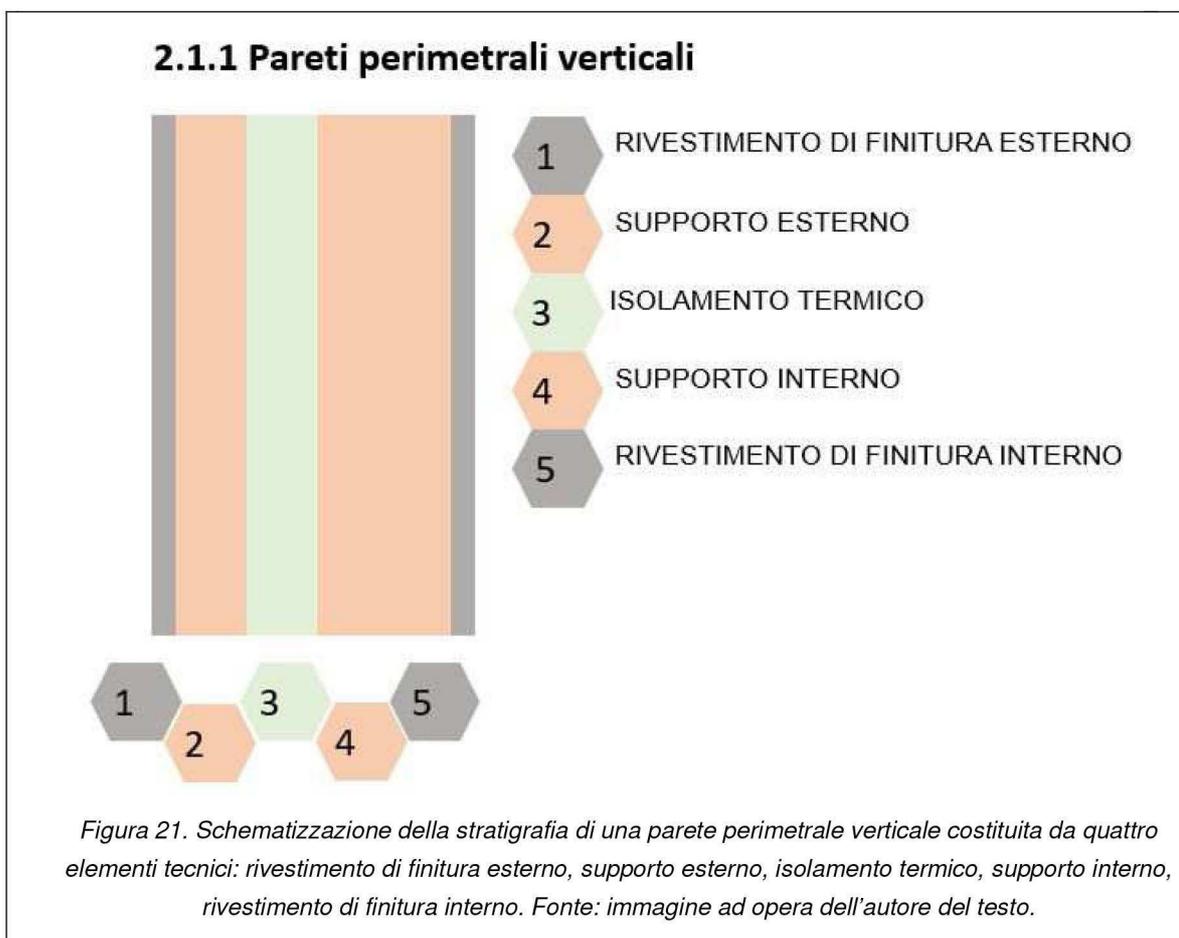


Figura 20. Rappresentazione grafica della decomposizione secondo la gerarchia della UNI 8290-1:1981 dell'elemento tecnico "setto murario" nei materiali costituenti: malta di allettamento e mattone Fonte: Mandolesi E., Edilizia, vol.1, Hoepli, Milano, 1978.

Volendo quindi operare delle riflessioni sui contenuti del paragrafo, la sostenibilità di un edificio si può assumere governabile con scelte compiute su tre dimensioni. *In primis*, sulla dimensione macroscopica, ossia legata al contesto di inserimento dell'opera e quindi alle preesistenti condizioni di qualità sociale, ambientale, economica e culturale, rispetto alle quali l'edificio potrà impattare positivamente o negativamente. *In secundis*, sulla dimensione mesoscopica, ovvero quella dell'edificio in sé, idealmente decomponibile in classi di unità tecnologiche, unità tecnologiche, classi di elementi tecnici ed ulteriori livelli, quali quello degli elementi tecnici. In questo dominio sono ricomprese le scelte progettuali sulle soluzioni tecniche e tecnologiche: si pensi, ad esempio, alle diverse prestazioni ottenibili per una parete perimetrale verticale - a parità di elementi tecnici - semplicemente modificando di questi la sequenza, la geometria ed il materiale costituente. E si giunge, quindi, alla terza ed ultima dimensione - quella microscopica - ossia l'insieme di decisioni inerenti ai materiali costituenti i singoli elementi tecnici. I materiali sono in effetti i termini ultimi sui quali agire per soddisfare i requisiti demandati agli elementi tecnici e, risalendo a cascata la struttura gerarchica della norma, alle unità tecnologiche ed all'edificio nella totalità. Si riporta, a titolo esemplificativo, la casistica riferita al requisito di isolamento termico di una parete perimetrale verticale, qualificato mediante una serie di specificazioni di prestazione

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

tra le quali il valore di trasmittanza termica (W/m^2K). Si supponga che la stratigrafia della classe di elementi tecnici sia decomponibile nella sequenza di elementi *rivestimento di finitura esterno, supporto esterno, isolamento termico, supporto interno, rivestimento di finitura interno*, come schematizzato nella Figura 21. L'indicazione adoperata nella legenda non è casuale ma vuole indicare la funzione competente a ciascuno degli spessori, quale rivestimento, supporto, isolamento. Ogni strato, dunque, considerato nella dimensione singolare dovrà rispondere ai requisiti per esso specificamente fissati dalle norme di riferimento, e contestualmente concorrerà alle prestazioni complessive del sistema-elemento tecnico. Ritornando all'esempio della Figura 21, il rivestimento di finitura esterno potrà essere costituito da un intonaco di variabile formulazione ed in quanto tale dovrà soddisfare i requisiti minimi e conseguenti specificazioni di prestazione della norma UNI 998-1:2016 relativa alle malte da intonaco: resistenza alla compressione, aderenza al supporto etc. L'elemento tecnico, tuttavia, contribuirà alla prestazione termica complessiva che la parete - classe di elementi tecnici - deve garantire perché il requisito di isolamento termico sia atteso.



Supponendo, idealmente, che gli spessori degli strati siano intercambiabili e quindi ininfluenti ai fini della prestazione termica, perché caratterizzati da valori di conducibilità analoghi, la scelta sui materiali potrà invece essere rilevante per la sostenibilità nel senso più ampio del termine: ambientale, certamente, ma anche economica. Difatti, l'effetto della singola decisione sul materiale - dimensione microscopica se confrontata con quella dell'edificio o dei contesti urbani - si riverbera su ogni classe di elementi tecnici e poi su ogni unità tecnologica e dunque sull'edificio nell'insieme.

La centralità delle scelte sui materiali era esplicitata nella struttura della norma - non più vigente - UNI 11277:2008 che indicava per la classe di esigenza *Salvaguardia dell'ambiente* il requisito di *Utilizzo di materiali, elementi e componenti a ridotto carico ambientale* ed ancora, per la classe di esigenza *Utilizzo razionale delle risorse* i requisiti di *Utilizzo di materiali, elementi e componenti riciclati* e di *Utilizzo di materiali, elementi e componenti ad elevato potenziale di riciclabilità*.

LA VALUTAZIONE DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE: I PROTOCOLLI DI CERTIFICAZIONE.

L'approccio multi-scala alla sostenibilità degli edifici, preminentemente nella sfera ambientale, è tangibile nelle sequenze procedurali dei protocolli di certificazione, nati con l'obiettivo di guidare la progettazione di interventi di nuova costruzione o sul costruito verso la direzione della sostenibilità. La certificazione, tuttavia, è soltanto il momento conclusivo di un processo ben più articolato di valutazione della sostenibilità e quindi di espressione di un giudizio a valle di una sequenza di fasi di misurazione e confronto con dei termini di riferimento.

Gli strumenti di valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici sono ascrivibili a due categorie, quella ricorrente all'analisi del ciclo di vita (*Life Cycle Assessment - LCA*) [48] e quella dei *Criteria Based Tools- CBT*, ossia dei protocolli basati su criteri. Tuttavia, come evidenziato da alcuni autori, per gli edifici è più conveniente adoperare nella sola fase di progettazione la *LCA* limitandola a risorsa di supporto alle decisioni attraverso cui confrontare soluzioni tecnologiche, materiali, dotazioni impiantistiche, fonti energetiche e modalità di gestione dei rifiuti [48]. L'applicazione rigorosa del metodo presupporrebbe, invece, la valutazione degli impatti - per i prodotti e per i processi - estesa all'intero ciclo di vita. Gli edifici sono tuttavia sistemi complessi, il cui ciclo di vita non è spesso prevedibile in maniera sufficientemente accurata [49]. Per tali ordini di considerazioni, si preferiscono approcci, quali i *CBT*, basati su liste di controllo, con una struttura più semplice e globalmente armonizzata [50]. Il protocollo che sarà illustrato brevemente nel seguito, di tipo *CBT*, è il *LEED - Leadership in Energy and Environmental Design*.

IL PROTOCOLLO LEED. Sviluppato a partire dal 1993 su iniziativa di una organizzazione non governativa, la *United States Green Building Council*, *LEED* è uno degli strumenti di valutazione della sostenibilità ambientale degli edifici più utilizzati al mondo [51]. La certificazione è ottenuta al termine di un processo volontario e conseguita sulla base di un punteggio, che l'edificio totalizza nei criteri che strutturano il protocollo, computato e verificato dall'organismo di certificazione, ente indipendente e responsabile delle fasi del procedimento.

Lo schema *LEED* si basa su una serie di requisiti afferenti ad aree tematiche pertinenti alla sostenibilità per i quali sono individuati prerequisiti minimi che l'edificio deve garantire per poter essere certificato. Il prerequisito è a sua volta corredato da una serie di crediti ai quali è associato un punteggio. Il totale cumulabile per ogni requisito, non omogeneo perché dipendente dalla ripartizione dei pesi tra le diverse categorie di criteri, è la sommatoria dei punteggi di ogni credito. Nella versione corrente del protocollo, la 4.0, le famiglie di criteri ed i punteggi massimi sono i seguenti:

- Sostenibilità del sito, 10
- Efficienza delle risorse idriche, 10
- Energia ed atmosfera, 35
- Materiali e risorse, 14
- Qualità degli ambienti interni, 15
- Trasporto e ubicazione, 16
- Innovazione, 6
- Priorità regionale, 4

Trasporto e ubicazione non era presente nelle versioni precedenti.

Il massimo attribuibile agli edifici è di 110, le certificazioni conseguibili sono *base* (punteggio da 40 a 59), *argento* (punteggio da 50 a 59), *oro* (punteggio da 60 a 79) e *platino* (punteggio da 80 sino a 110). A titolo esemplificativo si riportano nelle Figura 22 e Figura 23 alcuni stralci di liste di controllo *LEED*.

Nella struttura di *LEED* la graduazione degli aspetti ambientali rispetto alla loro rilevanza è implicitamente contenuta nella ripartizione dei crediti: un edificio che accumula il massimo punteggio nel criterio Energia ed atmosfera ed il minimo nei restanti potrebbe ottenere una certificazione più alta rispetto ad un'opera che è mediamente performante in tutti i requisiti. Sebbene l'allocazione dei crediti sia scientificamente costruita a partire dai dati ambientali monitorati e dalla seguente definizione delle priorità [47], il protocollo è pur sempre dipendente dalle condizioni territoriali ed il suo schema non ha un'impostazione flessibile che consente adattamenti a realtà diverse [52].

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

SI	?	NO	Materiali e Risorse		Punteggio massimo: 14
SI			Prereq. 1	Raccolta e stoccaggio dei materiali riciclabili	Obbligatorio
			Credito 1.1	Riutilizzo degli edifici: mantenimento di murature, solai e coperture esistenti	1 - 3
				Riutilizzo del 55%	1
				Riutilizzo del 75%	2
				Riutilizzo del 95%	3
			Credito 1.2	Riutilizzo degli edifici: mantenimento del 50% degli elementi non strutturali interni	1
			Credito 2	Gestione dei rifiuti da costruzione	1 - 2
				50% di Contenuto riciclato o recuperato	1
				75% di Contenuto riciclato o recuperato	2
			Credito 3	Riutilizzo dei materiali	1 - 2
				Riutilizzo del 5%	1
				Riutilizzo del 10%	2
			Credito 4	Contenuto di riciclato	1 - 2
				10% di Contenuto	1
				20% di Contenuto	2
			Credito 5	Materiali estratti, lavorati e prodotti a distanza limitata (materiali regionali)	1 - 2
				10% dei materiali	1
				20% dei materiali	2
			Credito 6	Materiali rapidamente rinnovabili	1
			Credito 7	Legno certificato	1

Figura 22. Stralcio di lista di controllo LEED: il requisito Materiali e risorse è decomposto in un prerequisito ed otto crediti. Fonte: www.gbitalia.org, consultazione: 2021.

SI	?	NO	Gestione delle Acque		Punteggio massimo: 10
SI			Prereq. 1	Riduzione dell'uso dell'acqua	Obbligatorio
			Credito 1	Gestione efficiente delle acque a scopo irriguo	2 - 4
				Riduzione dei consumi del 50%	2
				Nessun uso di acqua potabile per l'irrigazione	4
			Credito 2	Tecnologie innovative per le acque reflue	2
			Credito 3	Riduzione dell'uso dell'acqua	2 - 4
				Riduzione del 30%	2
				Riduzione del 35%	3
				Riduzione del 40%	4

Figura 23. Stralcio di lista di controllo LEED: il requisito Gestione delle acque è decomposto in un prerequisito e tre crediti. Fonte: www.gbitalia.org, consultazione: 2021.

Tra gli obiettivi fissati nell'Agenda 2030 figura quello di *garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo* e, nello specifico, i traguardi di *gestione sostenibile ed utilizzo efficiente delle risorse naturali* e la *riduzione in modo sostanziale della produzione di rifiuti attraverso la prevenzione, la riduzione, il riciclo e il riutilizzo*.

Il settore edilizio è tra i comparti economici che più consumano risorse e producono rifiuti. Di questi, oltre un terzo di quelli prodotti in Europa è proveniente dalle attività di costruzione e demolizione degli edifici. In Italia, se la percentuale si calcola sui soli rifiuti speciali - quali sono quelli edili - si arriva al 46%, corrispondente a circa 70 milioni di tonnellate su un totale di 155 milioni, come illustrato nel rapporto ISPRA 2021 riferito ai dati dell'anno 2019. L'intervento sul comparto edilizio è quindi centrale per il raggiungimento degli obiettivi di sviluppo sostenibile o di sostenibilità in quanto se da un lato gli impatti ambientali, sociali ed economici connessi a questa filiera sono negativi e significativi, simmetricamente, gli avanzamenti virtuosi sono altrettanto incisivi.

Le strategie attraverso cui ridurre la produzione di rifiuti sono tutte orientate alle istanze di *economia circolare*. Diversamente dall'approccio lineare che muove i prodotti ed i materiali secondo il percorso *dalla culla alla tomba*, aderente al principio del *produci, consuma e butta via*, l'economia circolare punta ad una chiusura dei sistemi con flussi *dalla culla alla culla*, prevedendo cioè una ciclicità nell'utilizzo delle risorse [53]. L'apparente ambiguità sull'oggetto della ciclicità - prodotti o materiali - è stata risolta con l'introduzione della *gerarchia dei rifiuti*, un principio europeo che sarà spiegato nell'immediato seguito, considerato un pilastro dell'economia circolare [54].

Nel merito del settore delle costruzioni, come trattato al paragrafo 2.1, già in fase di progettazione è auspicabile ricorrere a soluzioni tecniche, tecnologiche e materiali che minimizzino gli impatti negativi e significativi tenendo conto non soltanto del processo costruttivo in sé ma anche dell'uso e della dismissione dei manufatti. Per i materiali, in particolare, la possibilità di riutilizzo e di riciclo (o riciclaggio) al termine del relativo ciclo di vita è una strategia performante dal punto di vista ambientale, economico e sociale. Il trattamento dei rifiuti consente, infatti, di alleggerire gli impatti ambientali negativi cagionati dallo smaltimento in discarica e, valorizzando il rifiuto come risorsa, apre a nuove filiere produttive attorno alle quali generare indotti economici e sociali.

IL TRATTAMENTO DEI RIFIUTI. RIFERIMENTI NORMATIVI E DEFINIZIONI.

Il quadro giuridico per il trattamento dei rifiuti è stato tracciato dalla Direttiva Europea 2008/98/CE, poi modificata ed integrata dalla 2018/851/UE, che ha inaugurato il nuovo corso nella disciplina concernente la gestione dei rifiuti nei paesi europei.

Le direttive sono state recepite nella parte quarta del Codice dell'ambiente, D.Lgs. 152/2006, mediante il D.Lgs. 205/2010 *Disposizioni di attuazione della Direttiva 2008/98/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 19 novembre 2008 relativa ai rifiuti e che abroga alcune direttive* e la legge 116/2020 *Attuazione della Direttiva (UE) 2018/851 che modifica la Direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti*.

Si precisa che gli articoli ai quali si farà riferimento d'ora innanzi, se non diversamente specificato, sono quelli contenuti nel Codice dell'ambiente, come modificato e integrato per il recepimento della disciplina europea.

Il rifiuto è definito all'articolo 183, comma 1, lettera a, come *qualsiasi sostanza od oggetto di cui il detentore si disfi o abbia l'intenzione o abbia l'obbligo di disfarsi*, il detentore, invece, all'articolo 183, comma 1, lettera h, come *il produttore dei rifiuti o la persona fisica o giuridica che ne è in possesso*. In proposito, la 2008/98/CE ha responsabilizzato il ruolo del produttore di rifiuti secondo il principio cardine della legislazione ambientale europea del *chi inquina, paga*. Il produttore dei rifiuti è, infatti, *il soggetto la cui attività produce rifiuti e il soggetto al quale sia giuridicamente riferibile detta produzione (produttore iniziale) o chiunque effettui operazioni di pretrattamento, di miscelazione o altre operazioni che hanno modificato la natura o la composizione di detti rifiuti (nuovo produttore)*, articolo 183, comma 1, lettera f.

L'introduzione del secondo soggetto - il produttore iniziale - nella definizione di produttore dei rifiuti si è resa necessaria per estendere la responsabilità a tutti i soggetti coinvolti nelle diverse fasi della gestione dei rifiuti: produzione, distribuzione, utilizzo, consumo di beni da cui si originano. Proprio con riferimento al corretto smaltimento dei rifiuti provenienti delle attività edili, infatti, l'attribuzione della responsabilità in capo ai soggetti coinvolti nel processo - committente ed esecutori materiali - è stata spesso di difficile individuazione. Secondo questa estensione, colui al quale è riconducibile giuridicamente la produzione dei rifiuti - il committente dei lavori nel caso edile - è obbligato assieme al produttore - esecutore materiale dei lavori - ad effettuare controlli sui trasportatori e sui destinatari dei rifiuti. Il committente, tuttavia, diversamente dal produttore è esonerato dagli obblighi connessi alla fase di classificazione, trasporto, carico e scarico dei rifiuti.

Ad essere responsabilizzato, peraltro, non è soltanto il produttore di rifiuti ma in generale il produttore del prodotto, ovvero *qualsiasi persona fisica o giuridica che*

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

professionalmente sviluppi, fabbrichi, trasformi, tratti, venda o importi prodotti, articolo 183, comma 1, lettera g. Alla lettera g-bis si introduce e definisce, infatti, il regime di responsabilità del produttore, ossia *le misure volte ad assicurare che ai produttori di prodotti spetti la responsabilità finanziaria o la responsabilità finanziaria e organizzativa della gestione della fase del ciclo di vita in cui il prodotto diventa un rifiuto*. L'attribuzione di responsabilità finanziaria al soggetto produttore di beni destinati a divenire rifiuti (*EPR - Extended Producer Responsibility*) intende incentivare una politica sostenibile nella concezione stessa del prodotto. Vale a dire che è interesse del produttore del prodotto applicare il principio di prevenzione, ossia prospettare a monte interventi di riduzione dei rifiuti che si traducono, concretamente, in un alleggerimento degli oneri finanziari connessi al loro trattamento. La *EPR*, diversamente dalla responsabilità del produttore del rifiuto, è estesa all'intero ciclo di vita dei prodotti.

La Direttiva 2008/98/CE ha altresì introdotto il concetto di gerarchia dei rifiuti, rubricato all'articolo 179 del D.Lgs. 152/2006 come *Criteri di priorità nella gestione dei rifiuti*, che “[...] stabilisce, in generale, un ordine di priorità di ciò che costituisce la migliore opzione ambientale. Nel rispetto della gerarchia di cui al comma 1, devono essere adottate le misure volte a incoraggiare le opzioni che garantiscono ... il miglior risultato complessivo, tenendo conto degli impatti sanitari, sociali ed economici, ivi compresa la fattibilità tecnica e la praticabilità economica [...]” che ordina i processi che coinvolgono la gestione dei rifiuti nel seguente modo:

- prevenzione
- riutilizzo
- riciclaggio
- recupero di altro tipo
- smaltimento

La logica alla base di questa struttura piramidale, mostrata in Figura 24, emblematica dell'economia circolare, auspica la preferenza delle strategie di maggiore incisività ambientale, mirate anzitutto a ridurre la produzione dei rifiuti azzerando gli scarti (prevenzione) ed il contenuto di sostanze pericolose nei materiali e nei prodotti. Qualora questo non sia possibile, occorre minimizzarli - gli scarti - e garantirne il riutilizzo, il riciclo (o riciclaggio) oppure il recupero. Lo smaltimento attraverso il conferimento in discarica deve essere l'opzione alla quale si ricorre soltanto se non esistono alternative sostenibili e deve comunque essere finalizzata al recupero di materia o di energia.



Figura 24. La piramide della gerarchia dei rifiuti della Direttiva Europea 2008/98/CE. Fonte: Rifiuti come risorse di un'economia circolare. Scheda ambiente UTILITALIA, 2017.

I termini della gerarchia sono definiti all'articolo 3 della 2008/98/CE:

- riutilizzo è *qualsiasi operazione attraverso la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti sono reimpiegati per la stessa finalità per la quale erano stati concepiti*
- riciclaggio (o riciclo) è *qualsiasi operazione di recupero attraverso cui i materiali di rifiuto sono ritrattati per ottenere prodotti, materiali o sostanze da utilizzare per la loro funzione originaria o per altri fini. Include il ritrattamento di materiale organico ma non il recupero di energia né il ritrattamento per ottenere materiali da utilizzare quali combustibili o in operazioni di riempimento*
- recupero è *qualsiasi operazione il cui principale risultato sia di permettere ai rifiuti di svolgere un ruolo utile sostituendo altri materiali che sarebbero stati altrimenti utilizzati per assolvere una particolare funzione o di prepararli ad assolvere tale funzione, all'interno dell'impianto o nell'economia in generale*
- smaltimento è *qualsiasi operazione diversa dal recupero anche quando l'operazione ha come conseguenza secondaria il recupero di sostanze o di energia*

La gerarchia può essere sintetizzata con le 4R: ridurre, riutilizzare, riciclare e recuperare. La prevenzione, infatti, prioritaria nella scala, ha come primo obiettivo la *riduzione* dei rifiuti, come sottolineato in precedenza. Riutilizzo e riciclo, invece, pur essendo entrambi pratiche di economia circolare sottendono operazioni ed approcci diversi. Se il riutilizzo si riferisce più propriamente a prodotti, piuttosto che a materiali,

da poter impiegare ripetutamente e per uno stesso scopo [55], il riciclo, invece, concerne l'utilizzabilità ripetuta dei materiali per mezzo di trasformazioni che ne possono anche modificare la funzione originaria. Spesso, però, come sottolineato da Rhein e Sträter [53], per i materiali i termini riutilizzo e riciclo sono adoperati come sinonimi, la qual cosa indebolisce il significato della gerarchia perché equipara un processo articolato e comunque dispendioso (il riciclo) ad uno che invece sarebbe immediato e diretto (il riutilizzo).

I RIFIUTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE. RIFERIMENTI NORMATIVI E DEFINIZIONI.

I rifiuti da costruzione e demolizione, nel seguito *C&Ds*, sono definiti all'articolo 183 del D.Lgs. 152/2006, comma 1, lettera *b-quater*, come *i rifiuti prodotti dalle attività di costruzione e demolizione*. All'articolo 184 dello stesso testo, comma 3, lettera b, si precisa, poi, che sono rifiuti speciali *i rifiuti prodotti dalle attività di costruzione e demolizione, nonché i rifiuti che derivano dalle attività di scavo, fermo restando quanto disposto dall'articolo 184 bis*. Quest'ultimo fa riferimento al concetto di sottoprodotto ed assimila i rifiuti derivanti da attività secondarie di costruzione e demolizione effettuate nell'ambito del nucleo familiare a rifiuti da costruzione e demolizione, recependo l'articolo 11 della Direttiva Europea 2018/851/UE - di modifica della Direttiva Quadro Rifiuti 2008/98/CE - che aggiunge che "[...] *i rifiuti da costruzione e demolizione dovrebbero essere intesi come corrispondenti ai tipi di rifiuti di cui al capitolo 17 dell'elenco di rifiuti stabilito dalla decisione 2014/955/UE nella versione in vigore il 4 luglio 2018 [...]*".

L'elenco individua le seguenti sottoclassi, ognuna con ulteriori specificazioni:

- 17 01 cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche
- 17 02 legno, vetro e plastica
- 17 03 miscele bituminose, catrame di carbone e prodotti contenenti catrame
- 17 04 metalli (incluse le loro leghe)
- 17 05 terra (compreso il terreno proveniente da siti contaminati), rocce e fanghi di dragaggio
- 17 06 materiali isolanti e materiali da costruzione contenenti amianto
- 17 08 materiali da costruzione a base di gesso
- 17 09 altri rifiuti dell'attività di costruzione e demolizione

In Italia, la composizione media in peso dei rifiuti da costruzione e demolizione è:

- 10%, calcestruzzo armato
- 20%, calcestruzzo non armato
- 50%, laterizio
- 5%, asfalto
- 6%, scavi
- 2,5%, plastica, legno, carta

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

- 3%, metallo
- 3,5%, varie

Fonte: www.arpa.veneto.it. Consultazione: 2021

Per i C&Ds la Direttiva 2008/98/CE invitava gli stati membri ad adottare le misure necessarie affinché la condizione, alla lettera b del comma 2 dell'articolo 11, “[...] entro il 2020 la preparazione per il riutilizzo, il riciclaggio e altri tipi di recupero di materiale, incluse operazioni di colmatazione che utilizzano i rifiuti in sostituzione di altri materiali, di rifiuti da costruzione e demolizione non pericolosi ... sarà aumentata almeno al 70 % in termini di peso [...]” fosse raggiunta. L’inserimento di un obiettivo puntuale per il settore delle costruzioni consegue dalla rilevanza del flusso di rifiuti speciali ad esso connesso oltre che dall’utilizzo intensivo di risorse naturali per la produzione dei materiali per le costruzioni, ed è compreso nel più ampio ambito di misure volte alla transizione sostenibile delle costruzioni tradotto formalmente nel *Protocollo UE per la gestione dei rifiuti da costruzione e demolizione (2016)*, nella *Comunicazione sulle opportunità per migliorare l’efficienza delle risorse nell’edilizia (COM 445/2014)* nonché nel *Pacchetto sull’economia circolare (2015)*. La gestione ottimale dei C&Ds e la loro valorizzazione, come sottolineato dal protocollo, potrebbe creare una vera e propria filiera produttiva, promuovendo nuove figure ed attività imprenditoriali ed un segmento di mercato dedicato alla categoria dei materiali riciclati da C&Ds. Non trascurabile, inoltre, è l’estensione della platea dei portatori di interesse tra i quali non soltanto gli operatori del settore (produttori di materiali ed imprese di costruzione e demolizione) ma anche le Pubbliche Amministrazioni, gli acquirenti dei materiali riciclati ed i soggetti coinvolti nel processo di certificazione di prodotti o di edifici.

Come mostrato in Figura 25, in Italia l’obiettivo, misurato mediante il tasso di recupero e riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione, è stato già raggiunto nel 2011 (74,1%) aumentando rispetto al 2010 di circa il 6%. Nel 2017, secondo quanto consultato sull’annuario ISPRA AMBIENTE, il dato si è attestato al 75,1%. La Direttiva 2018/851/UE ha precisato, infine, che entro il 31 dicembre 2024 la Commissione Europea amplierà gli obiettivi per i rifiuti da costruzione e demolizione, eventualmente differenziandoli per ciascuna delle relative frazioni di materiale.

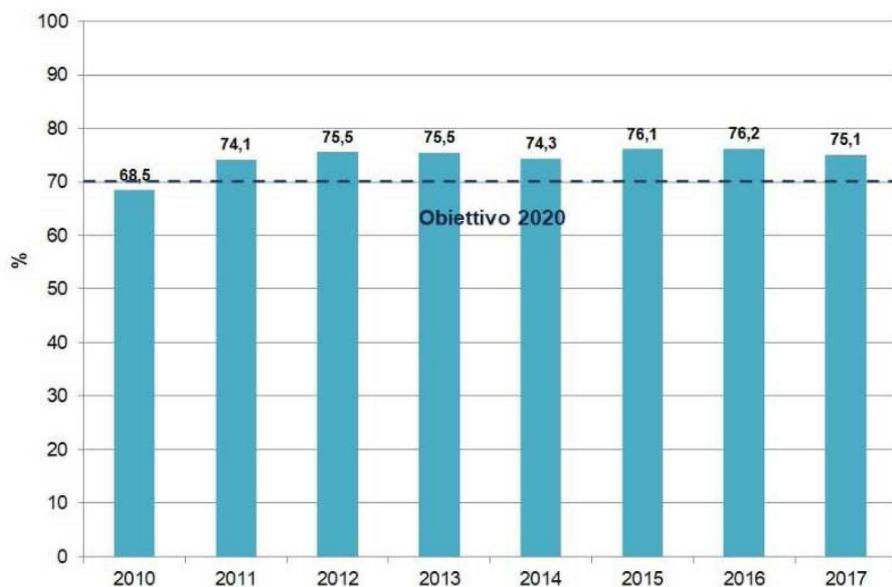


Figura 25. Grafico che riporta in ordinata il tasso di recupero e riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione (%) per gli anni nell'intervallo 2010-2017. Fonte: www.annuario.isprambiente.it, consultazione: 2021.

LE MATERIE PRIME SECONDARIE ED IL PRINCIPIO DELL'END OF WASTE: LA CESSAZIONE DELLA QUALIFICA DI RIFIUTO.

La nozione di Materia Prima Secondaria è stata introdotta nell'ordinamento italiano con la Legge 475/1988 che all'articolo 2 recitava “[...] Sono Materie Prime Secondarie i residui derivanti da processi produttivi e che sono suscettibili, eventualmente previa idonei trattamenti, di essere utilizzati come materie prime in altri processi produttivi della stessa o di altra natura [...]”. Il riferimento, inizialmente mantenuto nel Codice dell'ambiente negli articoli 181 e 181-bis, è stato poi rimosso dalle abrogazioni del D.Lgs. 205/2010. L'intervento normativo di attuazione della Direttiva 2008/98/CE, infatti, ha inserito l'articolo 184-ter ed il concetto di cessazione della qualifica di rifiuto. Secondo la disciplina delle direttive 2008/98/CE e 2018/851/UE un rifiuto può cessare di essere tale quando “[...] è stato sottoposto a un'operazione di recupero, incluso il riciclaggio, e soddisfa i criteri specifici, da adottare nel rispetto delle seguenti condizioni:

- la sostanza o l'oggetto sono destinati a essere utilizzati per scopi specifici
- esiste un mercato o una domanda per tale sostanza od oggetto
- la sostanza o l'oggetto soddisfa i requisiti tecnici per gli scopi specifici e rispetta la normativa e gli standard esistenti applicabili ai prodotti
- l'utilizzo della sostanza o dell'oggetto non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o sulla salute umana [...]

Tuttavia, i criteri specifici ai quali l'articolo fa riferimento per l'ottenimento della certificazione *End Of Waste* non sono stati dettagliati a livello comunitario e dunque

l'applicazione dell'articolo è rimasta soltanto parziale. Pertanto, nelle more, si può fare riferimento alle norme tecniche inerenti alla Materia Prima Secondaria. Come sottolineato da alcuni autori, la Materia Prima Secondaria italiana può dirsi antesignana dell'*End Of Waste* in quanto ha indicato i principi attraverso cui un rifiuto cessa di essere tale e diviene materia prima - intesa come "ingrediente" dei processi produttivi - non vergine. Nella versione attuale del Codice dell'ambiente, pur non essendo mantenuta la definizione di Materie Prime Secondarie contenuta nei previgenti articoli 181 e 181-bis, è invece regolata la nozione di sottoprodotto, ulteriore casistica esclusa dal campo di applicazione della normativa sui rifiuti. È un sottoprodotto e non un rifiuto ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a), qualsiasi sostanza od oggetto che soddisfa tutte le seguenti condizioni:

a) la sostanza o l'oggetto è originato da un processo di produzione, di cui costituisce parte integrante, e il cui scopo primario non è la produzione di tale sostanza od oggetto

b) è certo che la sostanza o l'oggetto sarà utilizzato, nel corso dello stesso o di un successivo processo di produzione o di utilizzazione, da parte del produttore o di terzi

c) la sostanza o l'oggetto può essere utilizzato direttamente senza alcun ulteriore trattamento diverso dalla normale pratica industriale

d) l'ulteriore utilizzo è legale, ossia la sostanza o l'oggetto soddisfa, per l'utilizzo specifico, tutti i requisiti pertinenti riguardanti i prodotti e la protezione della salute e dell'ambiente e non porterà a impatti complessivi negativi sull'ambiente o la salute umana.

La distinzione, spesso non marcata, tra Materia Prima Secondaria e sottoprodotto può essere facilitata dalla *Comunicazione interpretativa in materia di rifiuti e sottoprodotti*, contenente esempi chiarificatori.

Per i C&Ds una delle vocazioni più immediate per l'applicazione del principio dell'*End Of Waste* è quella di riciclo per la produzione di inerti/aggregati. In questo caso, le condizioni - sia come fissate nelle Direttive che come recepite nel Codice dell'ambiente - alle lettere a, b e c sono certamente soddisfatte, per la lettera d occorre verificare preventivamente l'eventuale tossicità del prodotto riciclato. La commercializzazione degli aggregati riciclati è governata, parimenti a quelli naturali, dal Regolamento UE 305/2011 per i prodotti da costruzione che ne fissa i requisiti prestazionali minimi per l'ottenimento della marcatura. Per le definizioni e le tipologie di aggregati riciclati si rimanda al paragrafo 3.3.

CAPITOLO 3 L'EDILIZIA INSOSTENIBILE: GLI INERTI

Il capitolo fornisce informazioni di tipo qualitativo e quantitativo sul consumo degli aggregati nel mondo edilizio e sulle modalità attraverso cui è possibile sostituire gli inerti naturali con quelli riciclati.

Il paragrafo 3.1 apre ad una sintetica trattazione della struttura dei conglomerati e relativi componenti e frazioni volumetriche. Tra gli elementi costituenti malte e calcestruzzi l'attenzione è focalizzata sugli aggregati e sulle proprietà influenzate dalla loro tipologia.

Nel paragrafo 3.2 gli aspetti inerenti alla composizione dei conglomerati è approfondita nella sfera quantitativa. Si fa cenno, infatti, allo strumento di progettazione di miscela dei calcestruzzi ed alle fasi della sequenza operativa dove i fattori legati agli aggregati intervengono e ne condizionano il proporzionamento.

A chiusura del capitolo, nel paragrafo 3.3, infine, si procede alla disamina delle definizioni normative di aggregato riciclato ed industriale, evidenziandone le differenze, le modalità di produzione e di caratterizzazione per la compatibilità ambientale, nonché i campi di impiego generalmente previsti per i prodotti in commento.

Per conglomerato, in edilizia, ci si riferisce ad una pietra artificiale ottenuta miscelando una sostanza legante e del materiale sciolto di matrice litoide. A seconda del meccanismo di fluidificazione del prodotto - per contatto con l'acqua o per riscaldamento - i leganti saranno detti a base d'acqua e termoplastici, rispettivamente. Ad essere di interesse per la presente trattazione sono le malte, la cui formulazione - come i calcestruzzi - impiega leganti a base d'acqua. Quest'ultima, solvente, rende il legante fluido ed assicura la lavorabilità del prodotto che per mezzo di reazioni chimiche innescate tra i componenti diviene solido ed assolve alle diverse funzioni competenti. Le malte e i calcestruzzi, dunque, sono definibili come l'insieme di due sottosistemi, la pasta, ottenuta per miscelazione del legante con l'acqua, e gli aggregati (o inerti). Le reazioni attraverso cui il sistema complessivo perde plasticità e acquista solidità sono di idratazione e coinvolgono il legante. È fondamentale, pertanto, che i componenti siano ben proporzionati così da assicurare allo stato fresco la lavorabilità e nel sistema indurito la giusta distribuzione tra parti piene e vuote tale da garantire le prestazioni demandate al conglomerato. In particolare, è opportuno che la quantità di pasta sia sufficiente a riempire i vuoti tra i granuli degli aggregati e che questi ultimi siano dimensionalmente e geometricamente assortiti in maniera adeguata a scongiurare un'eccessiva porosità del prodotto che lo renderebbe meccanicamente debole. Pur tuttavia, la pasta non deve essere eccessiva nel volume complessivo, pena la tendenza all'innescare di micro-cavillature dovute ai meccanismi di ritiro.

La semplicità della formulazione dei conglomerati sottolinea la centralità della scelta delle materie prime e delle proporzioni, atteso che le innumerevoli combinazioni quantitative risultano in prodotti con caratteristiche altrettanto variabili. Volendo considerare la pasta, ad esempio, la tipologia di legante e la quantità di acqua efficace⁸ sono rilevanti per i meccanismi di presa e di indurimento che avvengono durante l'idratazione. Se i leganti - aerei o idraulici - condizionano l'ambiente di indurimento e successivo esercizio del conglomerato, il rapporto acqua-legante è direttamente influente sulla porosità e dunque sulle prestazioni meccaniche. A parità di legante la percentuale di vuoti è direttamente proporzionale al rapporto ed inversamente proporzionale alle resistenze meccaniche, oltre a rendere progressivamente il materiale più esposto a fenomeni di degrado, riducendone dunque la durabilità [56–59].

⁸ Acqua di idratazione del legante

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Tipicamente, il volume di un conglomerato è occupato tra il 60% ed il 75% dagli aggregati, tra il 10% ed il 15% dal legante e tra il 15% ed il 20% dall'acqua. Sebbene il ruolo degli aggregati possa sembrare di solo riempimento in realtà le loro qualità - oltre alla quantità - influiscono sulle proprietà agli stati fresco ed indurito del conglomerato. Caratteristiche quali la dimensione media dei granuli o la loro distribuzione, la massa volumica, il grado di saturazione e l'assorbimento d'acqua comportano variazioni delle prestazioni della malta o del calcestruzzo e richiedono, a monte, aggiustamenti e diversificazioni della miscela. Nei calcestruzzi, più che nelle malte, l'assortimento granulometrico e la forma degli aggregati sono vincolanti nel delineamento della classe di resistenza: adoperare inerti dimensionalmente più grandi può equivalere a ridurre la quantità di acqua e di cemento, e dunque a risparmiare sul costo complessivo della miscela. Questa circostanza comporta, in aggiunta, il decremento del volume di acqua e della tendenza alla fessurazione da ritiro ma, come prevedibile, peggiora la risposta meccanica. Nelle malte il *range* dimensionale degli aggregati - diversamente dal calcestruzzo - è mediamente limitato alla sabbia, ossia ad un diametro massimo del granulo di 2 mm, pur con delle differenze a seconda della classe di impiego del prodotto. I parametri relativi alla dimensione media dell'aggregato, alla distribuzione negli intervalli granulometrici, alla geometria delle particelle e alle eventuali impurità (quali il contenuto di argilla) sono influenti sulle caratteristiche macroscopiche del conglomerato anche con un assortimento granulometrico contenuto, quale appunto quello delle malte [60].

La quantità di aggregati richiesta per il confezionamento di conglomerati è stimata sui 22 miliardi di tonnellate per anno, circostanza che rende il processo di consumo delle risorse naturali per la loro produzione non più sostenibile. Gli impatti negativi della produzione di aggregati sull'ambiente sono sia primari, si pensi al processo di estrazione o di pulizia dei letti fluviali, che secondari. Le operazioni di trasporto, le emissioni sonore e di polvere per le frantumazioni primaria e secondaria, l'alterazione della biodiversità, il consumo di suolo ed i volumi di materiale di risulta, infatti, sono alcuni dei fattori connessi all'attività estrattiva ma non meno rilevanti nel peso ambientale complessivo [61].

3.2 IL MIX DESIGN DEI CONGLOMERATI

Il concetto di *mix design*, letteralmente progettazione di miscela, nasce per la formulazione dei calcestruzzi, materiali compositi costituiti da una matrice cementizia legante e da una componente di riempimento e rinforzo rappresentata dagli aggregati. Nel calcestruzzo si adopera un legante idraulico, cementizio, prodotto dalla cottura e successiva macinazione del *clinker*-insieme di materiale calcareo ed argilloso- al quale è aggiunta una percentuale in massa di circa il 3% di gesso. A seconda che alla miscela di *clinker* e gesso siano aggiunti o meno ulteriori ingredienti si ottengono cementi *Portland*, *Portland* di miscela, cementi d’altoforno, pozzolanici o compositi, come normato dalla UNI EN 197-1:2011 e riportato nella Figura 26.

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

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

Figura 26. Composizione dei tipi di cemento secondo UNI EN 197-1:2011. Fonte: UNI EN 197-1:2011.

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

La cottura delle materie litoidi calcaree ed argillose, previa macinazione, avviene a temperature superiori ai 1400°C e comporta la progressiva perdita di acqua di impasto e la fusione dei componenti silicei ed argillosi con la conseguente formazione di silicati bi (C_2S) e tri-calcici (C_3S), alluminati tri-calcici (C_3A) e ferro-alluminati tetra-calcici (C_4AF). L'idratazione dei quattro composti elencati avvia le fasi di presa e di indurimento nelle quali i silicati e gli alluminati idrati conferiscono rigidità al materiale. Se gli alluminati e gli allumino-ferriti sono rapidamente reattivi e concorrono alla presa ed allo sviluppo delle resistenze meccaniche nei tempi brevi, i silicati, invece, sono responsabili della fase di indurimento e delle proprietà meccaniche nei tempi lunghi [62].

L'aggiunta degli aggregati è necessaria a contrastare i fenomeni di ritiro e potenziale fessurazione dovuti alla presa ed all'indurimento della matrice cementizia, oltre che a costituire di quest'ultima uno scheletro irrigidente. Gli aggregati sono distinti a seconda dell'origine, naturale, artificiale e riciclata, ovvero in funzione della geometria. In riferimento a tale aspetto, si considera sia la dimensione media del granulo che la sua forma - tondeggianti o angolare - e la tipologia di spigoli, vivi o arrotondati. Ciascuna delle caratteristiche condiziona la distribuzione spaziale dell'aggregato nella matrice e dunque la porosità risultante. Ulteriori parametri influenti sul progetto della miscela sono quelli riguardanti le caratteristiche fisiche e meccaniche degli aggregati, quali la ruvidità della superficie, direttamente proporzionale all'aderenza alla matrice, l'assortimento granulometrico, la porosità e la massa volumica, l'assorbimento d'acqua e le prestazioni meccaniche. L'assorbimento, in particolare, è rilevante per il corretto proporzionamento dell'acqua di impasto affinché ne sia scongiurata la sottrazione da parte degli aggregati [63]. Tale circostanza, infatti, rallenterebbe o impedirebbe l'idratazione del legante e lo sviluppo delle proprietà del conglomerato. Non ultima è la caratterizzazione chimico-mineralogica degli inerti attesa la variabile compatibilità con la matrice cementizia o il contenuto di sostanze potenzialmente pericolose per l'innescò di fenomeni degradativi (solfati, in particolare). Le condizioni di inserimento dell'aggregato nella miscela, peraltro, modificano il proporzionamento dei componenti ed in particolare il dosaggio di acqua. In caso di inerte secco, ad esempio, una frazione dell'acqua di impasto sarà prelevata dall'aggregato in una quantità dipendente dalla sua capacità assorbente ed occorrerà tenerne conto, dunque, in sede di progettazione della miscela. Analogamente, se i pori dell'aggregato dovessero essere saturi di acqua e la sua superficie bagnata, una parte di quest'acqua sarebbe rilasciata in fase di mescolamento. L'alterazione del rapporto acqua-cemento rispetto a quanto pianificato potrebbe ridurre le prestazioni meccaniche e di durabilità del

conglomerato.

La sequenza operativa del *mix design* del calcestruzzo consente di calcolare le quantità di legante, acqua ed aggregati per metro cubo di miscela in funzione di parametri prestazionali di lavorabilità, durabilità e resistenza meccanica, modalità esecutive del getto ed organizzazione del cantiere. Nella formulazione più semplice i fattori che regolano la progettazione di miscela sono la resistenza meccanica del calcestruzzo, la tipologia di legante, la classe di consistenza (parametro di lavorabilità) ed il diametro massimo dell'aggregato [64,65].

La struttura matematica dell'equazione dei volumi schematizza il volume di calcestruzzo come somma di quattro aliquote: il volume di cemento, il volume di acqua, il volume di aria inglobata ed il volume dell'aggregato (Eq.3).

$$V_{cls} = V_A + V_i + V_{AR} + V_c \quad (\text{Eq.3})$$

con:

- V_{cls} , volume di calcestruzzo (m^3)
- V_A , volume di acqua (m^3)
- V_i , volume di inerte (m^3)
- V_{AR} , volume di aria inglobata (m^3)
- V_c , volume di cemento (m^3)

La lavorabilità del calcestruzzo e la tipologia di inerte adoperato condizionano il dosaggio di acqua (V_A). Questo è proporzionale alla classe di consistenza ed alla percentuale di aggregati fini per i quali la superficie da bagnare è più ampia.

La resistenza meccanica ed il tipo di cemento, invece, determinano il valore del rapporto in massa acqua-cemento secondo la legge di Abrams [66] (Eq.4):

$$R = \frac{K_1}{K_2^{a/c}} \quad (\text{Eq.4})$$

con:

- R , resistenza meccanica
- K_1 e K_2 , coefficienti dipendenti dal tipo di cemento
- a/c , rapporto acqua cemento

Secondo tale relazione a parità di tipo di cemento la resistenza meccanica ed il rapporto acqua-cemento sono legati da una proporzionalità inversa di tipo esponenziale, come mostrato in Figura 27:

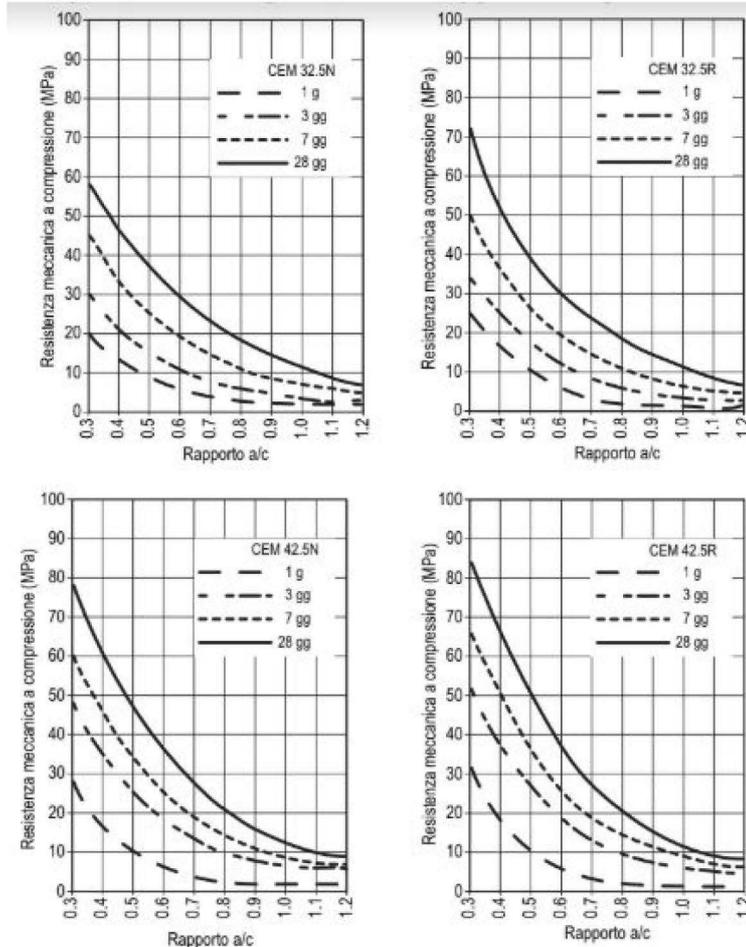


Figura 27. Relazione tra tipo di cemento, resistenza meccanica e periodo di stagionatura. Fonte: www.encosrl.it/dizionario-enciclopedico-del-calcestruzzo-sezione-2/, consultazione: 2021

Sovrapponendo i due fattori e considerando che il volume d'aria è dipendente dal diametro massimo dell'aggregato, si ricavano la massa ed il volume di cemento così da risolvere l'equazione dei volumi in funzione dell'incognita residuale, ossia il volume degli inerti (Eq.5):

$$V_i = V_{cls} - V_A - V_{AR} - \frac{m_A}{a \cdot \rho_C} \quad (\text{Eq.5})$$

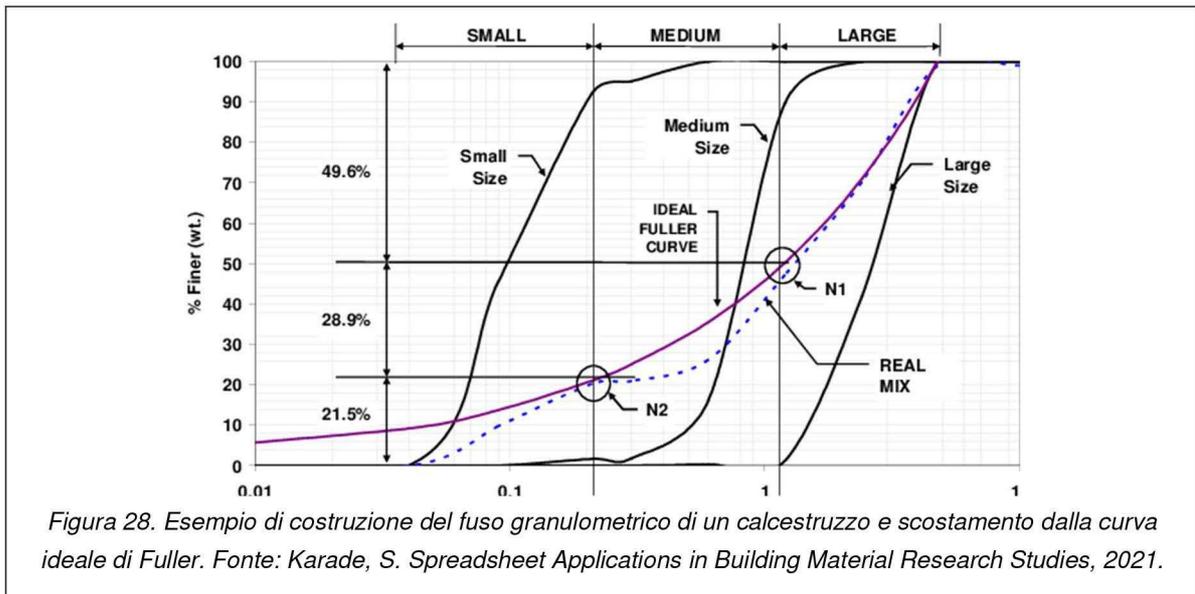
con:

- m_A , massa di acqua per metro cubo (kg)
- a , rapporto in massa acqua-cemento
- ρ_C , massa volumica del cemento

Il calcolo del volume di inerte consente poi di misurare i contributi di ciascun intervallo granulometrico a seconda delle masse volumiche. Il fuso granulometrico degli aggregati del calcestruzzo può essere assortito approssimandone la distribuzione a quella di due curve ideali, di Fuller e di Bolomey, strutturate per garantire la minimizzazione dei vuoti interstiziali tra i granuli. La teorizzazione di Fuller, pur

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

garantendo un calcestruzzo con la minima porosità, è impraticabile dal punto di vista operativo in quanto la massa ottenuta non è lavorabile. La modifica di Bolomey, invece, ha aggiunto un parametro dipendente dalla lavorabilità desiderata così da garantire l'esecuzione del getto. Nella pratica le distribuzioni granulometriche degli aggregati sono costruite per essere tendenti ma non sovrapposte a quelle ideali [67], come riportato in Figura 28.



Si definisce inerte o aggregato riciclato ai sensi della UNI EN 12620:2008 “[...] *l’aggregato risultante dalla lavorazione di materiale inorganico precedentemente utilizzato in edilizia [...]*”. L’aggregato artificiale o industriale, invece, secondo la stessa norma è “[...] *l’aggregato di origine minerale derivante da un processo industriale che implica una modificazione termica o di altro tipo [...]*”. Si precisa che ai fini della presente trattazione i termini aggregato e inerte e gli attributi riciclato ed artificiale sono adoperati come sinonimi.

Tra le numerose applicazioni possibili in campo civile per gli aggregati riciclati le più diffuse sono i sottofondi o gli strati non portanti nelle opere infrastrutturali, i riempimenti di massicciate ovvero il confezionamento di calcestruzzi, secondo le indicazioni delle norme UNI 8520-1:2015 e UNI 8520-2:2016. Le categorie di rifiuti dalle quali si producono gli aggregati riciclati ed artificiali sono principalmente quella dei materiali misti provenienti da operazioni di demolizione ed i volumi risultanti dalle fasi di scavo. In entrambi i casi si tratta di attività edilizie. La gestione dei processi attraverso cui i rifiuti sono recuperati ed impiegati come Materie Prime Secondarie per la produzione degli aggregati riciclati o artificiali è rilevante ai fini dell’ottenimento di un materiale che sia prestazionalmente valido e confrontabile con l’aggregato naturale. Con riferimento ai requisiti ed alle prestazioni degli inerti riciclati, questi si diranno conformi alla UNI EN 12620:2008 laddove il produttore abbia rispettato le procedure di controllo della produzione, classificato le proprietà degli aggregati e dichiarato la conformità. La norma, infatti, definisce le caratteristiche degli aggregati naturali, artificiali o riciclati affinché siano adoperabili per confezionare calcestruzzi conformi alla UNI EN 206-2021. Gli aggregati saranno detti idonei, invece, se i requisiti soddisfatti sono limitati ad uno specifico utilizzo, ad esempio per calcestruzzi ovvero per sottofondi stradali.

Dal punto di vista tecnologico, gli impianti di produzione degli aggregati riciclati o artificiali sono ascrivibili a due macrocategorie, ossia fissi e mobili. A prescindere dalla specificità dell’impianto, in ogni caso, è fondamentale che il materiale sottoposto a trattamento sia preventivamente separabile, così da poter eliminare in maniera agevole e precisa le frazioni non idonee al reimpiego e le impurità e mantenere soltanto quelle effettivamente utilizzabili.

LA TECNOLOGIA DI PRODUZIONE DEGLI INERTI RICICLATI. Le fasi che generalmente caratterizzano la produzione degli aggregati riciclati e artificiali sono la

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

frantumazione, necessaria a portare il rifiuto alle dimensioni desiderate, la separazione, atta a rimuovere gli ulteriori materiali di scarto, ed infine la stacciatura, utile a distribuire il prodotto secondo gli intervalli delle curve granulometriche. La frantumazione si dirà primaria, secondaria e terziaria a seconda che la dimensione media del materiale macinato sia inferiore ai 100 mm, tra 6 e 100 mm o inferiore a 6 mm, rispettivamente.

Il processo di riciclaggio è facilitato qualora il rifiuto sia già preliminarmente e sufficientemente omogeneo: la difficoltà operativa nel recupero dei rifiuti provenienti dalle demolizioni è proprio la variabilità del materiale in ingresso che comporta il dispendio di risorse per le fasi di separazione. Il vantaggio degli aggregati artificiali può essere, al contrario, l'omogeneità della Materia Prima Secondaria e dunque il risparmio sui costi delle operazioni preliminari. Come anticipato, le tipologie di impianti di produzione degli inerti riciclati sono distinguibili in fisse e mobili. Per impianto fisso ci si riferisce a sedi predisposte stanzialmente nei territori cittadini che fungono generalmente da recapito di rifiuti da trasformare entro un raggio di 50 km. Gli impianti mobili, al contrario, sono temporaneamente allestiti presso i siti di costruzione così da attuare il processo di recupero *in situ* e adoperare, a valle delle verifiche di compatibilità e marcatura CE, gli aggregati.

GLI IMPIANTI FISSI. La localizzazione degli impianti fissi di trattamento dei rifiuti per la produzione degli aggregati riciclati è frequentemente quella delle aree di cava attive o dismesse. Generalmente, un sito di questo tipo è scelto dal produttore di rifiuti edili - le imprese di costruzioni, ad esempio - per volumi di scarto di dimensioni non sufficientemente elevate da giustificare l'allestimento temporaneo di un impianto mobile. Considerata la particolarità dei materiali trattati e la possibilità che in essi siano presenti sostanze pericolose, è fondamentale che il gestore dell'impianto attui le severe verifiche previste dalla normativa. Le autorizzazioni abilitanti l'attività degli impianti fissi sono di tipo ordinario o semplificato. Le seconde, pur essendo proceduralmente meno complesse, sono particolarmente stringenti sia nella puntuale definizione delle modalità di recupero, sia nel vincolo all'utilizzo di specifiche categorie di rifiuti - elencati nel D.Lgs. 152/06 - associate ad altrettanto specifici impieghi finali del prodotto riciclato. Come anticipato al paragrafo 2.2, non esiste una disciplina comunitaria dell'*End of Waste* che regola più dettagliatamente le tipologie di rifiuti trasformabili e le procedure di verifica da eseguire per attestare l'idoneità del prodotto finale a sostituire gli inerti naturali.

Lo schema tipo di un impianto fisso, mostrato in Figura 29, consta di sei unità di processo, intendendo con questa espressione la fase più semplice di una filiera per la quale sono qualificabili e quantificabili i flussi in ingresso ed in uscita di materia

ed energia [68]: alimentazione e pre-classificazione (1), frantumazione (2), trattamento dei fini terrosi (3), trattamento delle macerie (4), separazione a secco (5) e movimentazione (6). La prima (1) è finalizzata alla separazione delle parti in legno mediante una vagliatura preliminare e successiva cernita. Il materiale è dunque convogliato in un frantoio dove è sottoposto ad una lavorazione utile a ridurre la pezzatura ad una dimensione tra 0 e 100 mm e poi inviato alla fase di deferrizzazione mediante separazione magnetica (2). La vagliatura che segue la macinazione consente di prelevare le frazioni più fini di materiale e di affinarle ulteriormente per ottenere materiali fini terrosi (3 e 4). Le granulometrie più spesse, invece, sono separate pneumaticamente per eliminare le impurità e le frazioni plastiche e cartacee (5). Gli impianti più complessi dispongono di doppie stazioni di frantumazione e consentono quindi di produrre aggregati più variamente assortiti. A chiusura del processo vi è la fase di movimentazione (6).

GLI IMPIANTI MOBILI. Gli impianti mobili sono allestiti temporaneamente nei siti stessi di produzione dei rifiuti, generalmente nel merito di attività di demolizione e successiva costruzione la cui mole di scarti è tale da ammortizzare i costi necessari all'installazione e al funzionamento dell'impianto. È l'impresa esecutrice delle demolizioni, usualmente, a espletare le fasi preliminari al recupero effettivo del rifiuto, consistenti nella rimozione dei materiali pericolosi, e a pianificare la demolizione stessa affinché la separazione e l'omogeneità dei materiali sia assicurata. Anche gli impianti mobili necessitano di procedure autorizzative all'installazione ed all'attività, secondo la disciplina del D.Lgs. 152/06.

I vantaggi degli impianti mobili sono indubbiamente connessi alla compattezza ed alla possibilità di ottenere un prodotto finale con una granulometria variabile, pur senza ricorrere a tecnologie particolarmente complesse o energeticamente dispendiose. Non ultima è l'eliminazione dei costi di trasporto delle macerie ai siti di riciclaggio. L'impostazione generica di un impianto mobile, come riportato in Figura 30, può essere schematizzata in tre unità di processo: alimentazione e pre-classificazione (1), frantumazione (2) e movimentazione (3). Nel primo stadio si effettuano le operazioni di vagliatura preliminare (1) sottraendo le frazioni leggere (legno, plastica, carta, impurità), indesiderate negli aggregati, per poi procedere alla frantumazione primaria e alla deferrizzazione mediante separazione magnetica (2). In un impianto mobile l'assortimento granulometrico ottenibile è meno ampio rispetto a quello di un allestimento fisso nel quale, come descritto precedentemente, il materiale è sottoposto ad una doppia frantumazione. Una volta allontanate le parti ferrose il prodotto frantumato è movimentato nell'area di cantiere (3).

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

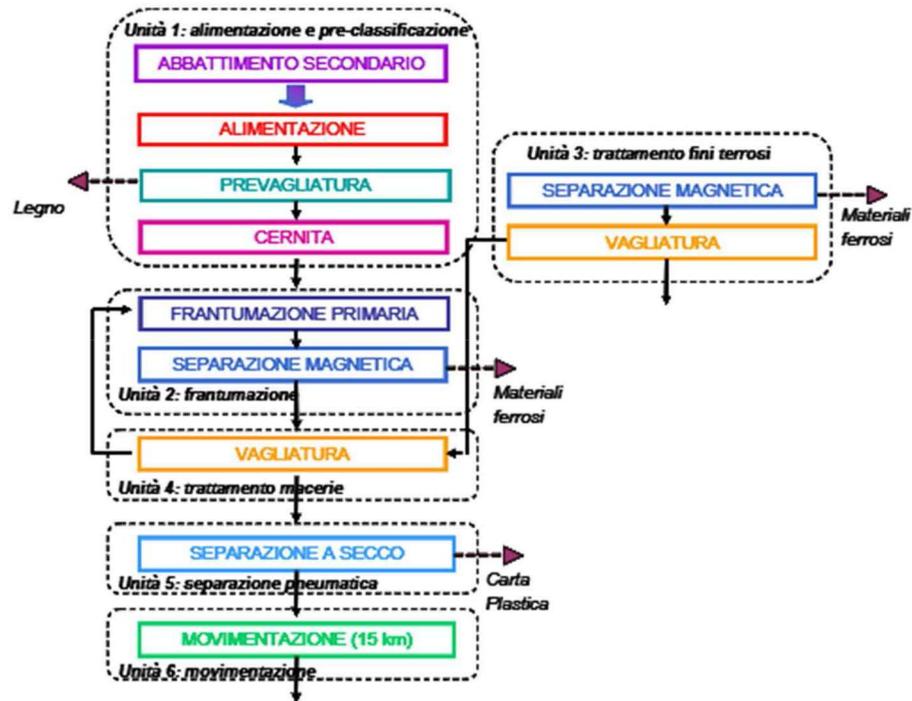


Figura 29. Schema di un impianto di produzione di aggregati riciclati fisso. Fonte: Blengini, G.; Garbarino, E. Demolizione selettiva e riciclaggio nell'ottica del ciclo di vita. 2021, pag. 6.

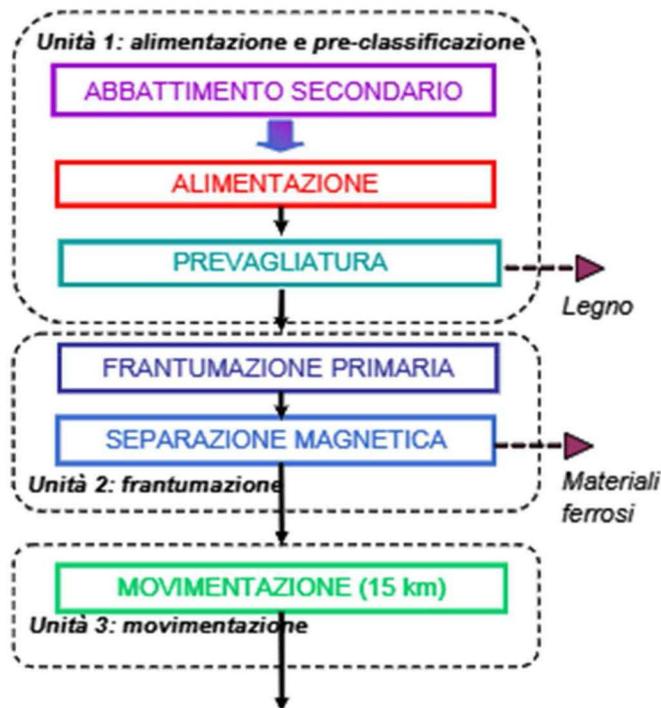


Figura 30. Schema di un impianto di produzione di aggregati riciclati mobile. Fonte: Blengini, G.; Garbarino, E. Demolizione selettiva e riciclaggio nell'ottica del ciclo di vita. 2021, pag. 5.

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Le politiche di incentivazione al riciclaggio dei rifiuti per la produzione di aggregati sono spesso state contestate in merito all'effettivo risparmio - in termini ambientali - associato al processo di recupero dei rifiuti che dovrebbero valerne la preferenza rispetto agli aggregati naturali. Ciò nella considerazione che in taluni casi le operazioni di trattamento necessarie alla trasformazione dei rifiuti in inerti possono essere più impattanti ed energivore di quelle richieste per ricavare gli aggregati dalle materie naturali. In effetti, a pesare sulla sostenibilità del riciclaggio sono le fasi di trasporto dei rifiuti al sito di trattamento e poi da quest'ultimo ai punti di distribuzione. Se questa circostanza è però verosimile per gli impianti fissi, ciò non accade per quelli mobili atteso che la sede di trattamento coincide con quella di produzione del rifiuto. Alcuni autori hanno tracciato un eco-profilo degli aggregati naturali, riciclati in impianto fisso e riciclati in impianto mobile dal quale si è evinto che la mobilità della stazione di trattamento consente - rispetto agli inerti naturali - una riduzione importante del consumo di energia primaria (imprescindibile per i processi estrattivi, ad esempio) e di emissione di gas climalteranti. Meno consistente è, invece, il risparmio sull'acidificazione, sull'eutrofizzazione e sullo *smog* fotochimico [68]. La produzione in un impianto fisso, invece, risulta spesso più impattante a causa dei trasporti, appunto, incidenti nella misura del 50% sui consumi finali [69].

LA COMPATIBILITÀ AMBIENTALE DEGLI AGGREGATI RICICLATI. Affinché un prodotto sia commercializzabile è necessario ne sia verificata la compatibilità ambientale. La certificazione è l'operazione che consente di decretare la cessazione dello stato di rifiuto. Nel caso degli aggregati riciclati originati dalle demolizioni - volendo riferirsi alla definizione normativa - è fondamentale avviare la fase di verifica della contaminazione già in sede di produzione del rifiuto. Una volta conferito all'impianto di trattamento, poi, la normativa prevede che sia espletata sia un'operazione di analisi visiva, atta a rimuovere materiali estranei o tossici che siano visibili ad occhio nudo, che un'ispezione analitica presso laboratori autorizzati. Qualora gli esiti siano positivi il rifiuto può essere accettato e trattato per la produzione dell'aggregato.

Il *test* di cessione, invece, è tra le attività di laboratorio previste dalla normativa per la qualificazione di compatibilità ambientale dell'aggregato, una volta prodotto. La prova misura la lisciviazione di eventuali sostanze tossiche presenti nell'aggregato ponendolo a contatto con l'acqua dopo averlo ridotto ad una granulometria inferiore a 4 mm. L'operazione simula l'effettiva condizione di esercizio dell'aggregato riciclato e quindi il rischio di contaminazione dei comparti suolo, sottosuolo ed acque sotterranee, laddove siano presenti sostanze solubili che abbandonano la sede solida dell'aggregato.

GLI INCENTIVI ALL'UTILIZZO DI AGGREGATI RICICLATI NELLE OPERE

PUBBLICHE. L'incentivo al ricorso ad approcci sostenibili è stato regolato tramite l'articolo 34 del D.Lgs. 50/2016 "*Criteri di sostenibilità energetica e ambientale*" che ha introdotto meccanismi premianti in sede di attribuzione dei punteggi alle offerte che sono connotate da un minore impatto ambientale. Nel caso specifico del comparto edilizio, i Criteri Ambientali Minimi, richiamati nell'articolo citato, sono stati adottati nel DM 11/10/17 "*Criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici*" nel quale al paragrafo 2.4.1.2 si fa esplicita menzione della materia recuperata e riciclata:

"[...] Il contenuto di materia recuperata o riciclata nei materiali utilizzati per l'edificio, anche considerando diverse percentuali per ogni materiale, deve essere pari ad almeno il 15% in peso valutato sul totale di tutti i materiali utilizzati. Di tale percentuale, almeno il 5% deve essere costituita da materiali non strutturali. Per le diverse categorie di materiali e componenti edilizi valgono in sostituzione, qualora specificate, le percentuali contenute nel capitolo 2.4.2. Il suddetto requisito può essere derogato quando il componente impiegato rientri contemporaneamente nei due casi sotto riportati:

1) abbia una specifica funzione di protezione dell'edificio da agenti esterni quali ad esempio acque meteoriche (i.e. membrane per impermeabilizzazione);

2) sussistano specifici obblighi di legge a garanzie minime di durabilità legate alla suddetta funzione. Verifica: il progettista deve fornire l'elenco dei materiali costituiti, anche parzialmente, da materie recuperate o riciclate ed il loro peso rispetto al peso totale dei materiali utilizzati per l'edificio. La percentuale di materia riciclata deve essere dimostrata tramite una delle seguenti opzioni:

- *una dichiarazione ambientale di Prodotto di Tipo III (EPD), conforme alla norma UNI EN 15804 e alla norma ISO 14025, come EPDIItaly® o equivalenti;*
- *una certificazione di prodotto rilasciata da un organismo di valutazione della conformità che attesti il contenuto di riciclato attraverso l'esplicitazione del bilancio di massa, come ReMade in Italy®, Plastica Seconda Vita o equivalenti;*
- *una certificazione di prodotto rilasciata da un organismo di valutazione della conformità che attesti il contenuto di riciclato attraverso l'esplicitazione del bilancio di massa che consiste nella verifica di una dichiarazione ambientale autodichiarata, conforme alla norma ISO 14021.*

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Qualora l'azienda produttrice non fosse in possesso delle certificazioni richiamate ai punti precedenti, è ammesso presentare un rapporto di ispezione rilasciato da un organismo di ispezione, in conformità alla ISO/IEC 17020:2012, che attesti il contenuto di materia recuperata o riciclata nel prodotto. In questo caso è necessario procedere ad un'attività ispettiva durante l'esecuzione delle opere. Tale documentazione dovrà essere presentata alla stazione appaltante in fase di esecuzione dei lavori, nelle modalità indicate nel relativo capitolato. seguire alcuni stralci della norma. [...]"

Tra le specificazioni al paragrafo 2.4.2, tuttavia, non figurano le malte bensì soltanto i calcestruzzi per i quali si precisa che “[...] I calcestruzzi usati per il progetto devono essere prodotti con un contenuto di materiale riciclato (sul secco) di almeno il 5% sul peso del prodotto (inteso come somma delle singole componenti). Al fine del calcolo della massa di materiale riciclato va considerata la quantità che rimane effettivamente nel prodotto finale [...]”.

L'aggregato adoperato nella presente attività di ricerca è inquadrabile come artificiale, nei termini delle definizioni normative, in quanto derivante direttamente da un processo industriale. Ciò comporta che la sua composizione chimica sia costante e precisata preventivamente al trattamento finalizzato al riciclo e che, in aggiunta, una serie di analisi di tossicità e pericolosità siano già espletate sul prodotto dal cui ciclo è originato il rifiuto, ossia il blocco in Calcestruzzo Aerato Autoclavato.

PROVENIENZA E REIMPIEGO DEGLI AGGREGATI RICICLATI. Secondo un'analisi condotta da *Ecocerved* sulla base dei dati presentati annualmente dai soggetti produttori di rifiuti alle Camere di Commercio nel Modello Unico di Dichiarazione ambientale - documento che riporta la quantità e la qualità dei rifiuti prodotti nell'anno precedente - la quantità di Materie Prime Secondarie ricavate dal recupero dei rifiuti nell'anno 2019 è stato di 60 milioni di tonnellate. Gli aggregati riciclati ne hanno assorbito circa il 60%, seguiti dalle Materie Prime Secondarie per l'industria, come metalli, carta e legno, ammontanti a circa il 26%, come riportato in Figura 31.

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

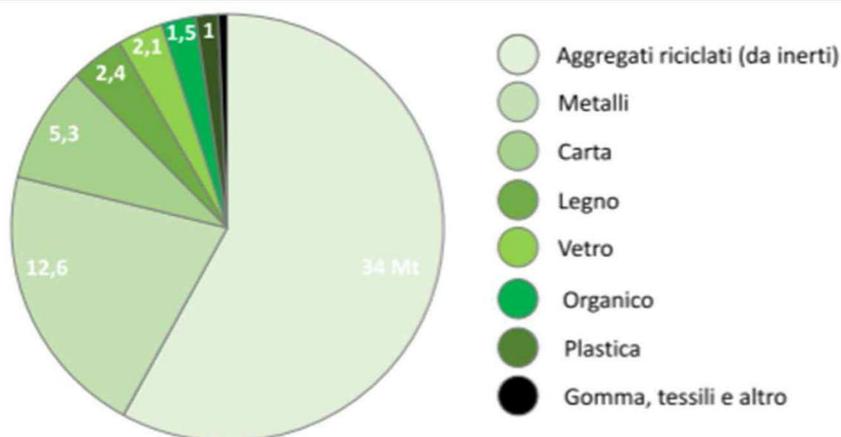
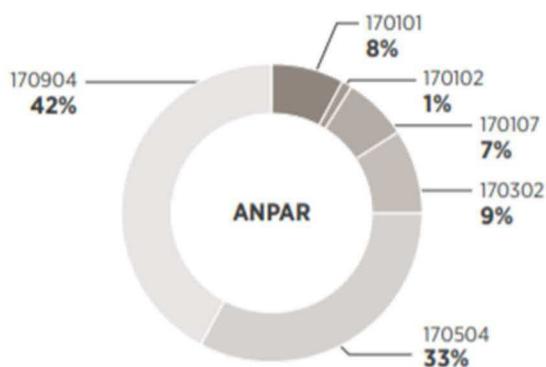


Figura 31. Quantità di MPS prodotte in Italia, per tipologia di MPS nell'anno 2019. Fonte: Ecocerved, consultazione: 2021

L'Associazione Nazionale dei Produttori di Aggregati Riciclati (ANPAR), inoltre, ha elaborato una stima delle percentuali di materiali - divisi per codice identificativo dei rifiuti - conferiti presso gli impianti e destinati alle attività di riciclaggio, riportata in Figura 32 e riferita all'anno 2019. La frazione prevalente è quella dei rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione (42%), seguita da terre e rocce da scavo (33%), miscele bituminose (9%), cemento⁹ (8%), miscugli di cemento⁹, mattoni, mattonelle e ceramiche (7%) ed infine mattoni (1%). Di questi rifiuti giunti agli impianti, poi, la provenienza principale è da piccole demolizioni (59%) e cantieri e grandi demolizioni (22%). Soltanto il 16% del materiale è recapitato da attività industriali.



170101- Cemento; 170102 - Mattoni; 170107 - Miscugli o scorie di cemento, mattoni, mattonelle e ceramiche; 170302 - Miscele bituminose; 170504 - Terre e rocce da scavo; 170904 - Rifiuti misti dell'attività di costruzione e demolizione

Figura 32. Tipologia dei rifiuti gestiti dagli impianti di produzione di aggregati riciclati dell'Associazione Nazionale dei Produttori di Aggregati Riciclati. Fonte: Rapporto L'Italia del riciclo 2020, Fondazione per lo sviluppo sostenibile FISE UNICIRCULAR, pag.167

⁹ Terminologia mutuata dal rapporto, volendo intendere, però, più propriamente "calcestruzzi, massetti e sottofondi cementizi"

PARTE I: IL PANORAMA SCIENTIFICO DI INQUADRAMENTO

Per quanto attiene al campo di impiego del prodotto riciclato, già sinteticamente anticipato, le elaborazioni ANPAR confermano la preminenza del comparto stradale (81%). Il residuale 19% è poi ripartito in maniera disequilibrata tra riempimenti e massicciate (12%), calcestruzzi non strutturali (6,5%) e calcestruzzi strutturali (0,5%). Le percentuali rilevano la ridotta destinazione agli usi legati degli aggregati riciclati - alle malte non è fatta menzione - imputabile sia alla normativa tecnica che prescrive una matrice omo-materiale per gli inerti da calcestruzzo, sia alla scarsa produzione di rifiuti “selezionati” ed omogenei di codice 170101.

ABSTRACT

La **parte II** del testo, costituita da un unico capitolo, ha l'obiettivo di introdurre sinteticamente i due elementi **oggetto dell'attività sperimentale** in commento, ossia le malte e l'aggregato riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato.

Il **paragrafo 4.1**, nello specifico, inquadra le **malte** negli aspetti di interesse per l'attività sperimentale in commento. Dopo la definizione contenuta nella norma di riferimento, il testo approfondisce la trattazione in letteratura della **conducibilità termica** delle malte.

La tipologia di aggregato investigata, infatti, qualificabile come leggera, può essere idonea al confezionamento di prodotti per l'**isolamento termico**, atteso che la prestazione nel campo è direttamente proporzionale alla "leggerezza" della malta. A tale scopo, sono stati riportati alcuni degli approcci disponibili in **letteratura** per la schematizzazione del comportamento delle malte, astrattamente modellate come **sistemi porosi plurifase**, e relativa struttura matematica di calcolo della conducibilità.

Successivamente, sono state analizzate le grandezze fisiche dell'elemento tecnico-malta relazionate con la conducibilità termica, quali **porosità e densità**, per poi concludere con i riferimenti di letteratura alle investigazioni dei rapporti tra le **variabili di miscela** - composizione percentuale, parametri ambientali - e la **prestazione termica**.

A chiusura, sono illustrati sinteticamente

CAPITOLO 4

LE MALTE E L'INERTE RICICLATO IN CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO

4.1 LE MALTE

La norma di riferimento per le malte è la UNI EN 998:2016, parti 1 e 2, che le definisce come “[...] *la miscela di uno o più leganti inorganici, aggregati, acqua ed eventualmente aggiunte e/o additivi [...]*” e distingue le categorie di malte da intonaco e da muratura. Le prime sono tra gli elementi tecnici storicamente più adoperati nell'edilizia e confezionati in diverse modalità a seconda del periodo storico di riferimento. La cultura del rivestimento intonacato si afferma particolarmente nel periodo romano dove l'unione del legante di matrice calcareo-argilloso, della sabbia, dell'acqua e del pigmento di colorazione diviene non soltanto oggetto di applicazione ma anche di trattazioni teoriche di rilevanza, si pensi alle indicazioni Vitruviane sulla stratigrafia degli intonaci. Sempre presso i Romani l'aggiunta di pozzolana alla calce aerea è valsa l'introduzione nel riempimento e nell'allettamento delle murature di un prodotto capace di indurire e mantenere le proprietà anche in ambienti umidi. L'impasto romano può dirsi antesignano delle malte da muratura odierne con l'eccezione relativa al legante cementizio per la cui introduzione occorre attendere sino al XIX secolo.

i contenuti della norma di settore - la **UNI EN 998:2016** - nelle due parti competenti alle **malte da intonaco e da muratura**, richiamandone le definizioni ed i contenuti ritenuti significativi ai fini dei riferimenti successivi presenti nel testo.

Nel **paragrafo 4.2**, invece, muovendo dalla definizione di **materiale cellulare** - categoria di appartenenza dell'aggregato oggetto di sperimentazione - si procede ad illustrare il **processo produttivo del Calcestruzzo Aerato Autoclavato** e le sue proprietà macroscopiche principali.

La sezione conclusiva affronta la tematica dell'**attacco solfatico**, potenzialmente innescato dalla presenza del **gesso** all'interno dell'aggregato riciclato. Allo scopo, dopo una breve disamina della questione si procede a riportare alcuni **riferimenti di letteratura** che hanno indagato la problematica.

Volendo muovere alle formulazioni moderne, la varietà di leganti disponibile - calce aerea, gesso, calce idraulica naturale e cemento - e le loro miscele consentono di ottenere prodotti con prestazioni idonee ad applicazioni diversificate. Le resistenze meccaniche e la rigidità di una malta confezionata con cemento, ad esempio, sono superiori a quelle di un prodotto con calce idraulica naturale, calce aerea o gesso. Ciò dal momento che l'assortimento chimico-mineralogico del legante, le reazioni ed i composti formati a valle dei processi di idratazione influenzano la struttura microscopica della malta. In particolare, i pori dei prodotti idraulici sono generalmente inferiori in volume e dimensione media rispetto a quelli delle malte aeree, oltre che meno interconnessi [57,70-72]. La porosità è poi inversamente proporzionale alle prestazioni meccaniche ed alla conducibilità

termica e direttamente proporzionale alla permeabilità al vapore, proprietà che nel complesso distinguono le malte da muratura e quelle da intonaco. Ciò vale a dire che per gli intonaci - come sarà mostrato con i riferimenti alla parte 1 della UNI EN 998:2016 - una struttura porosa, capace di assorbire e desorbire vapore o umidità può rivelarsi più utile rispetto a finiture compatte, in ragione dei requisiti demandati in campo termo-igrometrico.

LA CONDUCIBILITÀ TERMICA DELLE MALTE. Proprio nel merito delle problematiche inerenti alla trasmissione dell'energia sottoforma calore e del vapore acqueo, di interesse per la presente trattazione attesa la leggerezza dell'aggregato in AAC riciclato, l'approfondimento di questi aspetti per le malte richiederebbe a rigore la valutazione di contributi radiativi, convettivi e conduttivi in virtù della coesistenza di fasi solide e vuote. La malta può essere trattata, infatti, come un mezzo poroso a più fasi essendo costituita da un volume solido V_s e da un volume vuoto V_v riempito con aria o acqua.

LA MODELLAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ: I MODELLI PER SISTEMI POROSI.

Occorrerebbe tener conto, dunque, dei contributi conduttivi della parte solida, convettivi e radiativi della parte vuota, come teorizzato nei modelli a due fasi per sistemi porosi per i quali la conducibilità termica (λ) può essere schematizzata con una combinazione lineare dei termini relativi alle parti solida (λ_s) e vuota (λ_p), come mostrato nell'Eq.6:

$$\lambda = \alpha_1 \lambda_s + \alpha_2 \lambda_p \quad (\text{Eq.6})$$

con:

- λ , conducibilità termica del sistema poroso
- λ_s , conducibilità termica della fase solida
- λ_p , conducibilità termica della fase vuota
- $\alpha_{1,2}$, coefficienti funzione della porosità (v)

I coefficienti di combinazione variano a seconda della complessità del modello, la cui prossimità al comportamento reale dipende dalla percentuale di vuoti presenti e dalla struttura cellulare aperta o chiusa, come riportato nelle Eq.7-9 rappresentative dei modelli di Maxwell-Eucken (Eq.7), di Landauer (Eq.8) e di Hashin-Shtrikman (Eq.9) ciascuno valido per intervalli di porosità specifici.

$$\lambda = \lambda_s \frac{\lambda_p + 2\lambda_s + 2v(\lambda_p - \lambda_s)}{\lambda_p + 2\lambda_s - v(\lambda_p - \lambda_s)} \quad (\text{Eq.7})$$

$$\lambda = \frac{1}{4} \left[\lambda_p(3v - 1) + \lambda_s(2 - 3v) + \left\{ [\lambda_p(3v - 1) + \lambda_s(2 - 3v)]^2 + 8\lambda_s\lambda_p \right\}^{0,5} \right] \quad (\text{Eq.8})$$

$$\lambda = \frac{\lambda_s(\lambda_s + v^{2/3}(\lambda_p - \lambda_s))}{\lambda_s + (\lambda_p - \lambda_s)(\lambda_p^{2/3 - v})} \quad (\text{Eq.9})$$

(Eq.7) valida per $v < 0,15$, (Eq.8) valida per $v < 0,65$, (Eq.9) valida per $v > 0,70$.

La conducibilità termica della parte vuota si pone generalmente pari a quella dell'aria in condizioni di quiete (0,026 W/mK). Tuttavia, per pori di diametro maggiore di 100 μm occorre sommare un contributo radiativo, calcolabile mediante l'equazione di Loeb [73]. Laddove, invece, la dimensione dei vuoti sia inferiore a 500 nm, l'aliquota λ_p è funzione del numero di Knudsen. In ogni caso, lo scambio convettivo legato alla circolazione del gas all'interno dei pori è trascurabile per un diametro medio dei vuoti inferiore a 4 mm [74].

Per la parte solida le aliquote sono due, una prima dipendente dalla conducibilità termica intrinseca dei granuli costituenti la frazione piena, λ_{grain} , ed una

seconda legata al contributo resistivo dei bordi dei granuli. La propagazione del flusso energetico, infatti, avviene attraverso le vibrazioni del reticolo cristallino ed è limitata dalle mutue interferenze delle particelle (*phonon scattering*) che frazionano i percorsi di trasmissione dell'energia termica. Schematizzando, dunque, la struttura di un solido cristallino come reticolo di celle cubiche (Figura 33), i contributi termici sono riconducibili alle celle (λ_{grain}) ed ai bordi dei granuli (R^*) secondo il *brick layer model* [75,76] (Eq.10):

$$\frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda_{\text{grain}}} + nR^* \quad (\text{Eq.10})$$

con:

- λ_s , conducibilità termica della fase solida
- λ_{grain} , conducibilità termica intrinseca dei grani
- n , numero di bordi medio per unità di lunghezza del flusso di energia termica
- R^* , resistenza termica apparente

Il coefficiente n è misurabile mediante immagini SEM¹⁰, fissata una linea di propagazione del flusso (*heat path*), come rapporto tra il numero di particelle presenti nel percorso e la lunghezza occupata dalle parti piene, secondo l'Eq.11:

$$n = \frac{N}{L-P} \quad (\text{Eq.11})$$

con:

- n , numero medio di bordi per unità di lunghezza del flusso di energia termica
- N , numero di particelle presenti lungo la linea di propagazione del flusso
- L , lunghezza della linea di propagazione del flusso
- P , parte di lunghezza della linea di propagazione del flusso occupata da parti vuote

Si comprende, pertanto, che l'aumento della porosità riduce $L-P$ ed aumenta il contributo resistivo dei bordi.

¹⁰ Acronimo inglese dell'equivalente italiano "microscopio elettronico"

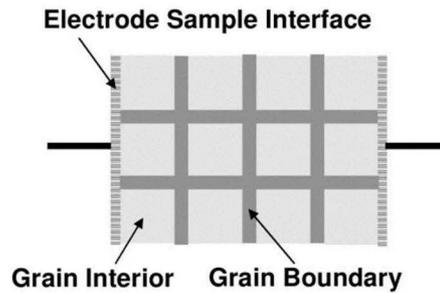


Figura 33. Modello del brick layer: la struttura cristallina è schematizzata come sequenza di grani e bordi dei grani. Fonte: Schmidt, R. *Ceramic Materials Research Trends: Impedance Spectroscopy of Electroceramics*. Novascience Publ. 2007.

La resistenza termica apparente, R^* , è il parametro letto nelle prove effettuate con termoflussimetro in condizioni stazionarie ed è la somma della resistenza intrinseca del materiale testato e della resistenza termica delle piastre entro cui è applicato il gradiente di temperatura (Eq.12).

$$R^* = \frac{s}{\lambda} + R_C \quad (\text{Eq.12})$$

con:

- R^* , resistenza termica apparente
- s , spessore del materiale testato
- λ , conducibilità termica del materiale testato
- R_C , resistenza termica delle piastre del termoflussimetro entro cui è applicato il gradiente di temperatura

I modelli di conducibilità appena citati hanno evidenziato come la porosità influenza la risposta termica non soltanto per la quantità dei vuoti ma anche per la geometria, l'orientamento rispetto al percorso di trasmissione dell'energia e la connessione.

PROPRIETÀ E VARIABILI DI MISCELA INFLUENTI SULLA CONDUCIBILITÀ TERMICA DELLE MALTE. Muovendo al piano della relazione tra la conducibilità termica e le grandezze fisiche della malta, la prestazione termica è funzione della densità, a sua volta legata alla porosità, come riportato in letteratura. Si mostra nell'Eq.13, ad esempio, il risultato della regressione lineare di dati sperimentali ottenuta da de Brito *et al.* [77] che, nell'indagare l'influenza del contenuto di umidità sulla conducibilità di malte da intonaco termico, hanno ricavato una relazione esponenziale tra densità e conducibilità allo stato asciutto:

$$\lambda_{\text{dry}} = 0,0235e^{0,0023\rho_{\text{dry}}} \quad (\text{Eq.13})$$

con:

- λ_{dry} , conducibilità termica in condizioni di asciutto
- ρ_{dry} , densità apparente in condizioni di asciutto

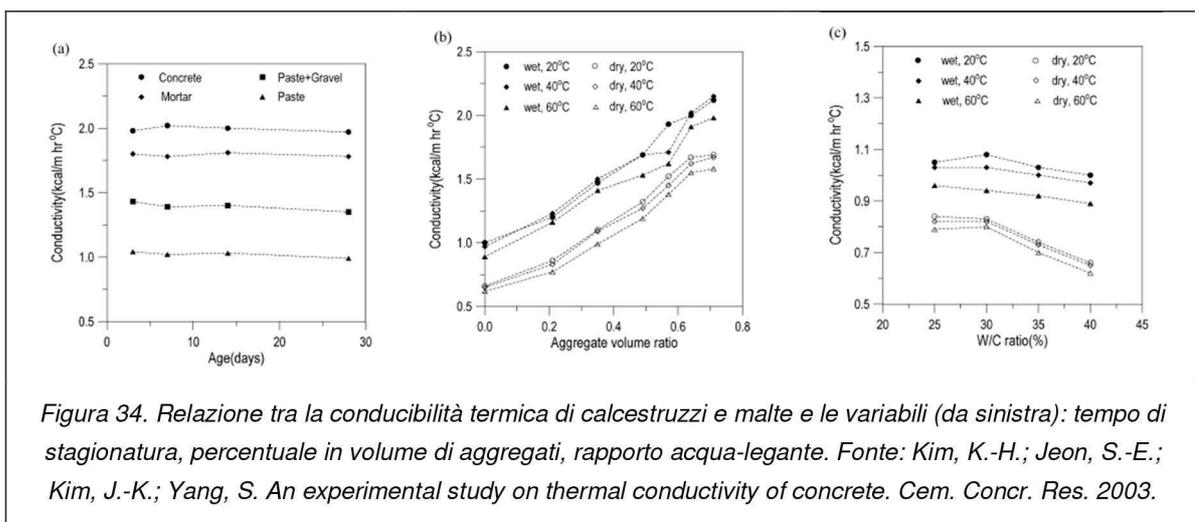
La necessità di considerare, tuttavia, le effettive condizioni di esercizio della malta - diverse da quelle di asciutto - ha spinto a ricercare correlazioni tra il valore ideale, λ_{dry} , e quello effettivo, λ_u , dipendente dall'umidità. Una delle relazioni proposte, riportata nell'Eq.14 e formulata da Holm *et al.* [78], introduce un coefficiente, correttivo ed amplificativo della conducibilità asciutta, dipendente dal contenuto di umidità e dalla densità asciutta.

$$\lambda_u = \lambda_{dry} \left(1 + \frac{b \cdot u}{\rho_{dry}} \right) \quad (\text{Eq.14})$$

con:

- λ_u , conducibilità termica in condizioni di umidità
- λ_{dry} , conducibilità termica in condizioni di asciutto
- b , contenuto di umidità addizionale
- u , contenuto di umidità della malta
- ρ_{dry} , densità apparente in condizioni di asciutto

In ultimo, l'approfondimento delle relazioni tra la prestazione termica ed i componenti della malta - legante, aggregato e acqua - ha evidenziato che la conducibilità è direttamente proporzionale alla percentuale in volume di aggregato e all'umidità dei provini ed inversamente proporzionale al rapporto acqua-legante. Il tempo di stagionatura è, invece, una variabile neutra. La Figura 34 riporta i diagrammi riferiti alla sperimentazione citata, operata da Kim *et al.* [79].



La tipologia di aggregato, peraltro, influenza la risposta della malta non tanto per le sue caratteristiche chimico-mineralogiche e conducibilità, quanto più per le modificazioni della morfologia del conglomerato ad essa associate. Se malte più porose e con vuoti di diametro medio-alto sono generalmente meno conducibili, occorre precisare che l'eventuale presenza di micro-pori di dimensioni inferiori a 20 μm può migliorare la prestazione termica come risultato dell'effetto di *phonon scattering* innescato nelle matrici contenenti un elevato numero di pori di piccole dimensioni [80].

La scelta del legante, a tal proposito, è vincolante sia per le prestazioni meccaniche che per quelle termiche ed igrometriche poiché incide direttamente sulla microstruttura della malta - e dunque sulle grandezze fisiche - ed indirettamente sulle proprietà macroscopiche [70,81]. Le reazioni di idratazione del cemento, ad esempio, portano alla formazione di composti - silicati idrati di calcio, alluminati idrati di calcio e ferro-alluminati idrati di calcio - le cui struttura e disposizione spaziale riducono la percentuale di pori presenti, la dimensione media ed il grado di connessione. I pori prevalenti nella matrice cementizia sono i cosiddetti *pori del gel*, di dimensione compresa tra 1 e 10 nm, interstiziali tra le lamelle di silicati e non modificabili nella quantità. La porosità capillare, di diametro tra 10 e 50 nm, è invece controllabile tramite il rapporto acqua-cemento. Se si confrontano le immagini al microscopio di malte confezionate sostituendo in progressione la calce aerea con il cemento, si osservano modifiche nella forma dei pori, nel volume complessivo e nel diametro medio (Figura 35). La malta confezionata con calce aerea, infatti, presenta prevalentemente macro-pori sferici di dimensioni medie di 5 μm con pori cilindrici di interconnessione. La struttura è dipendente ancora una volta dai prodotti di indurimento: le interconnessioni sono i percorsi di frattura che si originano all'atto di formazione della calcite. La sostituzione con il cemento, come anticipato nei periodi precedenti, riduce la porosità, la dimensione media dei vuoti e il grado di connessione. La calce idraulica, infine, esibisce un comportamento più vicino a quello del cemento che a quello della calce aerea [82].

L'aggregato, tuttavia, è il componente che modifica in misura maggiore la densità e la porosità della malta poiché ne cambia la microstruttura sia in funzione della percentuale inserita che della distribuzione granulometrica. Generalmente, il volume di aggregato inserito - specie se leggero - è direttamente proporzionale alla porosità ed inversamente proporzionale alla densità.

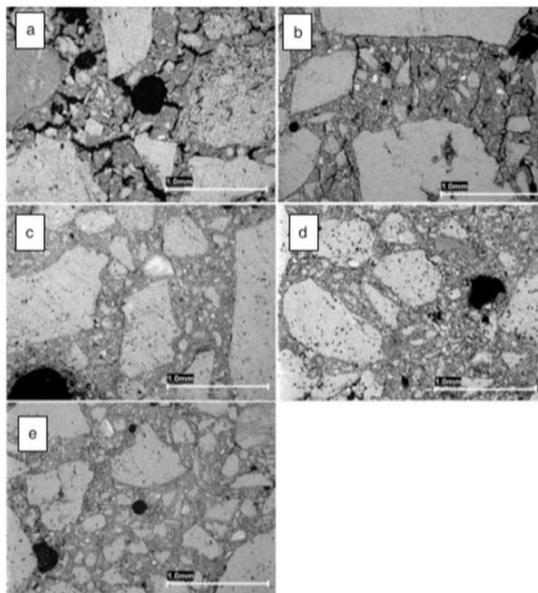


Figura 35. Immagini al microscopio elettronico di malte confezionate con calce aerea (a), calce aerea e cemento in proporzione di massa 8:1 (b), calce aerea e cemento in proporzione di massa 6:3 (c), calce aerea e cemento in proporzione di massa 4,5:4,5 (d), calce idraulica naturale (e). Fonte: Mosquera, M.J.; Silva, B.; Prieto, B.; Ruiz-Herrera, E. Addition of cement to lime-based mortars: Effect on pore structure and vapor transport. *Cem. Concr. Res.* 2006.

LA CLASSIFICAZIONE SECONDO LA UNI EN 998:2016. La norma è organizzata in due parti, la prima dedicata alle malte da intonaco e la seconda alle malte da muratura. Trattandosi di una norma di prodotto identifica i requisiti, le metodologie di prova, le modalità di controllo della produzione ed il livello di attestazione per la marcatura CE che rendono la malta commerciabile ed impiegabile.

La UNI EN 998-1:2016 si applica specificamente a “[...] malte per intonaci interni ed esterni a base di leganti inorganici prodotte in fabbrica per l'utilizzo in pareti, soffitti, colonne e partizioni. Contiene definizioni e requisiti prestazionali finali. Non si applica alle malte aventi come legante principale il solfato di calcio. [...]”. Le malte sono distinte in malte a composizione prescritta o a prestazione garantita, a seconda che sia fissata o meno la ricetta per la formulazione. In base alle modalità di produzione, invece, si qualificano come prodotte in fabbrica, semifinite prodotte in fabbrica o prodotte in cantiere ed in funzione delle proprietà o all'utilizzo come malte per scopi generali per intonaci interni ed esterni (GP), malta leggera per intonaci interni ed esterni (LW), malta colorata per intonaci esterni (CR), malta monostrato per intonaci esterni (OC), malta per risanamento (R) e malta per isolamento termico (T). I requisiti sulle caratteristiche della malta allo stato fresco che la norma introduce

sono il tempo di lavorabilità ed il contenuto d'aria. Per la malta indurita, invece, si precisa che “[...] campi di utilizzo e condizioni di esposizioni diversi richiedono malte con caratteristiche e livelli prestazionali diversi. A tale scopo la resistenza a compressione, l'assorbimento d'acqua e la conducibilità termica devono essere classificati secondo il prospetto 1. Le caratteristiche pertinenti l'utilizzo previsto e il tipo di prodotto devono essere dichiarate secondo il prospetto 2 e soddisfare i requisiti in esso specificati [...]”. Nel prospetto 1 sono indicati i quattro intervalli di resistenza a compressione ed i limiti sull'assorbimento di acqua per capillarità e sulla conducibilità termica, riportati in Tabella 1:

Tabella 1. Prospetto 1 della norma UNI EN 998-1:2016.

Proprietà	Categorie	Valori
Resistenza a compressione a 28 giorni (MPa)	CS I	da 0,4 MPa a 2,5 MPa
	CS II	da 1,5 MPa a 5,0 MPa
	CS III	da 3,5 MPa a 7,5 MPa
	CS IV	> 6,0 MPa
Assorbimento d'acqua per capillarità	W0	Non specificato
	W1	$C \leq 0,40 \text{ kg/m}^2 \text{min} 0,5$
	W2	$C \leq 0,20 \text{ kg/m}^2 \text{min} 0,5$
Conducibilità termica	T1	$\lambda \leq 0,1 \text{ W/mK}$
	T2	$\lambda \leq 0,2 \text{ W/mK}$

C, coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità; λ , conducibilità termica.

Il prospetto 2 riporta, invece, le specificazioni per le diverse categorie di malte e le norme che ne regolano le misurazioni. Si pensi, ad esempio, alle malte da risanamento (R) per le quali è necessario che, oltre alla resistenza a compressione compresa tra 1,5 e 5 MPa, il valore del fattore di resistenza al vapore acqueo sia inferiore a 15 e l'assorbimento di acqua per capillarità a 24 ore sia superiore a 0,3 kg/m² pur con un'altezza di risalita inferiore a 5 mm. Le specificazioni di prestazione per le malte per l'isolamento termico, ancora, riguardano la compressione (categoria da CS I a CS III), l'assorbimento d'acqua limitato alla categoria W₁, il fattore di resistenza al vapore acqueo minore di 15 e la conducibilità termica misurata al più pari a 0,20 W/mK.

L'oggetto della UNI EN 998-2:2016 è la categoria delle malte da muratura “[...] prodotte in fabbrica (riempimento, collegamento e allettamento) per l'utilizzo in pareti, colonne e partizioni di muratura (per esempio murature esterne ed interne, strutture di muratura portante e non portante per l'edilizia e l'ingegneria civile) [...]”. Anche in questo caso valgono le distinzioni tra prestazione garantita e composizione prescritta e quelle relative alle modalità di produzione. Con riferimento alle proprietà e all'utilizzo, invece, i prodotti sono classificati come malte da muratura per scopi generali (G), a strato sottile (T) - se progettate con una dimensione massima

dell'aggregato minore o uguale al valore indicato al punto 5.5.2 della norma, pari a 2 mm - e leggere (L), se progettate con una massa volumica a secco minore del valore al punto 5.4.5 della norma, pari a 1300 kg/m³. Il parametro di resistenza a compressione, in questo caso, individua sei classi, riportate nel prospetto 1 della norma, ed indicate come M1, M2,5, M5, M10, M15, M20. Il numero rappresenta la resistenza a compressione minima della malta perché sia qualificabile secondo la suddetta classificazione.

Diversamente dalle malte da intonaco, per le malte da muratura la norma prevede che qualora se ne ipotizzi l'utilizzo in elementi soggetti a requisiti termici si ci può riferire al prospetto A.12 della UNI EN 1745:2020 per il calcolo tabellare della conducibilità termica media in condizioni di asciutto, senza la misurazione diretta.

4.2 L'AGGREGATO: IL CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO COME RIFIUTO-RISORSA

I MATERIALI CELLULARI. DEFINIZIONE E TIPOLOGIE.

L'attività sperimentale oggetto della presente ricerca è stata condotta utilizzando, come già precisato nei paragrafi precedenti, un aggregato proveniente dallo scarto della produzione dei blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato GASBETON® di cui si mostra un esempio in Figura 36.



Questo materiale, cui nel seguito si farà riferimento come AAC, dall'inglese *Aerated Autoclaved Concrete*, è ascrivibile alla categoria dei prodotti cellulari, anche detti schiume, l'impiego dei quali è progressivamente aumentato negli ultimi anni grazie all'ampia gamma di prodotti conseguente alla possibilità di progettarne le caratteristiche a seconda dei requisiti richiesti. La geometria, la dimensione delle celle ed il loro rapporto in proporzione al volume totale del sistema, parametri che influenzano la porosità del prodotto, sono infatti controllabili e conferiscono proprietà macroscopiche interessanti per numerose applicazioni. Si pensi, ad esempio, all'elevata rigidità e resistenza al fuoco combinate al basso peso specifico ed alla bassa conducibilità termica [83]. Tra i materiali cellulari di sintesi più adoperati nel mondo dell'edilizia figurano quelli polimerici, commercializzati dagli anni '40 del ventesimo secolo, alla cui esperienza hanno fatto seguito i tentativi, poi divenuti processi standardizzati, di espansione di ceramici, metalli, vetri e conglomerati.

Per definizione, i materiali cellulari - o schiume - sono sistemi fisicamente e chimicamente eterogenei in cui due fasi, una delle quali gassosa, coesistono. La dispersione del gas può avvenire sia in un liquido che in un solido, tuttavia più correttamente ci si riferisce alle schiume quando la sostanza gassosa è inserita in un

liquido. La fase liquida è però spesso una condizione transitoria del processo produttivo dei materiali cellulari, seguita da una solidificazione che genera la schiuma solida, più comunemente detta *solido cellulare* [84].

A diversificare un calcestruzzo cellulare, quale appunto è l'AAC, dal calcestruzzo tradizionale è soprattutto la presenza - tra le materie prime - dell'agente necessario a realizzare l'espansione, poiché i restanti materiali utilizzati per la produzione sono quasi completamente uguali (legante, inerte ed acqua). Ulteriori differenze sono la struttura, molto porosa, a celle contenenti aria, la proporzione tra i componenti, il ricorso ad un legante misto cemento-calce e la granulometria dell'inerte il quale per i calcestruzzi cellulari è costituito soltanto da sabbia.

Il processo di espansione si realizza inserendo un agente espandente - fisico o chimico - all'interno dell'impasto semifluido ottenuto mescolando le polveri con l'acqua. Una prima distinzione nell'ambito dei calcestruzzi cellulari legata alla tecnica di espansione, cui consegue una diversa dimensione dei pori, è tra struttura aerata o schiumata e struttura microporosa. Nel primo caso, il ricorso ad aria, schiume o agenti espandenti chimici determina una porosità diffusa e di dimensioni maggiori rispetto a quella ottenuta con l'impiego di materiali reagenti secondo processi alcali-silice [85]. Gli agenti espandenti fisici sono generalmente sostanze già gassose o schiume preformate introdotte nell'impasto, quelli chimici, invece, sono prodotti che per decomposizione termica o per reazione con i materiali presenti nel sistema fluido liberano gas. Nella determinazione della geometria cellulare finale sono altresì fondamentali i processi di maturazione e stagionatura - in condizioni di umido o di secco, con vapore o senza, eventualmente in autoclave - tramite cui sfruttare l'insorgenza delle tensioni legate all'indurimento per creare i pori stessi [85]. Generalmente, si preferisce adoperare gli agenti aeranti fisici per calcestruzzi da stagionare all'aria, quelli chimici per le maturazioni in autoclave.

La Figura 37 riporta una possibile classificazione dei calcestruzzi cellulari in funzione della natura dei pori, degli agenti espandenti e delle condizioni di preparazione e successiva stagionatura. Le tecniche che fanno uso delle sostanze schiumogene (*foaming agents* in Figura 37) consentono di ottenere prodotti più performanti meccanicamente, pur con delle variazioni a seconda della tipologia e quantità di agente schiumogeno, oltre che della sua modalità di produzione [86].

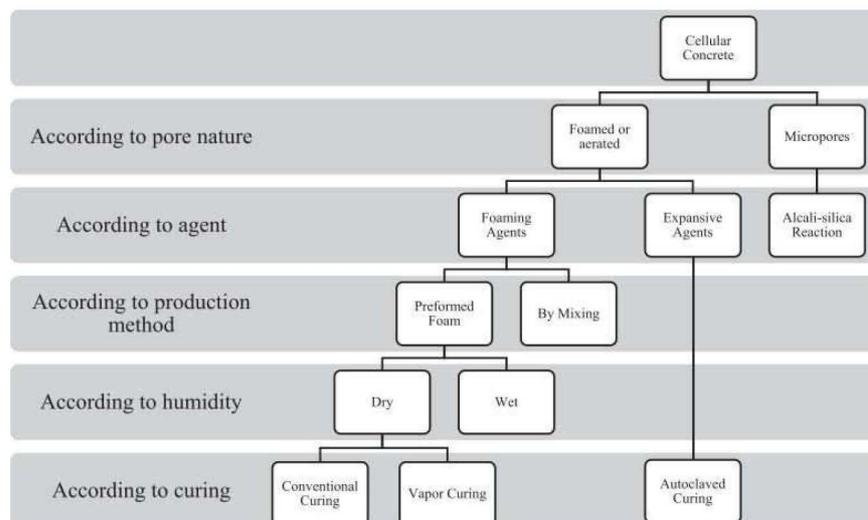


Figura 37. Classificazione dei calcestruzzi cellulari in funzione della natura di pori, dell'agente espandente, del metodo di produzione e delle condizioni di preparazione e stagionatura. Fonte: Chica, L.; Alzate, A. Cellular concrete review: New trends for application in construction. Constr. Build. Mater. 2019, 200, p.639.

In condizioni secche la dimensione dei pori è contenuta entro 1 mm di diametro e questo facilita le operazioni di inserimento della schiuma stessa nel conglomerato, laddove si ricorra ad un agente espandente fisico. In condizioni umide, invece, i pori sono più ampi - diametro tra i 2 ed i 5 mm - ed il prodotto finale è più leggero ma può essere meno stabile. In ogni caso, il ricorso a schiume preformate garantisce un controllo maggiore del processo in virtù della relazione quantitativa esistente tra la dose di agente impiegato ed il volume di aria intrappolata [85].

La presente attività di ricerca, con riferimento alla classificazione riportata in Figura 37, ha adoperato un calcestruzzo, di cui si procede a descrivere il processo produttivo, aerato mediante un agente espandente chimico e stagionato in autoclave.

IL CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO. PROCESSO PRODUTTIVO.

Il processo produttivo dell'AAC impiegato nella ricerca, come direttamente visionato in occasione di una visita effettuata presso lo stabilimento produttivo dell'azienda EKORU, titolare del marchio GASBETON®, sito in Volla (NA), con la quale è stato siglato un accordo di collaborazione scientifica, è articolato su quattro fasi essenziali:

- preparazione delle materie prime
- esecuzione del getto
- lievitazione e taglio
- maturazione in autoclave

A queste, seguono le procedure propedeutiche alla commercializzazione del prodotto, ossia il controllo qualità, il confezionamento e lo stoccaggio.

Trattandosi di un calcestruzzo, l'AAC è prodotto mescolando un legante con acqua ed inerte. Per il GASBETON® si utilizzano un legante di miscela (cemento e calce), della sabbia silicea, del gesso come regolatore della presa ed una percentuale di materiale riciclato, direttamente prelevato dallo sfrido conseguente all'operazione di taglio dei blocchi. L'agente espandente è di tipo chimico e costituito da una polvere di alluminio. Pur con delle variazioni dipendenti dalla densità del prodotto che si intende ottenere, e dunque dalle prestazioni meccaniche e termiche desiderate, i componenti secchi sono generalmente così proporzionati in massa:

- sabbia silicea, tra 60 e 70%
- cemento, tra 15 e 25%
- calce, tra 5 e 15%
- gesso, tra 2 e 5%
- polvere di alluminio, tra 0,05 ed 1%.

Il rapporto acqua-componenti secchi è invece tra 50 e 75%.

Il contenuto di idrossido di calcio totale - componente reagente con l'alluminio - è il parametro di dosaggio in funzione del quale sono fissate le dosi di calce e cemento, unici ingredienti che lo contengono. A seconda della densità o specularmente della porosità del prodotto, poi, si determinano la quantità di sabbia, di materiale riciclato e di agente espandente, ed infine l'acqua di impasto tramite il rapporto acqua/polveri. È fondamentale, per questo ultimo parametro, considerare l'acqua contenuta nella sabbia e nel materiale riciclato.

Prima della miscelazione con i leganti e l'acqua, infatti, la sabbia è sottoposta ad una macinazione ad umido e successivo stoccaggio anti-sedimentazione. I diversi componenti sono dunque dosati, omogeneizzati ed impastati con l'acqua per procedere all'esecuzione del getto. L'aggiunta di alluminio alla miscela semiliquida attiva il processo di lievitazione dell'impasto. La polvere metallica, infatti, reagisce in ambiente umido con le componenti alcaline dell'impasto formando alluminio idrato di calcio e liberando idrogeno gassoso, conferendo così la struttura a bolle tipica dei prodotti cellulari. È fondamentale dosare in modo preciso l'agente chimico poiché influisce sulla quantità di aria intrappolata e quindi sulle caratteristiche del prodotto indurito. Inoltre, la fase di aggiunta deve essere calibrata in modo da attivare le reazioni in un tempo sufficientemente lungo a non farle avvenire nel miscelatore, dove il movimento impedirebbe la formazione di bolle. La fase di espansione, di durata media di due ore, è conclusa quando la massa colata nelle vasche ha raggiunto un sufficiente livello di indurimento e solidità, dovuto alle reazioni di presa dei leganti, e può essere sagomata prima della maturazione in autoclave. Nella

struttura semi-solida l'idrogeno prodotto dalle reazioni è quindi liberato ed i pori riempiti di aria.

Il taglio in blocchi è la prima fase della catena produttiva che genera uno sfrido di materiale: i residui semi pulverulenti della rifilatura dei bordi e della sagomatura sono raccolti, macinati e reinseriti nel processo, secondo un meccanismo virtuoso di recupero di una sostanza altrimenti destinata al conferimento in discarica. I blocchi sono a questo punto inseriti in autoclave per la stagionatura a temperatura, pressione e umidità controllate. Se la maturazione avvenisse in condizioni ambientali ordinarie, come per i calcestruzzi tradizionali, l'idratazione coinvolgerebbe i soli leganti e formerebbe la massa gelatinosa del gel di cemento. Lo stazionamento in un ambiente saturo di vapore a temperatura di circa 200° e pressione di circa 10 bar, invece, catalizza reazioni di indurimento che coinvolgono anche la parte più fine dell'aggregato siliceo ed i materiali calcarei. I prodotti di queste reazioni hanno una struttura microcristallina con una superficie specifica molto inferiore rispetto a quella dei calcestruzzi ordinari. Questa geometria conferisce stabilità alla massa di calcestruzzo che sviluppa un'elevata resistenza alla compressione pur con la leggerezza della struttura porosa. Il volume della massa al termine della maturazione in autoclave, infatti, è quasi duplicato rispetto alla fase del mescolamento ed è per l'80% circa occupato da pori - 50% macroscopici, 30% microscopici - e per il restante 20% da materiale solido [87].

La proporzione tra parti piene e parti vuote rende l'AAC particolarmente sostenibile in quanto il rendimento in termini di consumo di materie prime e di prodotto finito è di 1 a 4. Ancora, parte dell'acqua di condensa in uscita dall'autoclave, già ad una temperatura di circa 100°, è recuperata ed impiegata come acqua di processo. Inoltre, il materiale è interamente riutilizzabile come Materia Prima Secondaria del suo stesso processo produttivo. Di quest'ultimo, il consumo di energia totale (comprese le aliquote connesse alla produzione delle materie come leganti ed agente espandente), stimato in media di 1500 MJ/t a fronte di una densità del prodotto di 500 kg/m³, è di circa un terzo inferiore a quello di altri materiali per le costruzioni quali i laterizi [87].

IL CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO. PROPRIETÀ MACROSCOPICHE.

La quasi totalità delle proprietà dell'AAC dipendono dalla porosità della struttura. La presenza di pori saturi di aria ferma garantisce l'alleggerimento del prodotto, riducendosi di molto la massa dell'unità di volume. I valori di densità nelle condizioni di asciutto dei blocchi in AAC, infatti, spaziano da 300 a 600 kg/m³ e sono quindi tra un quarto ed un sesto di quelli dei materiali lapidei naturali ed artificiali tradizionalmente impiegati nell'edilizia (si pensi ai laterizi o al calcestruzzo ordinario).

La ridotta densità conferisce al prodotto ottime prestazioni in campo di isolamento termico, con valori tra 0,07 e 0,13 W/mK, poiché la conducibilità termica è direttamente proporzionale alla densità. Non ultime le buone resistenze al fuoco e meccanica, considerato il ridotto peso del blocco. Di converso, la porosità rende il materiale permeabile sia al vapore acqueo - la qual cosa può considerarsi positiva laddove si intenda progettare stratigrafie traspiranti - che ai liquidi.

I pori, come anticipato, sono ascrivibili alle classi dimensionali dei macropori e dei micropori. I primi, anche detti *pori dell'aria* o *pori artificiali*, sono quelli indotti dal processo di espansione/lievitazione, più evidenti, di geometria quasi sferica e, nel *range* di densità del prodotto citato in precedenza, di diametro compreso tra 0,5 e 3 mm e distanza media di 1 mm. Poiché a differenziare la densità è proprio il numero dei pori dell'aria, nei prodotti più leggeri la distanza tra i pori tende a ridursi fino a renderli tangenti oppure, in alcuni casi, interconnessi [55], come mostrato nella Figura 38.

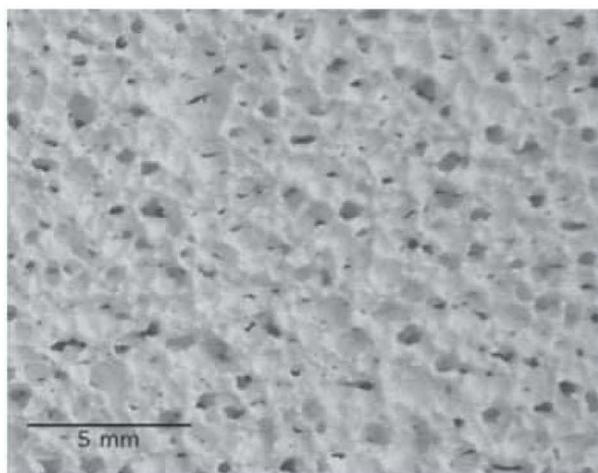


Figura 38. Pori dell'aria del Calcestruzzo Aerato Autoclavato. In: Schober, G. Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. Cem. Wapno, Bet. 2011, p.352.

I micropori, invece, sono contenuti nella matrice cementizia che avvolge i pori dell'aria e si originano negli spazi occupati dall'acqua poi sottratta dalle reazioni di presa ed indurimento oppure dalle particelle di quarzo poi dissolte durante la fase di maturazione in autoclave o ancora come vuoti inter-granulari tra i cristalli di silicati idrati di calcio [88]. Per questi motivi, le dimensioni medie del diametro, molto contenute, oscillano tra 0,5 e 3000 μm , come sintetizzato nella Figura 39.

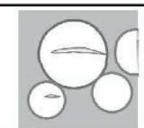
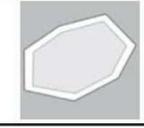
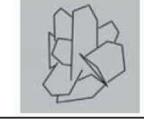
	Size range, diameter/ μm	Description	Trivial names
	100 - 3000	Artificial gas pores generated by hydrogen from aluminium reaction (in some cases foam pores) with expanding crack structure	Air pores, Gas pores, "macro pores"
	5 - 30	Residual pore space of initially water filled volume	Water pores, Inter cluster pores, "micro pores"
	10 - 50	Holes as residuals of dissolved quartz particles, Hollows around residual quartz grains	Quartz grain related pores, "micro pores"
	0.5 - 20	Pore volume between new formed large crystals of tobermorite	Inter particle pores, Tobermorite related pores, "micro pores"

Figura 39. Microporosità del Calcestruzzo Aerato Autoclavato: classificazione. In: Schober, G. Porosity in autoclaved aerated concrete (AAC): A review on pore structure, types of porosity, measurement methods and effects of porosity on properties. Cem. Wapno, Bet. 2011, p.355.

Il volume degli uni e degli altri dipende dal dosaggio della miscela ed in particolare dalla quantità di alluminio e di leganti. L'agente aerante, infatti, impatta sui macropori, i leganti, per tramite dei silicati idrati di calcio prodotti nelle fasi di indurimento, sui micropori. La densità del prodotto e le proprietà macroscopiche ad essa correlate - come resistenza meccanica e conducibilità termica - sono governate dai pori dell'aria la cui frazione volumetrica è del 75% nei prodotti più leggeri (densità di circa 300 kg/m^3) e del 30% in quelli più pesanti (densità di circa 800 kg/m^3) [89]. I silicati idrati di calcio, invece, regolano la cristallinità della struttura solida e quindi le prestazioni meccaniche, la stabilità dimensionale e la durabilità, soprattutto in termini di resistenza alla carbonatazione. In presenza di strutture debolmente cristalline la fase prevalente è quella di un composto intermedio tra il gel di cemento e la tobermorite, indicato come C-S-H(I), avente un rapporto CaO/SiO_2 di 0,83. La variabilità del contenuto di calcio, silice ed acqua, tipico di questo solido amorfo, lo espone a fenomeni di instabilità dimensionale. Poiché occorre evitare la formazione di strutture siffatte e catalizzare quelle più cristalline, invece, si inserisce il gesso (contenente solfato di calcio) come regolatore della presa e come catalizzatore della tobermorite, un silicato idrato di calcio particolarmente stabile e cristallino [90]. La percentuale di tobermorite sui silicati di calcio idrati totali, calcolabile mediante l'esecuzione di un'analisi diffrattometrica ai raggi X, è sovente impiegata come parametro di misura della cristallinità dell'AAC.

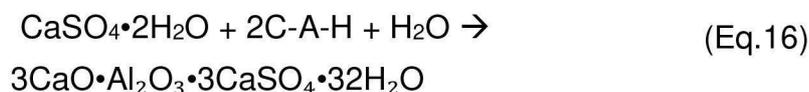
IL GESSO E L'ATTACCO SOLFATICO. Nella trattazione in commento è stata approfondita la presenza del gesso (solfato di calcio diidrato) nel Calcestruzzo Aerato Autoclavato, in quanto specie chimica contenente gruppi solfatici. L'attacco solfatico, infatti, è annoverato tra le cause principali di degrado del calcestruzzo e pertanto si è ritenuto opportuno analizzarne i meccanismi estendendone i paradigmi alle malte. Ad innescare il fenomeno è l'interazione in ambiente umido tra gli ioni solfato SO_4^{2-} ed i composti a base di calcio e di alluminio presenti nella matrice cementizia [91]. Laddove la reazione avvenga nelle fasi seguenti la preparazione della miscela e dunque in un sistema plastico, l'ettringite formatasi - detta primaria - non cagiona effetti negativi ed anzi, rallentando la presa mediante il suo deposito attorno all'alluminato tricalcico, rende possibile le operazioni di getto scongiurando la perdita di lavorabilità eccessivamente rapida. Tale è il motivo per il quale si adopera il gesso come regolatore di presa, appunto, nelle miscele del calcestruzzo. L'attivazione di processi degradativi quali espansioni, cavillature e fessurazioni, espulsioni del copriferro o disgregazioni è procurata, invece, dalla formazione dell'ettringite secondaria, così detta perché catalizzata nella massa indurita del calcestruzzo. Gli ioni solfato possono essere di origine interna, se presenti negli aggregati - ad esempio - o esterna, se provenienti dal terreno o dalle precipitazioni e penetrati attraverso le fessure presenti nel conglomerato. Attesa la severità dei fenomeni e le conseguenze ad essi associate, la normativa in materia di calcestruzzi prescrive il ricorso a leganti cementizi resistenti ai solfati - qualora l'ambiente di esercizio sia potenzialmente esposto all'attacco - ed apposite analisi di laboratorio su acque e terreni per la misurazione della concentrazione di solfati.

ETTRINGITE PRIMARIA E SECONDARIA. Dal punto di vista chimico l'ettringite è il prodotto della reazione, in presenza di acqua, dell'alluminato tricalcico (composto del *clinker*) con gli ioni solfato ed è, infatti, un tri-solfo alluminato di calcio idrato ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$). La formazione primaria, come anticipato, espleta la regolazione di presa del conglomerato rallentando la reattività - quasi istantanea - del componente alluminato tricalcico (C_3A). Questo, idratandosi, forma gli alluminati di calcio idrati (C-A-H) e libera una quantità elevata di energia termica (circa 215 kcal/kg) ma non contribuisce allo sviluppo della resistenza meccanica. L'aggiunta del gesso è atta a catalizzare la formazione dell'ettringite che rivestendo le particelle di C_3A ne impedisce o ne rallenta l'idratazione, dilatando i tempi di presa ed indurimento della massa. La funzione del gesso è quella di reagire con il C_3A in presenza di acqua provocando il deposito di ettringite (in forma di una pellicola che avvolge la superficie del C_3A) ed arrestando momentaneamente, o comunque

ritardando, l'ulteriore idratazione del C₃A e la formazione di C-A-H. L'ettringite primaria, pur essendo accompagnata da un aumento di volume, non innesca fessurazioni o fenomeni degradativi poiché si forma in un mezzo plastico, ancora deformabile. La reazione è invece deleteria laddove l'ettringite continui a formarsi anche ad indurimento in corso, in un sistema semi-solido non capace di accomodare le tensioni causate dall'espansione. È fondamentale, dunque, dosare correttamente il gesso in funzione dell'alluminato tricalcico. Questo, completa il proprio processo di idratazione mediante la diffusione dell'acqua attraverso la pellicola di ettringite primaria. Se una parte del gesso attivo rimane nella matrice cementizia ovvero penetra dall'ambiente esterno e passa in soluzione, la sua interazione con l'alluminato di calcio idrato può formare l'ettringite secondaria, attivando il cosiddetto attacco solfatico. Il processo, nel caso di fonte solfatica esterna, avviene per reazione degli ioni solfato con l'idrossido di calcio presente nel calcestruzzo a formare gesso (Eq.15):



che, a sua volta, reagendo con gli alluminati idrati del calcestruzzo (C-A-H) forma l'ettringite secondaria (Eq.16):



MECCANISMI DI IMMOBILIZZAZIONE DEL GESSO IN CONGLOMERATI CON AGGREGATI IN AAC. Il gesso contenuto nell'AAC può essere considerato una fonte di solfati interna. Questa circostanza ha spinto all'approfondimento della letteratura contenente esperienze sperimentali in materia di utilizzo di materiale di scarto in AAC per il confezionamento di conglomerati. Una delle problematiche riscontrate dagli autori occupatisi della questione è la possibile lisciviazione dei solfati presenti nel gesso dell'aggregato, ossia l'abbandono della sede solida ed il passaggio in soluzione. Il fenomeno può essere innescato e significativo nell'ipotesi applicativa del conglomerato riciclato in ambienti umidi, quali ad esempio un massetto di soffondazione ovvero una malta da intonaco per applicazioni esterne. Le evidenze sperimentali hanno riportato un quantitativo superiore di solfati precipitati - a valle del *test* di lisciviazione effettuato su campioni di malta confezionata con aggregato in AAC - in caso di inerte proveniente da attività di demolizione di manufatti in Calcestruzzo Aerato Autoclavato. In questo caso, l'aggregato era contaminato con fonti aggiuntive ed esogene di gesso, ad esempio gli intonaci [92]. La possibilità che il gesso sia consumato al momento stesso della preparazione della malta, formando

ettringite primaria e scongiurandone la secondaria, dipende dal tenore di zolfo e di calcio all'interno del sistema. Se il primo, come nel caso di AAC proveniente da costruzioni e demolizioni, dovesse essere in sproporzione con la quantità di calcio, la capacità dei composti presenti nel legante di immobilizzare il gesso reattivo mediante la formazione di ettringite potrebbe ridursi. Ancora, il rapporto tra gli ossidi a base di zolfo (SO_3) e di alluminio (Al_2O_3) è indicativo della tendenza ad avere gesso non legato nella matrice e quindi ad innescare fenomeni di lisciviazione dei solfati [92]. Ulteriore fattore da considerare è la tipologia di legante ed il suo modulo dei fondenti - specie per i cementi - definito come rapporto tra il tenore di allumina e l'ossido ferrico. Questo parametro è appunto indicativo della quantità di alluminato tricalcico presente nella miscela, potenzialmente reagente con i solfati [93].

ABSTRACT

La **parte III** del testo, a seguire la parte II di presentazione dei materiali di interesse per l'attività di ricerca, passa ad esporre i due momenti costituenti la **fase sperimentale**, vale a dire quello teorico, di approfondimento dello **stato dell'arte**, e quello operativo di **confezionamento e caratterizzazione** in laboratorio delle **malte** oggetto della trattazione, confezionate con un **aggregato riciclato** specificamente proveniente da un'attività industriale produttrice di materiali per le costruzioni.

Nella considerazione che il ricorso ad aggregati/inerti riciclati è una pratica in crescente utilizzo e considerevolmente diversificata, si è *in primis* indagato lo **stato di avanzamento** della cultura scientifica nella materia specifica degli **inerti "edili"** mediante una *review* della letteratura. Allo scopo sono stati rassegnati i contenuti in **letteratura** contenenti indagini su **aggregati artificiali** ottenuti **da processi correlati a quelli edilizi**.

Il **paragrafo 5.1**, quindi, strutturato come un articolo scientifico, illustra la **metodologia** adoperata e finalizzata ad un'**analisi qualitativa e quantitativa della letteratura** che ha contribuito a definire i filoni di interesse per la fase sperimentale.

Sulla base di quanto emerso in sede di approfondimento dei contenuti di settore, nel **paragrafo 5.2** si passa a descrivere la struttura ed il cronoprogramma dell'**attività sperimentale condotta**.

Ciascuna delle **fasi** di articolazione è stata poi approfondita nei **sottoparagrafi 5.2)1, 5.2)2 e 5.2)3**, illustrandone

CAPITOLO 5

L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE DI CONFEZIONAMENTO E CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE CON AAC RICICLATO

5.1 STATO DELL'ARTE: LE MALTE CONFEZIONATE CON "INERTI RICICLATI EDILI"

Diffondere la cultura della sostenibilità è una delle sfide correnti più grandi sia per la comunità scientifica che per quella civile. Il mondo, infatti, deve confrontarsi con la scarsità di risorse naturali, la richiesta di materie prime e la crescente quantità di rifiuti da smaltire [94]. Considerata la disparità tra queste istanze, occorre studiare misure severe ed immediate efficaci per il riequilibrio della situazione. Per tale motivo, negli ultimi anni il mondo scientifico nella sua totalità ha rivolto attenzione all'economia circolare quale strategia utile sia a ridurre il consumo di risorse naturali e la produzione di rifiuti che a riutilizzare e/o riciclare questi ultimi come materia prima secondaria [95].

Come più volte sottolineato nel testo, il mondo delle costruzioni è senza dubbio una delle attività antropiche più impattanti dal momento che in ogni fase del processo edilizio si consumano risorse e si producono rifiuti [96]. Il calcestruzzo e la malta - il cui volume è occupato nella misura tra il 65 e l'80% da inerti (o equivalentemente detti aggregati) [94] - sono due dei materiali più usati e quindi più responsabili del consumo di risorse. Poiché

obiettivi, materiali e metodi, risultati e discussioni.

A chiusura del capitolo, nel **paragrafo 5.3**, sono presentate, in aggiunta, alcune **considerazioni di sintesi** sui risultati complessivi dell'attività sperimentale condotta.

aggregati naturali sono generalmente ottenuti per sottrazione di materiale dagli alvei fluviali ovvero con processi di estrazione dalle cave, la loro produzione causa un significativo impatto ambientale [17]. I rifiuti edili, invece, sono generati in massima parte in cantiere durante le fasi di costruzione e demolizione delle opere. In Europa la quantità di rifiuti prodotta dal mondo

edilizio copre circa il 45% del totale [97] e, considerato l'elevato volume, è necessario ricercare soluzioni alternative allo smaltimento, attesa la mancanza di spazi disponibili da destinare a discarica [9]. Per questi motivi, i rifiuti da costruzioni e demolizioni, *C&Ds* nel seguito, sono stati dichiarati una priorità europea e divenuti oggetto di una serie di direttive che hanno fissato obiettivi vincolanti per il loro riutilizzo.

Tuttavia, se si estendono i confini dell'analisi e si tiene conto anche dell'impatto ambientale dei materiali per le costruzioni stessi, si osserva che i *C&Ds* rappresentano soltanto una frazione dell'intera gamma di rifiuti edili. Il crescente volume di produzione, infatti, rende le industrie dei materiali per le costruzioni, analogamente a quelle produttrici di plastica, vetro, carta e similari, una severa questione ambientale: i rifiuti sono quotidianamente prodotti e lentamente riciclati [98]. L'obiettivo succitato di contestuale riduzione del consumo di risorse e di produzione dei rifiuti imputabili agli aggregati ha spinto, negli ultimi anni, ad investigare la praticabilità di aggregati alternativi a quelli naturali, ottenuti tramite operazioni di riciclo e dunque detti aggregati riciclati.

I ricercatori hanno focalizzato l'attenzione su aggregati riciclati provenienti da varie fonti e di diversa granulometria e campo di applicazione [6,7,15,95,99]. Numerosi materiali - tra i quali plastica [13,98,100,101], ceramica [102,103], calcestruzzo [104], muratura [105], rifiuti industriali ed agricoli [106], vetro [107] - e diversi impieghi - come calcestruzzi, malte, sottofondi ed asfalti - sono stati trattati. Tuttavia, mentre l'ambito dei calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati è stato ampiamente approfondito, non può dirsi altrettanto per le malte [95].

Come illustrato al paragrafo 4.1, le norme UNI EN 998-1,2:2016 distinguono e disciplinano due categorie - e relative prestazioni - di malte per applicazioni non strutturali. Dal momento che gli aggregati influenzano le prestazioni e quindi il campo di impiego delle malte, nel presente testo si è inteso approfondire quali fossero le tipologie di aggregati riciclati più e meno investigate nella letteratura

corrente e per quale categoria di malta fossero adoperati.

La finalità dello studio è stata l'inquadramento dello stato dell'arte in materia di malte confezionate con aggregati riciclati edili - intesi come da definizione data nel seguito - utile ad individuare, a priori, e a supportare a posteriori, gli aspetti approfonditi nell'attività sperimentale in commento.

LA METODOLOGIA. Allo scopo è stata adoperata una metodologia in quattro fasi per analizzare articoli scientifici di indagine su malte confezionate con aggregati riciclati edili, ossia provenienti da attività di costruzione e demolizione degli edifici oppure dal reimpiego degli scarti di industrie produttrici di materiali da costruzione. Si precisa che in questo secondo gruppo sono ricomprese tutte le attività che trattano materiali adoperati nel mondo delle costruzioni ma non necessariamente produttrici di componenti edili: non occorre, cioè, che l'azienda tratti elementi edili - quali finestre, piastrelle, mattoni - ma che produca materiali affini a quelli dei componenti edili, come vetro, ceramica, laterizio. Ciò implica che l'analisi ha incluso aggregati riciclati da bottiglie di plastica o da piastrelle difettate mentre ha escluso scarti agricoli o rifiuti contenenti metalli pesanti. Il flusso di lavoro è stato articolato nelle fasi di Ricerca, Revisione, Classificazione e Sintesi.

STEP 1: LA RICERCA. La Ricerca ha definito il *set* di articoli, sperimentali e disponibili nella versione completa, rispondente all'obiettivo dello studio. In una prima fase gli articoli sono stati cercati nell'intervallo temporale di pubblicazione di dieci anni, dal 2010 al 2020, mediante una serie di stringhe di ricerca contenenti gli operatori booleani AND e NOT. In particolare, gli *input* di ricerca generali "aggregato AND riciclato", "malta AND riciclato", "conglomerato AND aggregato AND riciclato", "malta AND aggregato AND riciclato" ed infine "malta AND aggregato AND riciclato NOT calcestruzzo" sono stati inseriti nel *database* scelto, *Science Direct*. L'ultima stringa è stata adoperata per escludere gli articoli che trattavano calcestruzzi confezionati con aggregati riciclati, atteso che l'oggetto dell'attività di ricerca era invece una malta. L'utilizzo di nomi plurali o singolari negli *input* di ricerca non ne condizionava i risultati. Poiché a queste stringhe è corrisposto un elevato numero di articoli, alcuni parametri di ricerca sono stati modificati come ora descritto. La tipologia di articolo ed il *database* di ricerca della prima fase sono stati mantenuti, mentre l'intervallo di tempo è stato ridotto a cinque anni (2015-2020). Si è proceduto, quindi, con gli *input* "malte AND aggregato AND riciclato", "intonaci AND aggregato AND riciclato" e "conglomerato AND aggregato AND riciclato". Il riferimento agli intonaci è stato adoperato per restringere il campo di applicazione delle malte ad un segmento specifico, ossia quello dei rivestimenti di finitura.

STEP 2: LA REVISIONE. Il *dataset* ottenuto a valle della ricerca è stato esaminato così da selezionare gli articoli rispondenti ai criteri di eleggibilità secondo il flusso di lavoro Prisma [108], escludendo lavori non pubblicati oppure scritti in lingua diversa dall'inglese. Secondariamente, i risultati per ogni stringa sono stati revisionati adoperando i seguenti criteri:

- oggetto dell'articolo. Il parametro è stato impiegato per eliminare gli articoli non funzionali allo scopo dello studio. Anzitutto, sono stati esclusi lavori che trattavano geopolimeri, calcestruzzi e conglomerati per sottofondi stradali o asfalti. La formulazione, la preparazione e le caratteristiche chimico-mineralogiche dei geopolimeri, infatti, differiscono dalle malte tradizionali. Secondariamente, dal momento che le norme prevedono prove di laboratorio distinte a seconda della tipologia di conglomerato e relativo campo di utilizzo, gli articoli vertenti su calcestruzzi e conglomerati per applicazioni stradali contenevano dati non interessanti ai fini investigativi del presente studio.
- fonte dell'aggregato riciclato. Questo filtro ha escluso gli articoli con aggregati provenienti da fanghi, in quanto materiali altamente eterogenei e di consistenza non solida. Sono stati altresì scremati gli aggregati riciclati dai rifiuti delle industrie alimentari o da biomasse - per il loro contenuto organico - e delle industrie pesanti, con sostanze pericolose o tossiche, considerati i trattamenti supplementari richiesti per renderli idonei all'utilizzo.
- ruolo dell'aggregato riciclato. Non sono stati valutati gli articoli in cui il componente riciclato sostituiva il legante invece che essere adoperato come aggregato.

STEP 3: LA CLASSIFICAZIONE. Una volta conclusasi la revisione, si è proceduto alla classificazione con l'obiettivo di organizzare i dati raccolti del *set* finale di articoli. Allo scopo è stato creato un *database* adoperando un foglio di calcolo e ad ogni articolo è stato assegnato un numero identificativo (*ID*). A questo punto ogni articolo è stato consultato per prelevarne le informazioni di carattere generale come titolo, anno e rivista di pubblicazione, parole chiave, autori, oggetto dello studio, presenza o assenza di brevetti, disponibilità sul mercato dei prodotti testati. Tutti i dati sulla formulazione delle miscele e sulle procedure di caratterizzazione - prove eseguite e risultati - sono stati manualmente inseriti nel foglio di calcolo. Sono state riportate sia informazioni testuali che numeriche. Per le prime a seconda della presenza o dell'assenza della variabile, rispettivamente, è stato segnato il dato "sì"

- A, tipologia di aggregato
- B, formulazione della miscela
- C, proprietà misurate
- D, brevetti e disponibilità sul mercato dei prodotti testati

È stata quindi costruita una struttura ad albero adoperando le macro-variabili generali A, B, C, D come “radici” o equivalentemente “nodi-radice”. Da queste, è stata operata una progressiva decomposizione gerarchica, definendo livelli di variabili intermedie con un crescente grado di dettaglio, dette “rami” o “nodi-ramo”. Il processo di disaggregazione è proseguito fino al livello sommitale delle “foglie” o “nodi-foglia”, corrispondenti a variabili senza ulteriori ramificazioni.

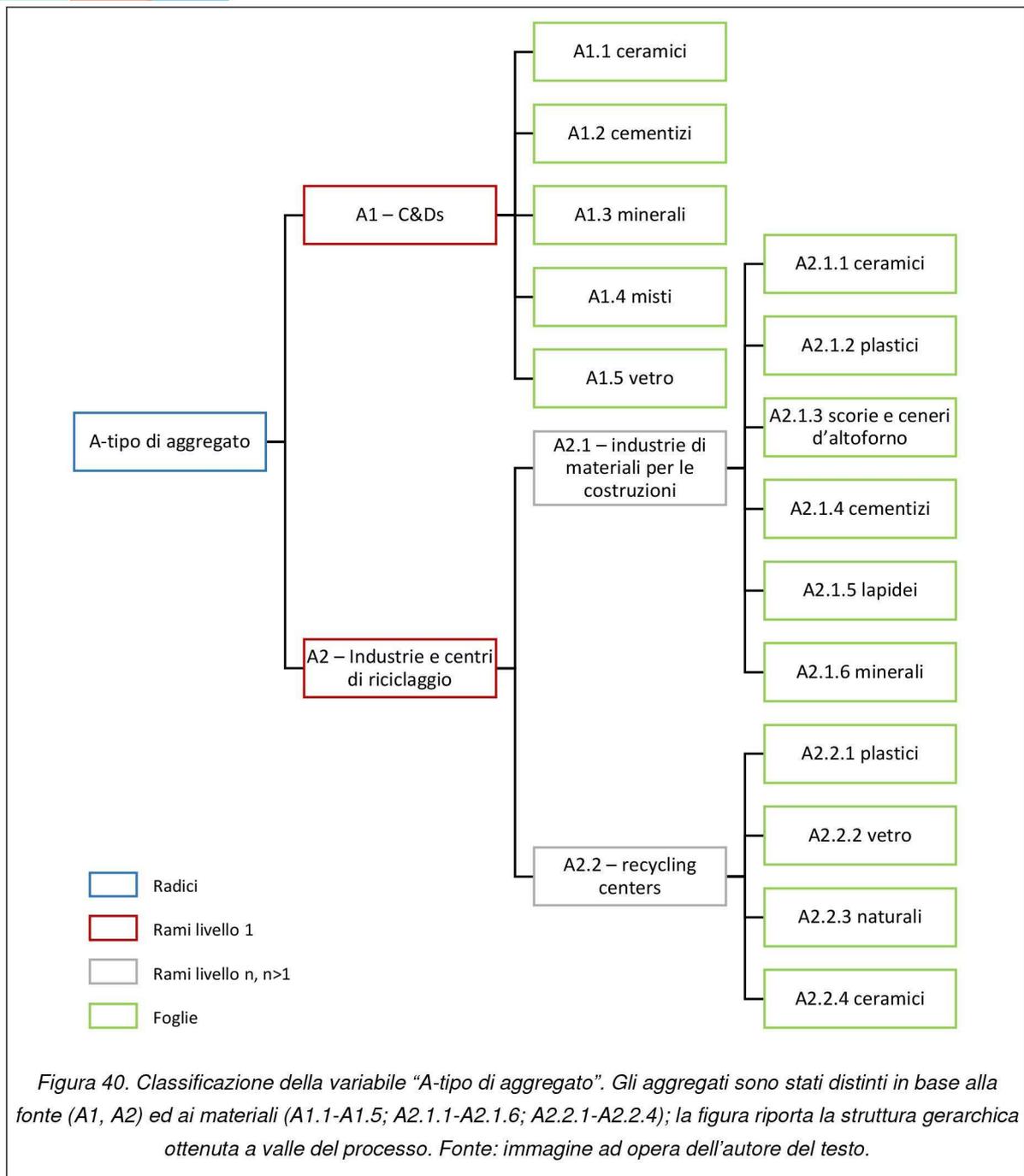
Gli aggregati, nello specifico, sono stati codificati in relazione alla fonte di provenienza nel seguente modo:

- A1, operazioni di Costruzione e Demolizione (*C&Ds*)
- A2, industrie e centri di riciclaggio

con una distinzione addizionale nel gruppo A2:

- A2.1, industrie di materiali per le costruzioni
- A2.2, centri di riciclaggio

In aggiunta, sono stati classificati in funzione della natura chimica, distinguendone i materiali costituenti. La Figura 40 riporta la struttura gerarchica ottenuta per la variabile A.



La variabile B ha incluso le informazioni collezionate sulle proporzioni tra i componenti delle miscele delle malte testate:

- B1, numero delle miscele
- B2, rapporto tra aggregati riciclati (AR) ed aggregati naturali (AN)
- B3, rapporto in massa acqua-legante
- B4, rapporto aggregato-legante
- B5, super-plasticizzanti o altri additivi

Ulteriori specificazioni, come mostrato nella Figura 41, sono state aggiunte per B2 e B4 distinguendo i rapporti a seconda che fossero in massa oppure in volume.

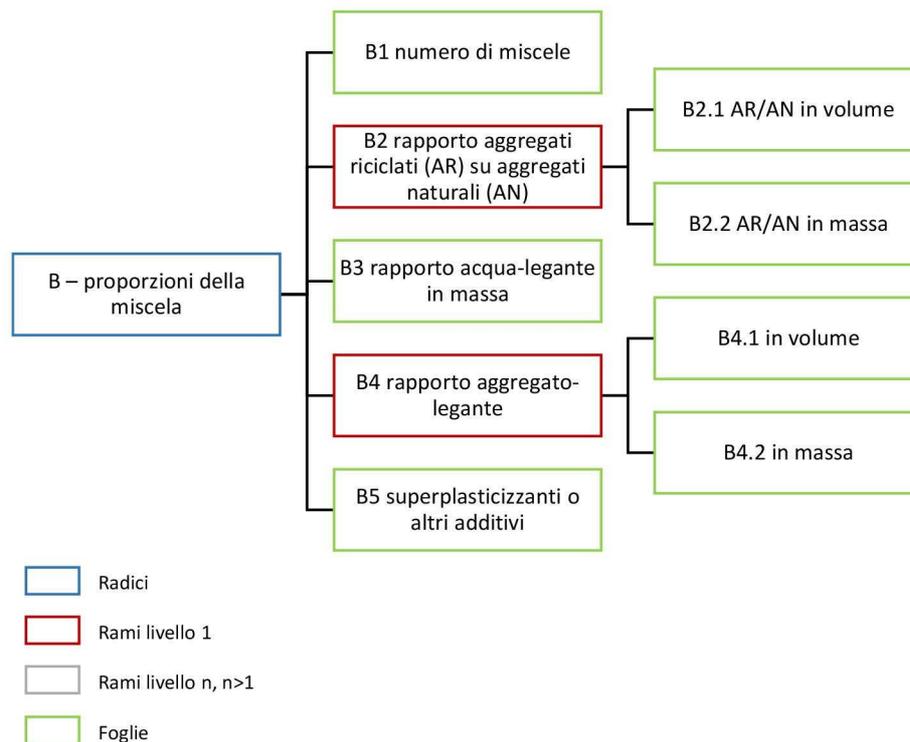


Figura 41. Classificazione della variabile "B-proporzioni della miscela". La figura riporta la struttura gerarchica ottenuta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

I dati collezionati sulle proprietà testate sono stati raggruppati nel seguente modo:

- C1, proprietà fisiche
- C2, proprietà meccaniche
- C3, durabilità
- C4, proprietà termiche ed igrometriche
- C5, proprietà chimiche e mineralogiche
- C6, questioni inerenti alla sostenibilità, incluse analisi ambientali ed economiche

Attesa la numerosità di elementi, per la variabile C si riporta l'intero elenco puntato così da facilitare la lettura.

- C1.1, proprietà allo stato fresco
 - C1.1.1, densità
 - C1.1.2, consistenza
 - C1.1.3, viscosità
 - C1.1.4, contenuto d'aria
- C1.2, proprietà allo stato indurito
 - C1.2.1, densità
 - C1.2.2, porosità

- C1.2.3, ass.¹¹ d'acqua per immersione
- C1.2.4, ass. d'acqua per capillarità (g/cm³)
- C1.2.5, ass. d'acqua misurato tramite coefficiente di capillarità (kg/m²min^{0,5})
- C1.2.6, ass. d'acqua per capillarità tramite altezza di risalita (mm)
- C1.2.7, ass. d'acqua per capillarità misurato tramite tasso di risalita (mm/min)
- C2.1, resistenza a compressione misurata a 28 giorni
- C2.2, resistenza a flessione misurata a 28 giorni
- C2.3, modulo elastico
 - C2.3.1, misurato a 28 giorni
 - C2.3.2, misurato a 90 giorni
- C2.4, forza di adesione a taglio misurata a 28 giorni
- C2.5, aderenza al supporto misurata a 28 giorni
- C3.1, coefficiente di diffusione dei cloruri
- C3.2, penetrazione dei cloruri misurata a 90 giorni
- C3.3, espansione da reazione Alkali Silice
 - C3.3.1, misurata a 14 giorni
 - C3.3.2, misurata a 28 giorni
- C3.4, resistenza al gelo
- C3.5, invecchiamento accelerato con cicli caldo-freddo
- C3.6, permeabilità all'acqua sotto pressione
- C3.7, permeabilità al gas misurata a 28 giorni
- C3.8, coefficiente di sorptività a 28 giorni
- C3.9, profondità di carbonatazione dopo test di durata pari a 28 giorni
- C3.10, ritiro da essiccamento
 - C3.10.1, ritiro da essiccamento a 28 giorni (mm)
 - C3.10.2, ritiro da essiccamento a 28 giorni (%)
 - C3.11, variazioni di massa dopo cicli di bagnatura ed asciugatura
- C4.1, proprietà termiche
 - C4.1.1, conducibilità termica
 - C4.1.2, diffusività termica
- C4.2, proprietà igrometriche
 - C4.2.1, permeabilità al vapore
 - C4.2.2, resistenza al vapore
- C5.1, analisi diffrattometrica, *XRD*
- C5.2, analisi termogravimetrica, TGA
- C5.3, analisi al microscopio elettronico, SEM
- C5.4, test di lisciviazione
- C5.5, misura del pH
- C5.6, spettrofotometria, XFR
- C6.1, analisi del ciclo di vita, LCA
- C6.2, fattibilità economica

¹¹ Abbreviazione di "assorbimento"

La variabile D, infine, ha segnalato la presenza di brevetti o altri strumenti di tutela della proprietà intellettuale (D1) e la disponibilità sul mercato delle malte testate (D2). Questi dati hanno fornito informazioni sul livello di avanzamento delle relative ricerche e l'effettiva praticabilità delle soluzioni testate in laboratorio.

STEP 4: LA SINTESI. Nella fase di Sintesi, successiva a quella di Classificazione, sono state seguite due sequenze operative. Nella prima, indicata come S1, la variabile "A-tipo di aggregato" è stata impiegata per raggruppare e processare gli articoli ubicati sullo stesso nodo-foglia nella struttura ad albero di A. Questa scelta è stata dettata dalla disponibilità dell'informazione sul tipo di aggregato per tutti i testi del *set* di analisi.

Sono stati quindi calcolati il numero di articoli su ogni nodo-foglia, nodo-ramo e nodo-radice della variabile A ed indicati come $n_{i,j,k}$, $n_{i,j}$, ed n_i , con:

- $j=1,2,3,4,5$, se $i=1$
- $j=1,2$ e $k=1,2,3,4,5,6$, se $i=2$

Il numero complessivo di dati ottenuti dall'operazione è stato nominato "N".

A questo punto si è proceduto a processare le informazioni sulle altre macro-variabili di raggruppamento. Per ogni nodo-foglia della variabile A, gli *ID* degli articoli sono stati riportati in riga, mentre il minimo ed il massimo dei valori delle variabili B, C, D - dove presenti - sono stati segnati in colonna, come mostrato in Figura 41. Quindi, è stato contato il numero di celle non vuote di ogni colonna ed è stato calcolato il rapporto sul corrispondente $n_{i,j,k}$.

	ID articolo	B							
		B1	B2.1	B2.2	B3	B4.1	B4.2	B.5	
A1.1									

Figura 42. Sequenza di sintesi S1: database. La figura riporta uno stralcio del foglio di calcolo relativo al nodo-foglia A1.1. L'ID degli articoli sono riportati in riga, i relativi valori delle variabili B, C, D in colonna. Il numero di celle non vuote per ogni colonna è riportato nella riga campita di colore azzurro. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

I rapporti sono stati adoperati, quindi, per confrontare la formulazione e le procedure di caratterizzazione delle malte collezionate e raggruppate per nodo-foglia della variabile A. Nella sequenza S1, i valori testuale o numerico delle variabili non sono stati considerati; è stata valutata soltanto la loro presenza o assenza per computare i succitati rapporti. In aggiunta, le operazioni sul numero di celle non vuote hanno consentito di estendere le considerazioni anche ai nodi-ramo, ai nodi-radice ed infine all'intero *dataset*.

Nella seconda sequenza - S2 - il campo di impiego delle malte è stato scelto come criterio di raggruppamento degli articoli. Sulla base della distinzione tra malte da muratura e da intonaco, le specificazioni della UNI EN 998-1,2:2016 sono state adoperate per classificare gli oggetti del *dataset*. A tal proposito, la UNI EN 998-2:2016 indica cinque categorie di malte da muratura in funzione della resistenza a compressione misurata a 28 giorni. Per quanto attiene agli intonaci, la UNI EN 998-1:2016 ne distingue sei tipologie dipendenti dalla resistenza a compressione a 28 giorni, dall'assorbimento di acqua per capillarità, dalla massa volumica asciutta, dalla permeabilità all'acqua sotto pressione ed al vapore e dalla conducibilità termica.

Gli articoli sono stati classificati in funzione di entrambe le specificazioni ed il numero di oggetti in ogni classe di malte è stato calcolato. La Tabella 2 e la Tabella 3 riportano i parametri delle norme UNI EN 998-1:2016 e UNI EN 998-2:2016 e le corrispondenti tipologie di malta.

Tabella 2. Specificazioni UNI EN 998-1:2016 per malte da intonaco. Sono riportati le classi di malta ed i relativi requisiti¹.

Classe di malta ²	f _c MPa	W kg/m ² min ^{0,5}	d _{dry} kg/m ³	p mL/cm ²	μ	λ W/mK
GP	CSI a CSIV	W ₀ a W ₂				
LW	CSI a CSIII	W ₀ a W ₂	<1300			
CR	CSI a CSIV	W ₀ a W ₂				
OC	CSI a CSIV	W ₁ e W ₂		<1		
R	CSII	>0,3 kg/m ² dopo 24h			<15	
T1	CSI a CSII	W ₁			<15	<0,10
T2	CSI a CSII	W ₁			<15	<0,20

¹ f_c=resistenza alla compressione a 28 giorni; W= coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità; d_{dry} = massa volumica asciutta; p=permeabilità all'acqua sotto pressione; μ=coefficiente di permeabilità al vapore; λ= conducibilità termica

² GP=scopi generali; LW=malta alleggerita; CR=malta colorata; OC=monostrato per applicazioni esterne; R=malta da restauro; T=malta termoisolante.

Tabella 3. Specificazioni UNI EN 998-2:2016 per malte da muratura. Sono riportati le classi di malta ed i relativi requisiti¹.

Classe di malta	f_c ¹ MPa
M1	1
M2,5	2,5
M5	5
M10	10
M15	15
M20	20

¹ resistenza a compressione a 28 giorni.

I risultati sono presentati nella seguente successione: ricerca, classificazione e sintesi.

I RISULTATI.

STEP 1: LA RICERCA. Il numero di oggetti risultato dalle stringhe “aggregato AND riciclato”, “malta AND riciclato”, “conglomerato AND aggregato AND riciclato”, “malta AND aggregato AND riciclato” e “malta AND aggregato AND riciclato NOT calcestruzzo” è stato 39991, 11857, 581, 5560 e 1345, rispettivamente. L’aggiunta dell’operatore booleano NOT alla stringa “malta AND aggregato AND riciclato” ha ridotto i risultati di circa il 76%. Il filtro era stato adoperato, come anticipato, per escludere i calcestruzzi in quanto non pertinenti all’argomento di interesse. Si è tuttavia rivelato inappropriato poiché ha comportato l’omissione delle malte con aggregati provenienti dal riciclo dei calcestruzzi che, al contrario, erano di interesse.

I risultati sono stati ordinati in base all’anno di pubblicazione ed è stato generalmente riscontrato un andamento esponenziale, come mostrato nella Figura 43 e Figura 44. L’incremento più alto è stato registrato per l’opzione “malta AND aggregato AND riciclato” (+1105%), seguita da “malta AND riciclato” (+685%), “malta AND aggregato AND riciclato NOT calcestruzzo” (+625%), “conglomerato AND aggregato AND riciclato” (+456%) ed infine “aggregato AND riciclato” (+433%). I trend aprono a due considerazioni. *In primis*, sottolineano l’interesse crescente per le tematiche riguardanti l’impiego di aggregati riciclati nei conglomerati, *in secundis* evidenziano una minore trattazione delle malte rispetto ai calcestruzzi.

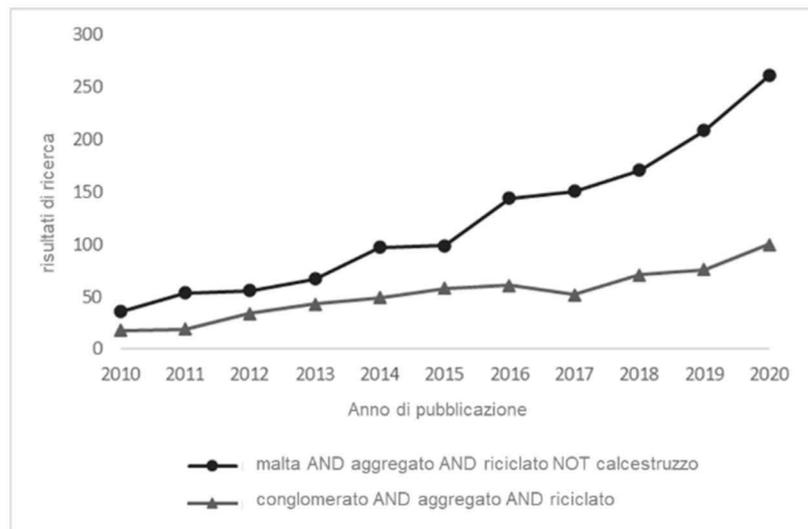


Figura 43. Andamento dei risultati di ricerca nell'intervallo 2010-2020. Il numero di risultati è diagrammato rispetto all'anno di pubblicazione: "malta AND aggregato AND riciclato NOT calcestruzzo", "conglomerato AND aggregato AND riciclato". Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

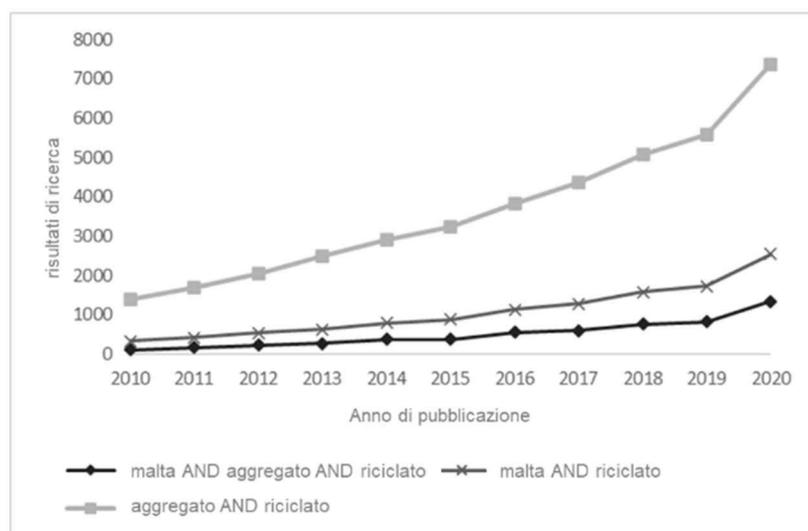


Figura 44. Andamento dei risultati di ricerca nell'intervallo 2010-2020. Il numero di risultati è diagrammato rispetto all'anno di pubblicazione: "malta AND aggregato AND riciclato", "malta AND riciclato", "aggregato AND riciclato". Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Nella seconda fase della ricerca bibliografica, all'aggiunta degli ulteriori filtri ed alla riduzione dell'intervallo di pubblicazione è conseguito un numero notevolmente ridotto di risultati: per "malta AND aggregato AND riciclato" era 543, per "intonaco AND aggregato AND riciclato" era 10 e per "conglomerato AND aggregato AND riciclato" era 418.

STEP 2: LA REVISIONE. La revisione è stata condotta su un *set* di analisi così composto:

- “malta AND aggregato AND riciclato”, 543 oggetti
- “intonaco AND aggregato AND riciclato”, 10 oggetti
- “conglomerato AND aggregato AND riciclato”, 418 oggetti

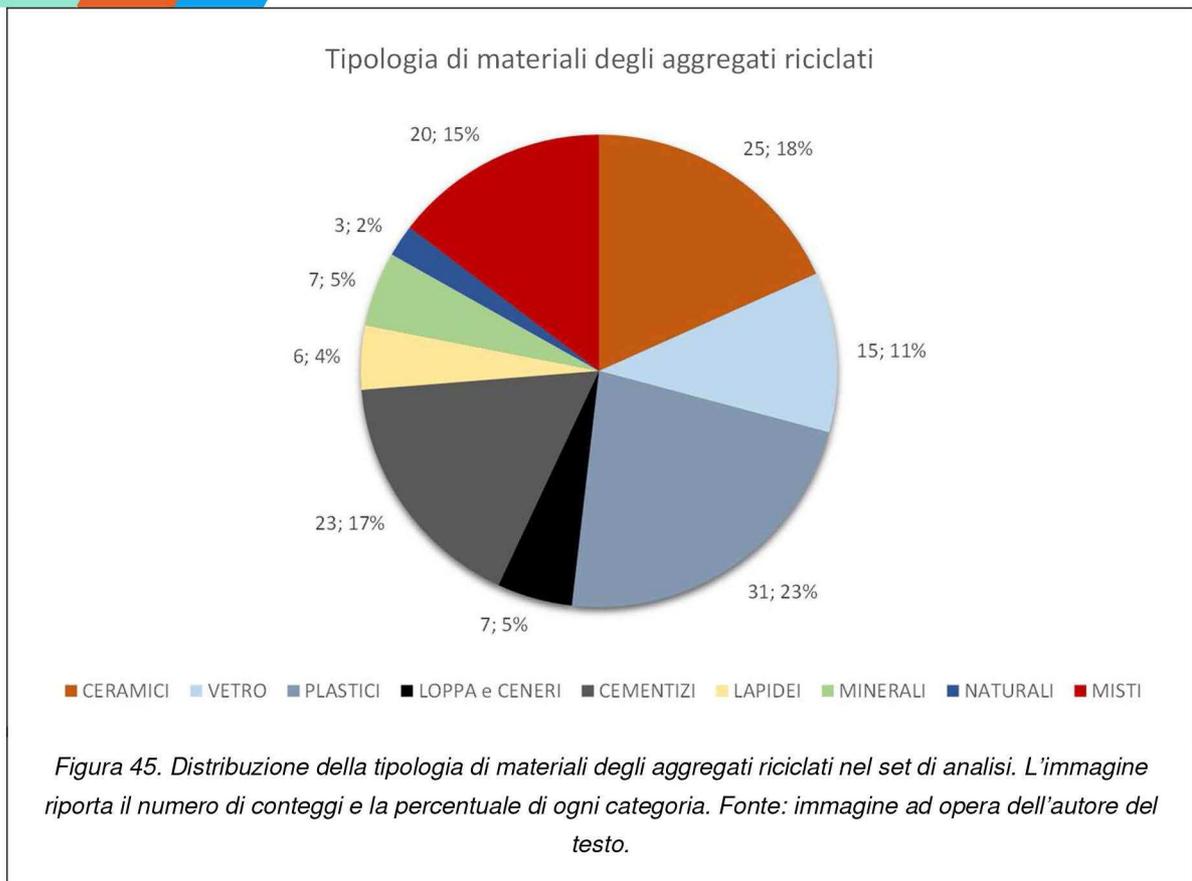
per un totale di 971. Sulla base del flusso di lavoro Prisma, sono stati esclusi 8 duplicati e 30 articoli non pubblicati. L’eliminazione delle casistiche non pertinenti alla finalità dello studio - secondo i criteri esposti in *La metodologia - step 2: la Revisione* - è risultata nei seguenti articoli eleggibili:

- “malta AND aggregato AND riciclato”, 93 oggetti
- “intonaco AND aggregato AND riciclato”, 3 oggetti
- “conglomerato AND aggregato AND riciclato”, 8 oggetti

Molti dei lavori indagavano l’utilizzo degli aggregati riciclati (AR) per operazioni di stabilizzazione dei suoli, negli asfalti, nelle pavimentazioni stradali ovvero nei calcestruzzi e dunque non erano adeguati allo scopo dell’analisi bibliografica del lavoro. Il *set* finale ha compreso, quindi, 104 oggetti.

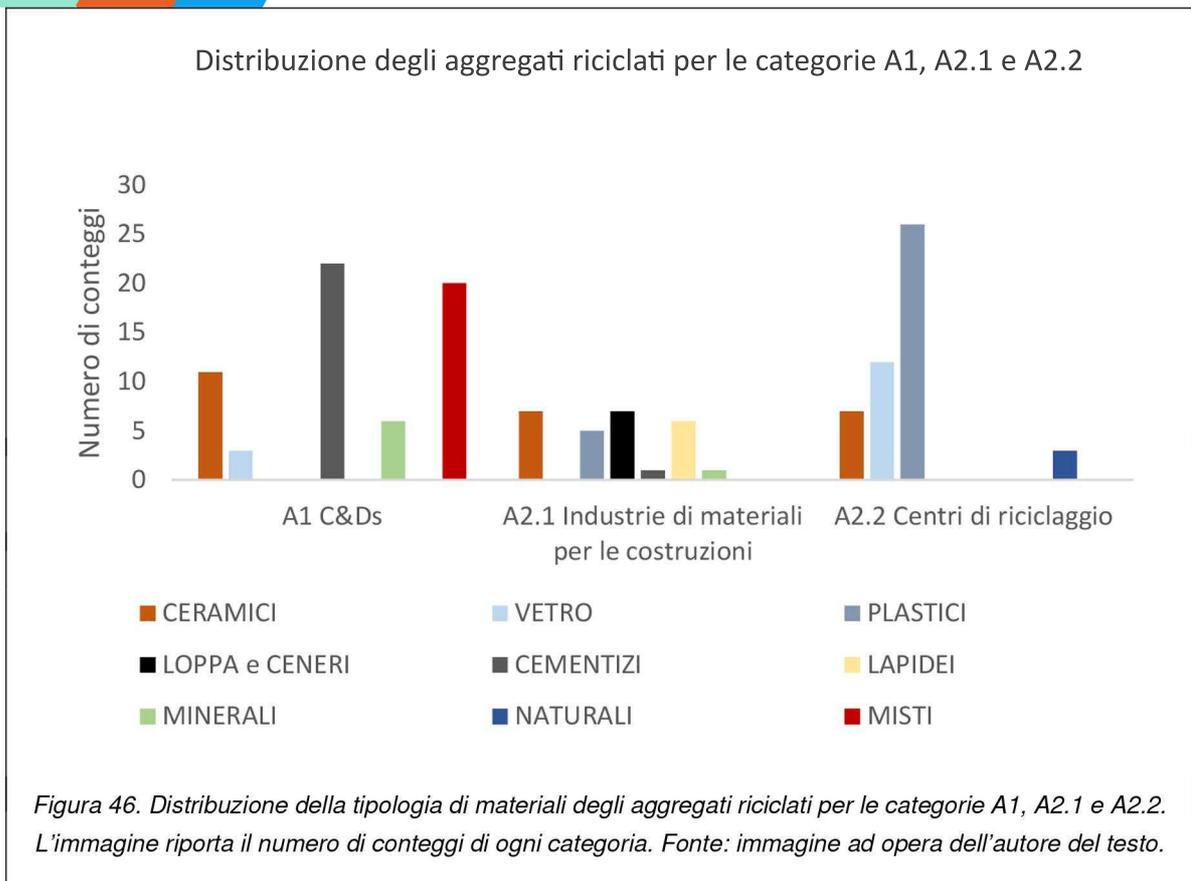
STEP 4: LA SINTESI. Dopo aver creato il *database* tramite il foglio di calcolo, sono state operate alcune analisi preliminari processando i dati sulla tipologia di legante impiegato. L’informazione è stata contata 123 volte - dal momento che alcune miscele adoperavano leganti misti - ed il cemento e la malta aerea sono state le voci più e meno frequenti, rispettivamente. Il cemento, infatti, è stato conteggiato 104 volte, la calce aerea e la calce idraulica 3 e 2 volte. I restanti leganti includevano sottoprodotti dell’industria dell’acciaio - come loppa d’altoforno e cenere volante - per un totale di 14 volte. Con riferimento alla terminologia adoperata in *La metodologia - step 4: la Sintesi* - si procede ad illustrare i risultati delle sequenze operative di sintesi S1 ed S2.

Per quanto attiene alla tipologia di aggregato riciclato (AR), sono state contate 137 voci (N), atteso che in alcuni articoli è stato impiegato più di un tipo di AR. Gli aggregati provenivano nel 45% dei casi da operazioni di costruzione e demolizione (A1) e nel 55% da industrie e centri di riciclaggio (A2). In A2, poi, il 64% era approvvigionato da centri di riciclaggio (A2.2) e soltanto il 36% da industrie di materiali per le costruzioni (A2.1). Nell’intero *set* di analisi, plastici (23%), ceramici (18%) e cementizi (17%) sono stati i materiali più ricorrenti, mentre naturali (2%), lapidei (4%) e minerali (5%) i meno frequenti, come mostrato in Figura 45.



La distribuzione delle fonti di provenienza degli AR è stata processata anche separatamente nelle tre categorie A1, A2.1 ed A2.2, come mostrato in Figura 46. Mentre i ceramici hanno esibito un *trend* regolare, gli altri materiali erano distribuiti in maniera non uniforme. In particolare, nessun aggregato plastico era originato da operazioni di costruzione e demolizione (A1) così come nessun inerte vitreo proveniva da industrie di materiali per le costruzioni (A2.1). I materiali cementizi, infine, erano sempre provenienti da attività di costruzione e demolizione eccetto per un caso approvvigionato da industrie di materiali per le costruzioni.

Sulla base di queste analisi, sono stati calcolati $n_{i,j,k}$, $n_{i,j}$ e n_i , ottenendo i valori mostrati in Figura 47. Si ribadisce che gli articoli sono stati contati più volte laddove contenenti più di una tipologia di aggregato.



Prima di procedere alla computazione dei rapporti per le variabili B, C e D - come definiti in *La metodologia - step 4: la Sintesi* - si sono rese necessarie alcune considerazioni. La variabile B1 “numero di miscele” è stata esclusa dall’analisi perché non era utile per la finalità delle operazioni di sintesi; infatti, la sequenza S1 non ha tenuto conto del valore numerico delle variabili ma ha considerato la loro frequenza di misurazione. Il dato sulla consistenza del set di miscele - B1, appunto - era sempre specificato, pertanto ai fini di S1 era irrilevante. Per la stessa motivazione, le variabili che rappresentavano una stessa proprietà mediante differenti unità di misura sono state aggregate come segue:

- da C1.2.4 a C1.2.7, in quanto misuravano l’assorbimento di acqua per capillarità
- C3.1 e C3.2, in quanto misuravano la penetrazione ai cloruri
- C3.10.1 e C3.10.2, in quanto misuravano il ritiro da essiccamento

Si è scelto di diagrammare i rapporti delle variabili B, C, D (nodi-foglia) mediante grafici a colonne raggruppate per sottolineare due aspetti complementari, uno quantitativo ed uno qualitativo rispettivamente. L'altezza delle colonne ha fornito informazioni sulla distribuzione del modulo del rapporto al variare del nodo-foglia di A. Ciò vale dire che, fissato il nodo-foglia di A e considerato il numero di articoli del nodo-foglia ($n_{i,j,k}$ o $n_{i,j}$), è stato computato il rapporto (poi rappresentato in percentuale) tra il numero di articoli nei quali la generica variabile B,C,D è stata misurata ed $n_{i,j,k}$ o $n_{i,j}$.

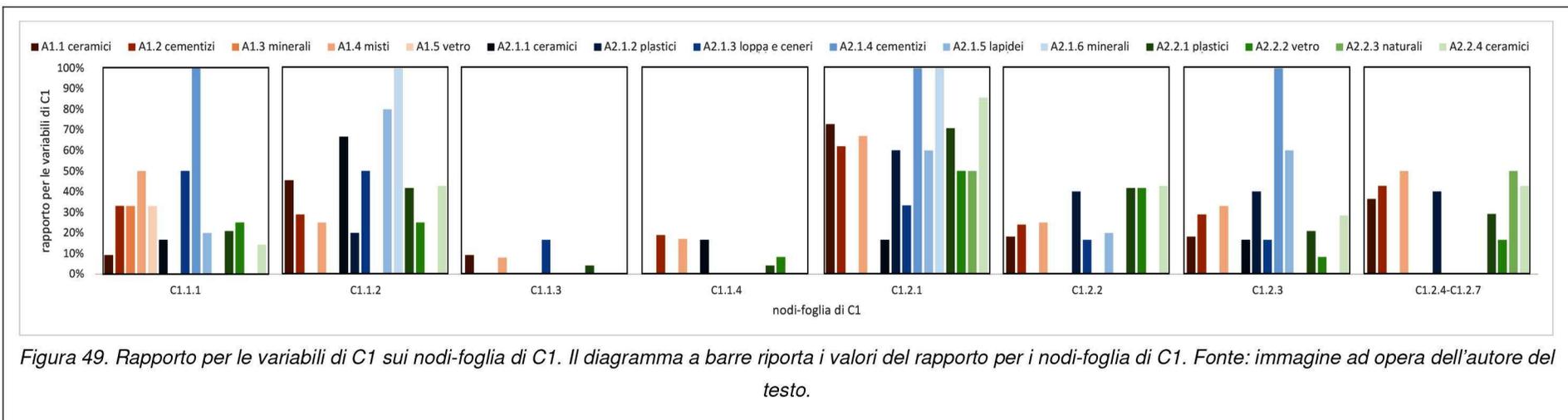
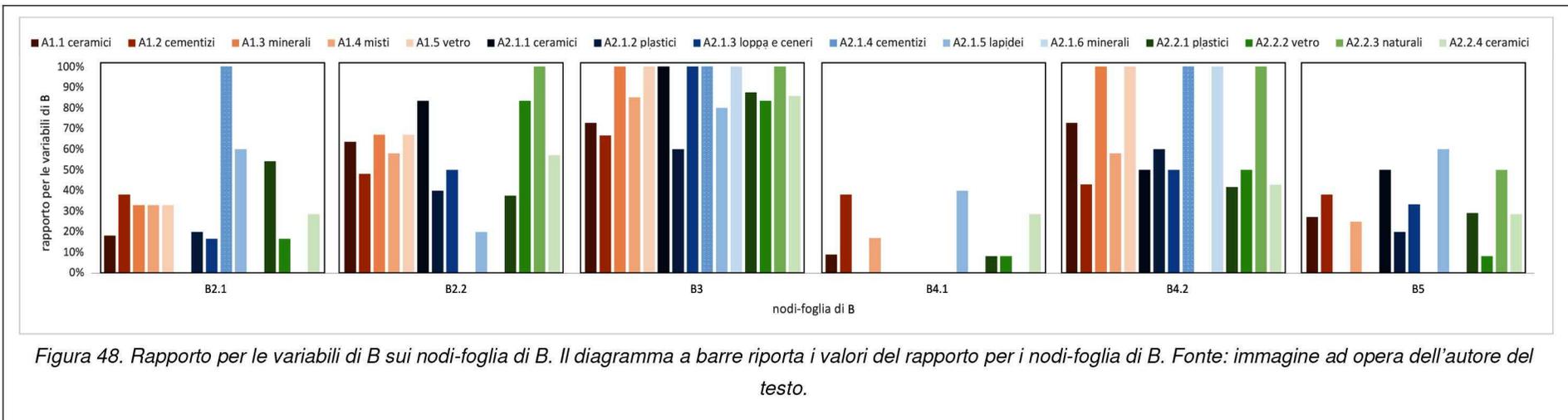
La densità delle colonne, invece, tradotta graficamente tramite la varietà di colori, ha sottolineato la frequenza di misurazione della variabile, ossia i nodi-foglia di A - *i.e.* categorie di aggregati riciclati - nei quali B, C, D sono state valutate: l'infittimento o equivalentemente più colori sono corrisposti a più categorie di AR nei quali le variabili sono state testate. Questo implica che l'altezza e la densità delle colonne non sono direttamente proporzionali, in quanto rappresentative di aspetti diversi. L'assortimento di colori adoperato è consistito di 15 unità corrispondenti ognuna ad una diversa categoria di AR.

Come mostrato nella Figura 48, il rapporto per le variabili di B è stato generalmente alto, con un valore medio del 46%. Per quanto attiene alla densità delle barre, le informazioni più frequenti hanno riguardato i rapporti acqua-legante (B3), presente per tutte le categorie di AR come rappresentato graficamente dall'intera varietà di colori delle colonne, aggregati riciclati su aggregati naturali (B2) ed aggregati su legante (B4). Per gli ultimi due casi, il valore era espresso più frequentemente in massa piuttosto che in volume: le colonne di B2.2 e B4.2 sono più alte e più dense di quelle di B2.1 e B4.1; il rapporto aggregato su legante in volume (B4.1), infatti, è stato impiegato soltanto in 20 casi su 137 totali.

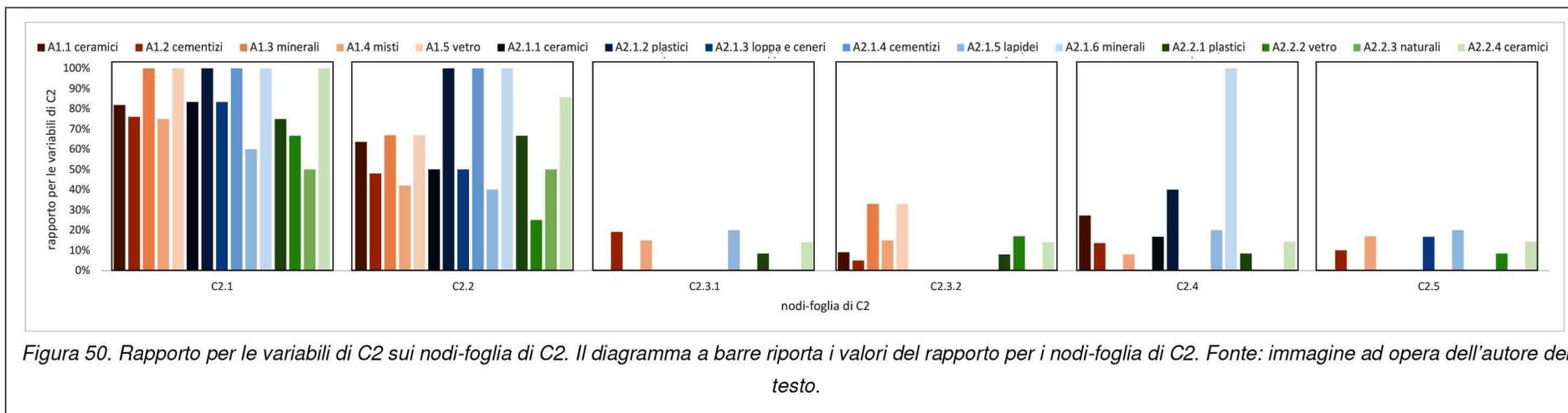
Le proprietà fisiche del nodo-ramo C1 - eccetto per viscosità (C1.1.3) e contenuto d'aria (C1.1.4) - sono state frequentemente misurate per tutte le categorie di AR. Nel gruppo, le proprietà allo stato fresco densità (C1.1.1) e consistenza (C1.1.2) e quelle allo stato indurito densità (C1.2.1), porosità (C1.2.2) e coefficiente di assorbimento per immersione totale (C1.2.3) sono state le variabili più ricorrenti.

I rapporti per C1.2.1 sono stati in media del 64%, ciò significa che la densità allo stato indurito è stata misurata per quasi tutti gli articoli di ogni nodo-foglia di A e per quasi tutti i nodi-foglia di A (colonne alte e dense). Al contrario, C1.1.1, C1.1.2, C1.2.2 e C1.2.3 sono stati misurati per quasi tutti i nodi-foglia di A ma il loro modulo medio è stato del 27%, 40%, 21% e 29%, rispettivamente (colonne basse e dense). Il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità (C1.2.4 to C1.2.7) è stato

analizzato in due soli casi sui 27 totali di A2.1 (aggregati riciclati da industrie di materiali per le costruzioni), in tutte le categorie di A2.2 (aggregati riciclati da centri di riciclaggio) con un modulo medio del 35% ed in 21 casi su 62 di A1 (aggregati da costruzione e demolizione) con un modulo medio del 43%. Il grafico per C1 è riportato in Figura 49.



Tra le proprietà meccaniche (C2) è stato trovato un andamento irregolare, come mostrato in Figura 50. Le resistenze a compressione e flessione (C2.1 e C2.2, rispettivamente) sono state le variabili con colonne più dense e più alte, dal momento che sono state misurate per tutti i nodi-foglia di A (varietà di colori) con un modulo medio dell'83% per C2.1 e del 64% per C2.2. La resistenza a compressione, in particolare, è stata frequentemente testata nelle categorie A1 e A2.1 con rapporti medi dell'87% e dell'88%, rispettivamente. Al contrario, le restanti proprietà meccaniche sono state raramente computate: i rapporti medi per il modulo elastico a 28 e 90 giorni (C2.3.1 e C2.3.2), adesione a taglio a 28 giorni (C2.4) ed aderenza al supporto a 28 giorni (C2.5) sono stati del 5%, 17%, 19% e 7%, rispettivamente.



Le variabili C3 e C4 - pertinenti alla durabilità ed alle proprietà termoigrometriche - hanno esibito basse frequenze di misurazione. Come visibile nelle Figura 51 e Figura 52, le colonne sono basse e rade e pochi colori dell'assortimento sono presenti. I moduli dei rapporti per C3 sono stati mediamente inferiori al 10% con un minimo per l'invecchiamento accelerato mediante cicli caldo-freddo (C3.5) e per la permeabilità all'acqua sotto pressione (C3.6). L'unica eccezione in C3 è rappresentata dal ritiro per essiccamento (C3.10.1 e C3.10.2) con 28 voci su 137, 10 nodi-foglia di A su 15 ed un modulo medio del 26%. Tra le proprietà termiche ed igrometriche (C4), alla conducibilità termica sono associate le colonne più dense e alte con 14 voci su 137, 7 nodi-foglia di A su 15 ed un modulo

medio del 25%. Gli aggregati da centri di riciclaggio sono stati quelli più testati, in proposito, con 9 conteggi su 14 totali, seguiti dagli AR da industrie di materiali per le costruzioni con 3 conteggi su 14 totali ed in ultimo dagli AR da costruzione e demolizione con i residuali 2 conteggi. Alle altre variabili, diffusività termica (C4.1.2), permeabilità al vapore (C4.2.1) e resistenza al vapore (C4.2.2), è corrisposto un modulo medio di 1%, 4% e 5%, rispettivamente.

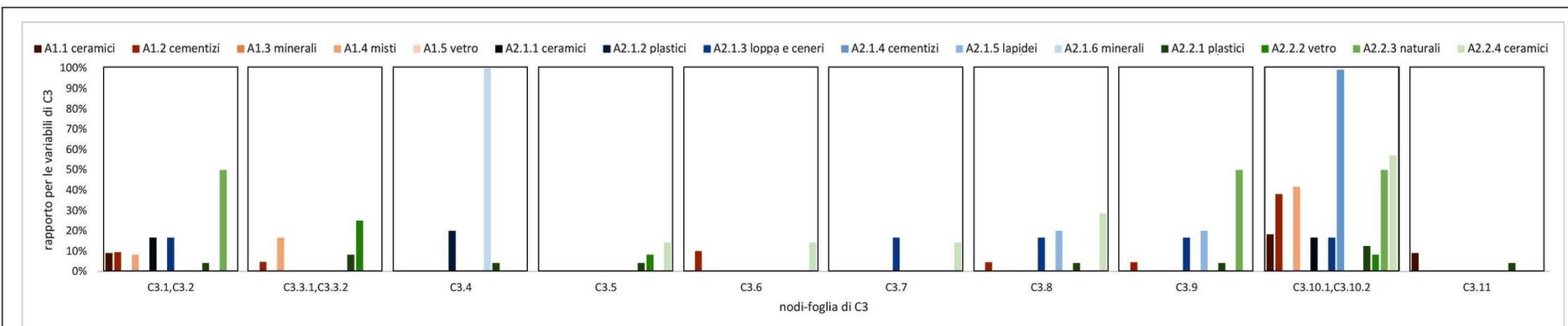


Figura 51. Rapporto per le variabili di C3 sui nodi-foglia di C3. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di C3. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

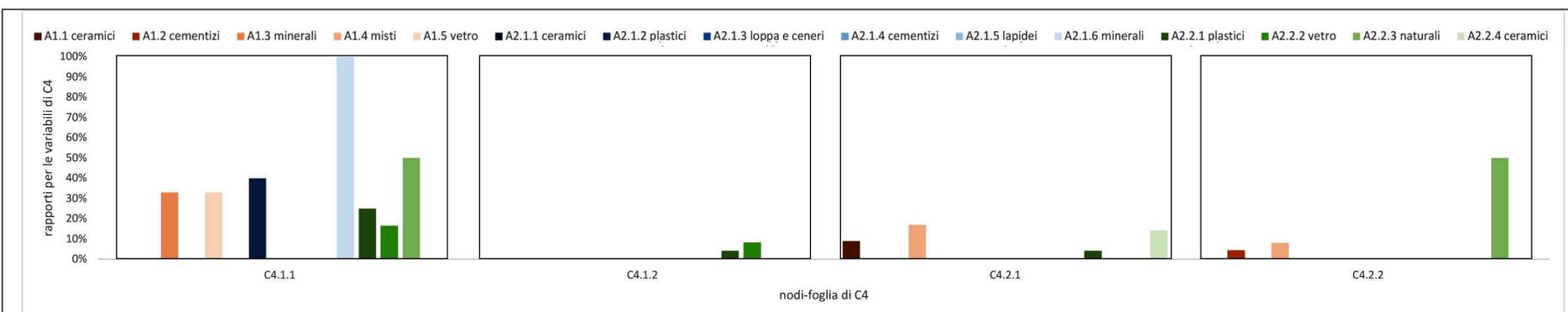
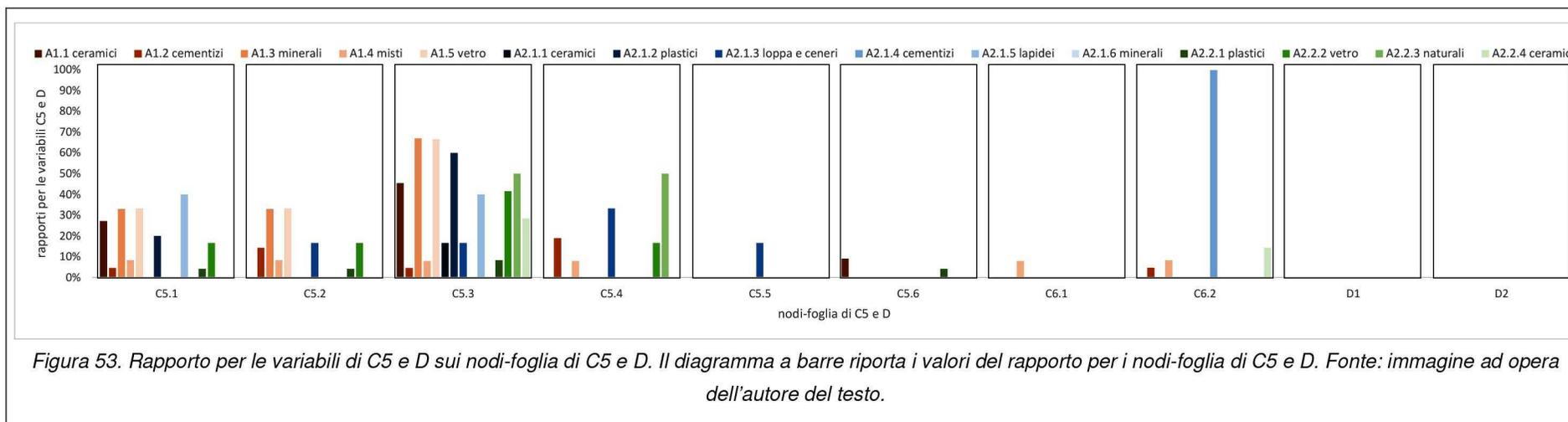
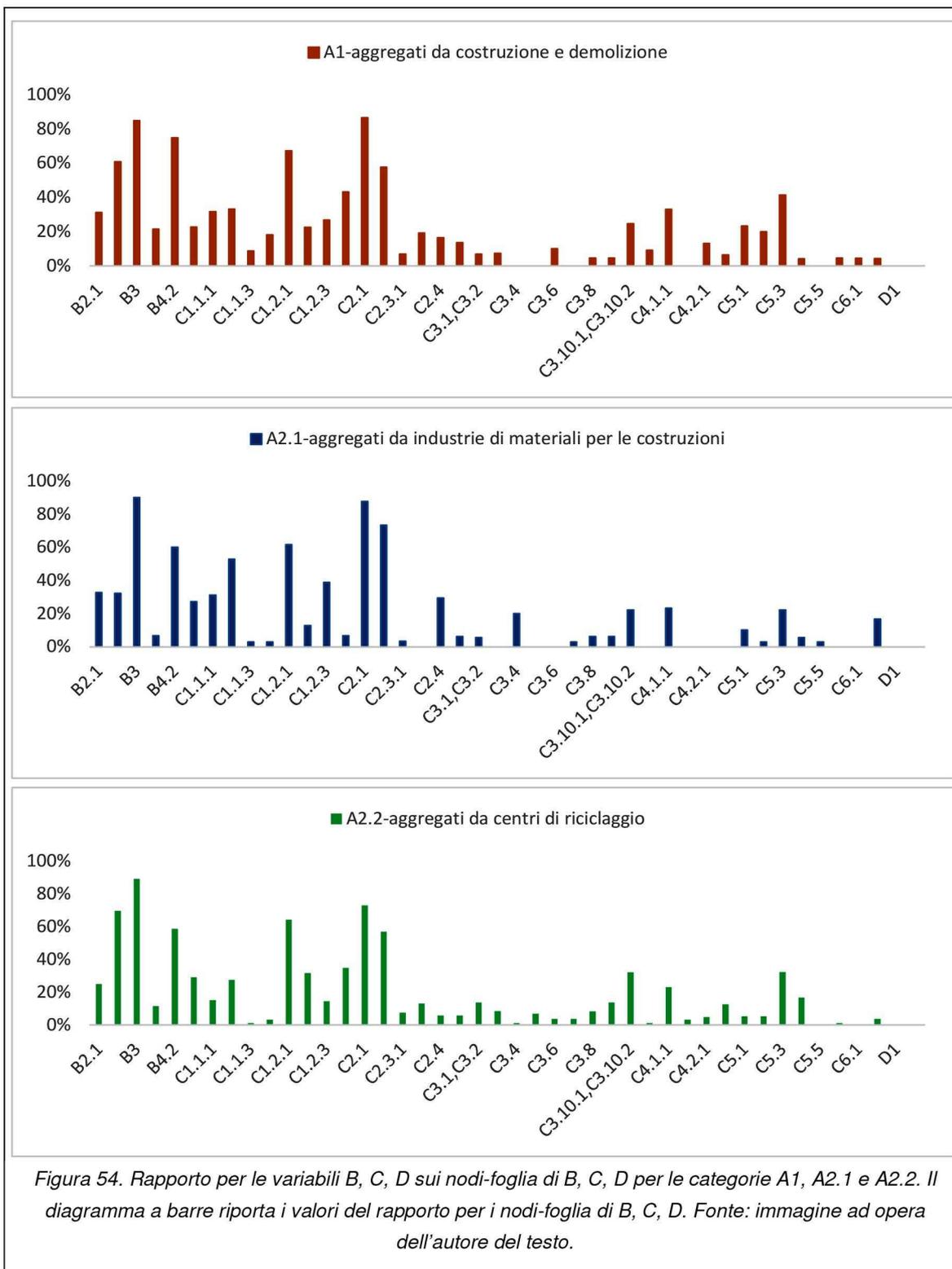


Figura 52. Rapporto per le variabili di C4 sui nodi-foglia di C4. Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia di C4. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Le proprietà chimico-mineralogiche (C5) hanno seguito un andamento irregolare, come visibile in Figura 53. Da C5.1 a C5.4, è stato osservato un modulo medio del 15% con un massimo del 31% per l'analisi SEM (C5.3) ed un minimo dell'8% per la TGA (C5.2) ed il test di lisciviazione (C5.4), mentre per l'analisi del pH e la XRF (C5.5 e C5.6) il valore è stato in media dell'1%. C5.3, inoltre, ha coperto 13 nodi-foglia di A sui 15 totali e 33 voci sulle 137 complessive, di cui 16 afferenti alla categoria degli AR da costruzione e demolizione. Infine, soltanto in 2 e 3 casi sui 137 analizzati erano presenti analisi ambientali (C6.1) o di fattibilità economica (C6.2), rispettivamente, ed in nessun articolo del *set* era fatta menzione di brevetti o di altre forme di tutela della proprietà intellettuale (D1) o riferimenti alla disponibilità in commercio delle malte testate (D2).



Con il proposito di analizzare più approfonditamente quanto riportato nei grafici appena richiamati, è stata calcolata la media dei rapporti per i singoli nodi-ramo di A (A1, A2.1 e A2.2.) e poi diagrammata separatamente. Gli aggregati da industrie di materiali per le costruzioni (A2.1) e centri di riciclaggio (A2.2), come nella Figura 54, hanno coperto la quasi totalità delle variabili B, C, D - 41 (A2.1) e 42 (A2.2) su 44 - ma i loro rapporti (20% per entrambe le categorie) sono stati in media più bassi di quelli per gli AR da costruzione e demolizione (25%). Infine, la quasi totalità delle misurazioni di durabilità (C3) e proprietà termoigrometriche (C4) erano riferite ad aggregati provenienti dai centri di riciclaggio.



Per concludere la sequenza S1, è stato calcolato il rapporto, indicato come $N_{B,C,D}$, tra il numero di conteggi dei nodi-foglia delle variabili B, C, D ed “N¹²”. Come

¹² Numero complessivo di voci per la variabile A-tipo di aggregato, ricavato sommando gli oggetti per ogni nodo-foglia di A, pari a 137.

riportato in Figura 55, le proporzioni della miscela (B) e le proprietà fisiche (C1) sono state le variabili più ricorrenti nell'intero *dataset*, mentre durabilità (C3) e proprietà termoigrometriche (C4) quelle meno esaminate. Le proprietà meccaniche (C2) e quelle chimico -mineralogiche (C5) hanno confermato il *trend* irregolare, atteso che il valore di $N_{B,C,D}$ era alto per alcune di queste grandezze - C2.1, C2.2, C5.3 - e basso per altre.

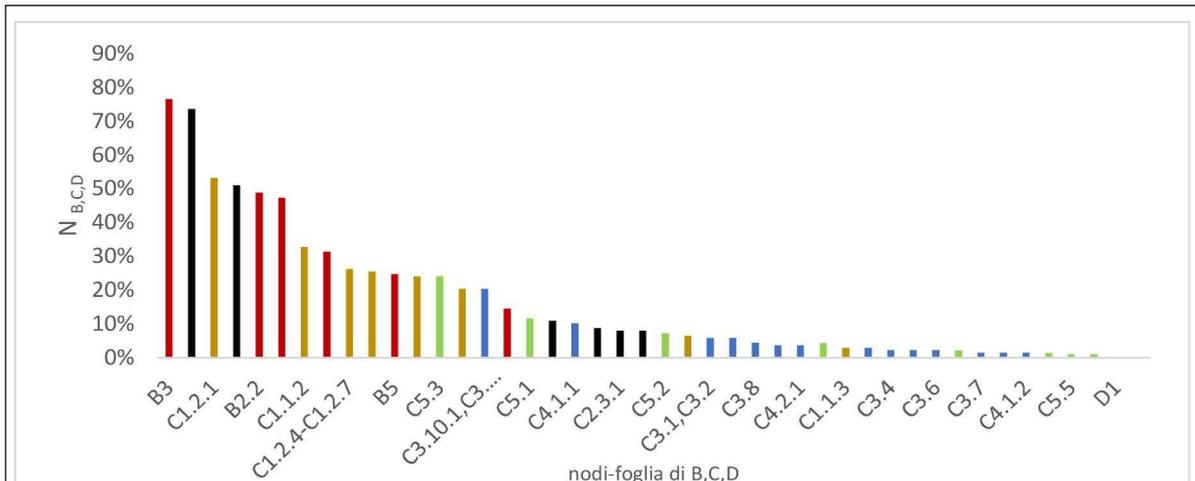


Figura 55. $N_{B,C,D}$ dei nodi-foglia di B, C, D. $N_{B,C,D}$ è il rapporto tra il numero di conteggi di ogni nodo-foglia di B, C e D ed il numero totale di voci (137). Il diagramma a barre riporta i valori del rapporto per i nodi-foglia B, C, D. I rapporti sono disposti in ordine decrescente. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Per confrontare i materiali ceramici, cementizi, plastici e vetro - in quanto comuni a diverse fonti di provenienza degli AR - sono stati tracciati dei grafici supplementari. I risultati hanno confermato che le proprietà fisiche allo stato indurito e le proprietà meccaniche sono state le variabili più ricorrenti. Nessuna grandezza termica ed igrometrica è stata misurata per gli aggregati cementizi - sia originati da costruzione e demolizione che dalle industrie di materiali per le costruzioni - e raramente sono state approntate analisi sulla durabilità.

Nella sequenza S2 gli articoli collezionati sono stati prima raggruppati in funzione dei parametri che la UNI EN 998-1:2016 annovera tra i requisiti per l'utilizzo delle malte come intonaci:

- resistenza alla compressione a 28 giorni, C2.1
- assorbimento d'acqua per capillarità, C1.2.4 - C1.2.7
- densità asciutta, C1.2.1
- permeabilità all'acqua sotto pressione, C3.6
- resistenza al vapore, C4.2.2
- conducibilità termica, C4.1.1

Con riferimento alla resistenza a compressione, 8 voci sono rientrate nella categoria CSI, 22 in CSII, 30 in CSIII e 77 in CSIV. Il filtro sull'assorbimento d'acqua per capillarità, C1.2.4 - C1.2.7, è risultato in 8 voci per W1 e 6 voci per W2 mentre W0 non è stato considerato in quanto corrispondente ad *un valore non dichiarato*. Soltanto 5 voci sono risultate compatibili con le specificazioni normative sulla densità asciutta ed una voce soltanto con quella sulla permeabilità all'acqua sotto pressione. Le malte analizzate, infatti, erano spesso pesanti e con una densità asciutta media di 1798 kg/m³, valore notevolmente più alto del riferimento di 1300 kg/m³ per la qualificazione come *malta alleggerita*. Con riguardo alle prestazioni termoigrometriche, 5 voci hanno soddisfatto il vincolo sia su C4.2.2 che su C4.1.1.

La combinazione delle specificazioni prestazionali - riportate in precedenza nella Tabella 2 - è stata a questo punto adoperata per la classificazione delle malte. Nessun oggetto era adeguato per la categoria OC: la permeabilità all'acqua sotto pressione era inferiore a 1mL/cm² in un solo caso ma l'assorbimento di acqua per capillarità superava il massimo normativo. Inoltre, soltanto un oggetto è stato classificato come malta termoisolante poiché in altre due circostanze non c'erano informazioni su resistenza al vapore (C4.2.2) e assorbimento d'acqua per capillarità (C1.2.4 - C1.2.7).

Miscele conformi a malte per scopi generali, rivestimento monostrato per esterni e finiture colorate sono state rilevate 6, 4 e 6 volte, rispettivamente. Nella Tabella 4 sono stati riportati i numeri di identificazione degli articoli contenenti le malte appena citate.

Tabella 4. Malte da intonaco secondo le specificazioni della UNI EN 998-1:2016. Si riportano i numeri di identificazione degli articoli contenenti le malte idonee.

GP ¹	LW ¹	CR ¹	OC ¹	R ¹	T ¹
8	5	8		8	8
26	22	26		98	
39	29	39			
49	83	49			
60		60			
96		96			

¹ Gli acronimi sono riferiti alla classificazione della UNI EN 998-1:2016.

Tre delle quattro malte LW - numeri *ID* 5, 22 e 29 - erano formulate con AR plastici provenienti dalle industrie di materiali per le costruzioni (A2.1.2) mentre in tre GP e CR - numeri *ID* 26, 39 e 49 - gli aggregati plastici erano originati da centri di riciclaggio (A2.2.1).

La relazione tra la fonte dell'aggregato riciclato e la classe di malta da intonaco è riportata nella Figura 56.

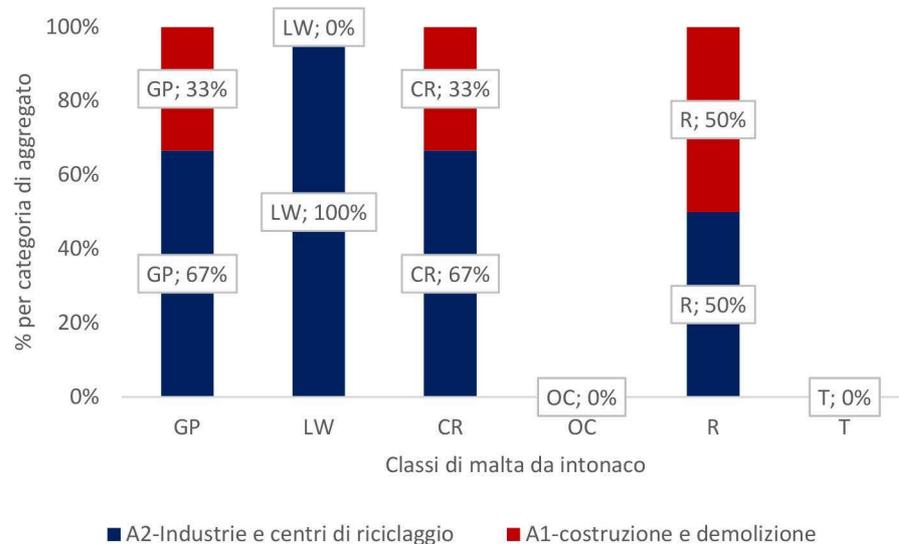


Figura 56. Malte idonee all'utilizzo secondo la UNI EN 998-1:2016. Il grafico riporta, per ogni classe di malta da intonaco, la percentuale di provenienza degli aggregati dalle due macrocategorie A1 e A2. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

La Figura 56 intende sottolineare che le malte classificabili come intonaci erano tendenzialmente - e nel caso specifico delle malte alleggerite, totalmente - formulate con aggregati afferenti al nodo-radice A2 (industrie di materiali per le costruzioni e centri di riciclaggio).

Lo stesso approccio è stato seguito per qualificare gli articoli sulla base delle indicazioni normative della UNI EN 998-2:2016 per le malte da muratura. Il numero di voci idonee per le classi M1, M2.5, M5, M10, M15 ed M20 è stato di 3, 6, 13, 5, 9 e 50, rispettivamente. La classe prevalente è stata la M20 che ha coperto più della metà degli articoli filtrati. Questi ultimi sono stati distinti in funzione del relativo nodo-foglia della variabile A, così da rintracciare eventuali relazioni tra la tipologia di AR e la classe di impiego della malta. Il numero di malte da muratura per ciascuno dei nodi-foglia di A è stato calcolato ed ordinato in maniera decrescente, come riportato in Figura 57. La classe più variamente assortita, quella M20, ha ricompreso 12 categorie di AR sul totale di 15, tra le quali quella riferita alle operazioni di costruzione e demolizione (A1) è stata la più frequente (34 conteggi su 62 totali) mentre M15, M5 ed M2.5 sono state più equamente distribuite.

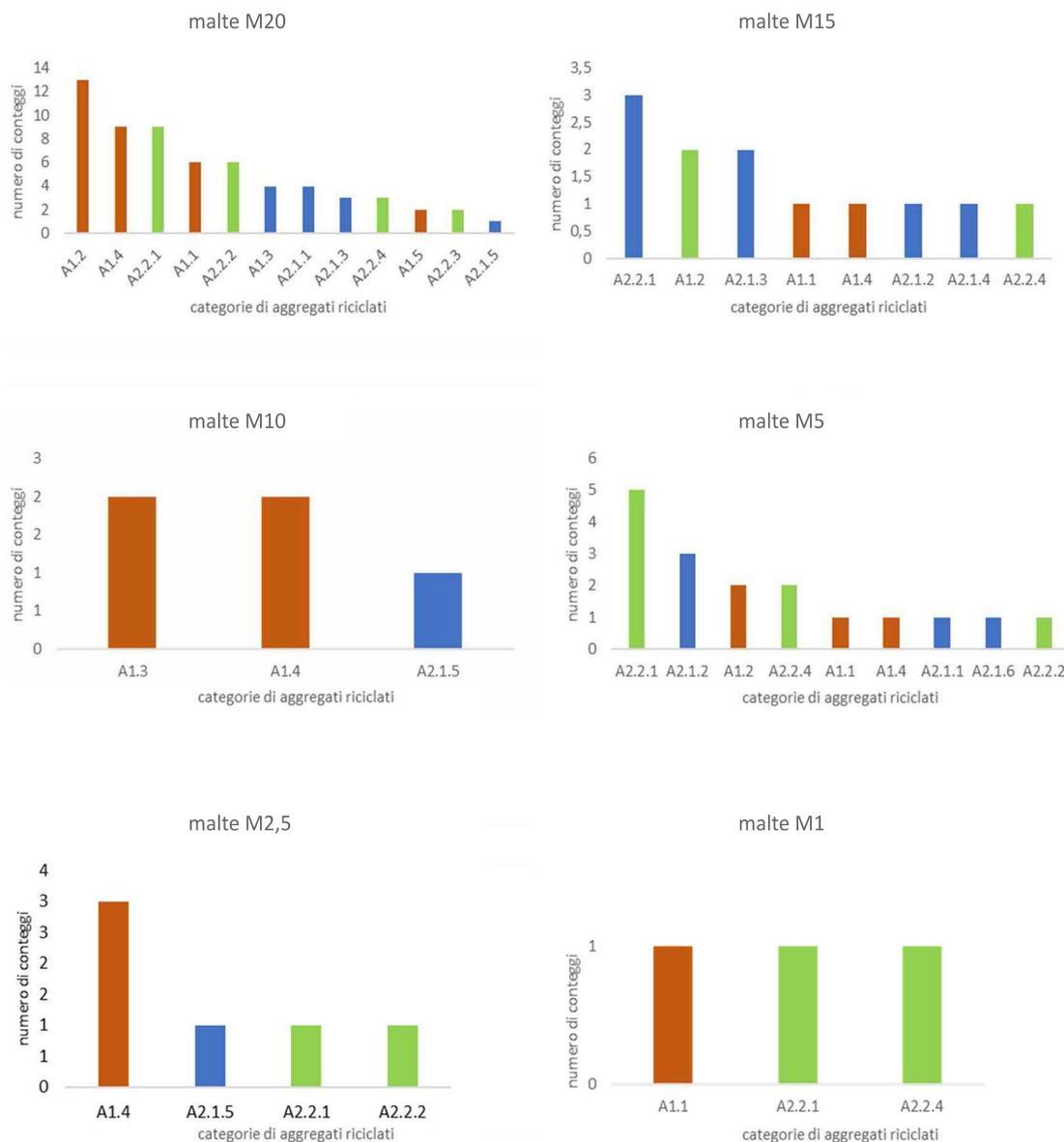


Figura 57. Malte idonee all'utilizzo secondo la UNI 998-2:2016. Una volta individuate, le malte sono state distinte in funzione del tipo di aggregato. Le figure riportano il numero, in ordine decrescente, di malte da muratura per ogni nodo-foglia di A, per ogni classe di malta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Come per le malte da intonaco si è proceduto a diagrammare la relazione tra la fonte degli aggregati riciclati e le classi di malta da muratura, mostrata in Figura 58.

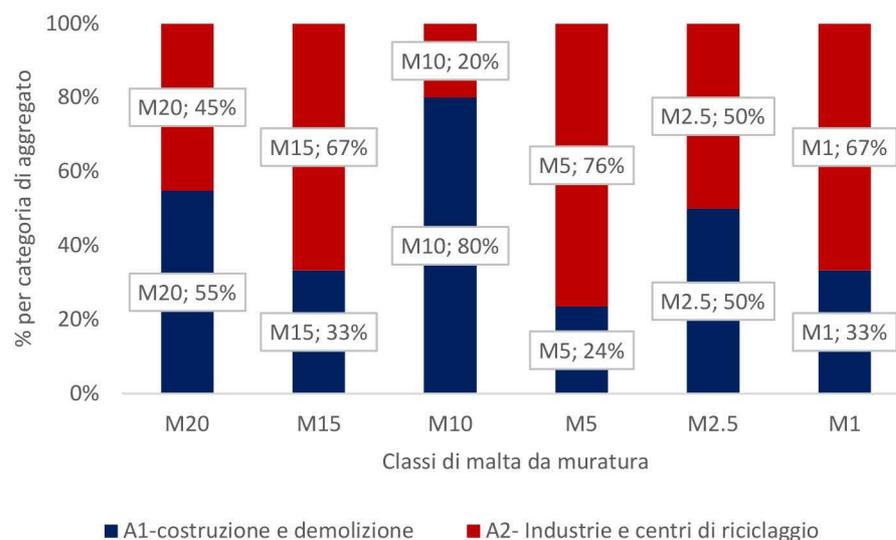


Figura 58. Malte risultate idonee all'impiego ai sensi della UNI EN 998-2:2016. Il grafico riporta per ogni classe di malta da muratura la percentuale di provenienza degli aggregati dalle due macrocategorie A1 e A2. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Le fasi sinora illustrate sono confluite in un momento di discussione teso ad individuare i minori e maggiori filoni di approfondimento degli autori interessatisi di malte confezionate con aggregati riciclati edili, categoria alla quale afferisce il prodotto adoperato nella sperimentazione oggetto del presente testo. A valle delle operazioni di classificazione e sintesi, le seguenti variabili sono parse significative ai fini dell'inquadramento dello stato dell'arte: tipologia di aggregato riciclato, proprietà testate e campo di utilizzo delle malte.

L'analisi della fonte di provenienza degli aggregati riciclati edili è risultata in una sorta di equilibrio tra le due macrocategorie individuate, "operazioni di costruzione e demolizione (C&Ds)" e "industrie e centri di riciclaggio". Tuttavia, se si confrontano C&Ds e la sottocategoria degli aggregati da industrie di materiali per le costruzioni, emerge un notevole sbilanciamento: 62 conteggi del primo rispetto ai 27 della seconda, su un totale di 137. Dal momento che gli scarti dei processi delle attività produttrici di materiali edili sono simili a quelli da C&Ds in termini chimico-mineralogici, è significativo che soltanto uno su cinque degli aggregati riciclati proviene dalla prima fonte citata mentre circa uno su due dalla seconda. Questa considerazione è concorde con quella riportata in altri studi che hanno osservato che il calcestruzzo demolito costituisce la fonte più consistente di aggregati riciclati, mentre i rifiuti di altri materiali edilizi sono meno adoperati [95,109].

Tra i materiali utilizzati negli articoli collezionati, i plastici ed i cementizi originati da centri di riciclaggio e *C&Ds* sono stati quelli più frequenti. Soltanto in 5 casi su 137 (plastici) ed in 1 caso su 137 (cementizi) provenivano da industrie di materiali per le costruzioni. Il dato sottolinea il basso livello di economia circolare implementato nello specifico ramo di attività produttive. Un uso più consistente degli scarti industriali, invece, rappresenterebbe un'operazione efficace dal momento che le attività produttive hanno capacità di controllare le caratteristiche dei propri sottoprodotti, altrimenti variabili come nel caso dei *C&Ds* e dei centri di riciclaggio dove la fonte primaria non è necessariamente o compiutamente specificata [110–112].

La sequenza di sintesi S1 ha evidenziato che un numero elevato di articoli analizzati focalizzava l'attenzione sulla caratterizzazione fisica e meccanica delle malte, mentre in pochi lavori erano presenti investigazioni relative alla durabilità o alle proprietà termo-igrometriche. Le proprietà fisiche, quali la lavorabilità, sono direttamente connesse alla adoperabilità delle malte in cantiere [113,114], pertanto è necessario misurarle per verificare l'effettiva utilizzabilità dei conglomerati [115–117]. In ogni caso, queste grandezze non sono ricomprese tra le specificazioni normative per le malte da muratura e da intonaco, eccezion fatta per la densità asciutta ed il coefficiente di assorbimento capillare che concorrono alla definizione di alcune classi di intonaci. Pur essendo un parametro normativo, la prestazione in termini di assorbimento capillare è stata raramente misurata negli articoli del *dataset*. In particolare, per gli aggregati provenienti dalle attività produttrici di materiali per le costruzioni il dato era disponibile soltanto in 2 casi su 27 analizzati. In ambo le situazioni, all'impiego di aggregati riciclati plastici - polistirene espanso [118] o estruso [119] - è corrisposta la riduzione dell'assorbimento d'acqua rispetto alla malta di confronto con aggregati naturali, ciò in conseguenza della natura idrofobica del prodotto plastico. La prevalente investigazione delle resistenze a compressione e flessione - tra le proprietà meccaniche - è stata rilevata anche in altri lavori [94,95] che a tal proposito hanno suggerito di estendere la caratterizzazione ingegneristica dei conglomerati con aggregati riciclati, ad esempio ponendo rilievo sulle tematiche ambientali. Per quanto attiene alla durabilità, alcune considerazioni sono state riportate in [95] ma il lavoro citato aveva ad oggetto aggregati riciclati adoperati in calcestruzzi dei quali la durabilità è misurata più frequentemente che nelle malte [120–122]. Infine, un numero esiguo di articoli revisionati trattava questioni inerenti alla sostenibilità, sia nell'accezione ambientale [123,124] che in quella economica [81,125]. Il tema della fattibilità in senso ampio è, invece, centrale per lo sviluppo e la commercializzazione dei prodotti testati.

I risultati della sequenza S2 hanno mostrato che la classe di malte da muratura più investigata era la M20, con 50 conteggi sul totale di 137, mentre soltanto 11 voci erano idonee all'impiego come intonaci. Il risultato è coerente con quanto esposto in proposito delle grandezze più misurate nel *set* di analisi, atteso che i parametri “formulazione, prestazioni e campo d'impiego” sono mutuamente interagenti. Difatti, se la campagna di indagini ambisce a verificare l'utilizzabilità degli aggregati riciclati come sostituti degli aggregati naturali in malte da muratura, la formulazione sarà orientata ad assicurare elevate prestazioni meccaniche. In tal caso, gli aggregati riciclati saranno tendenzialmente scelti tra ceramici [109,126,127], cementizi [63,113,128–132] e plastici [12,133–135], giacché questi materiali sono più performanti degli altri dal punto di vista meccanico. Al contrario, laddove l'attenzione sia rivolta alle malte da intonaco è preferibile siano impiegati materiali più leggeri, si ricorra a rapporti acqua-legante più alti e si misurino le proprietà termo-igrometriche e l'assorbimento d'acqua. Negli articoli del *dataset* le malte da intonaco erano formulate con aggregati plastici in 7 casi su 11, talvolta uniti ad altre tipologie, prettamente minerali. Le malte alleggerite, in particolare, erano confezionate con polistirene espanso ed estruso [29,30], vermiculite espansa [136], polvere di gomma, perlite espansa, poliestere [137] e plastica ricavata da cavi. Infine, l'unico articolo contenente una malta qualificabile come termoisolante era confezionata con segatura e residui di lavorazione del legno [138] e caratterizzata mediante la conducibilità termica, la resistenza al vapore, l'assorbimento d'acqua per capillarità, la densità asciutta, le resistenze a compressione e flessione e il ritiro da essiccamento. Dal momento che gli aggregati riciclati sono più leggeri di quelli naturali [95] - in conseguenza della loro maggiore porosità [139–141] - risultano più appropriati per le malte da intonaco che per quelle da muratura, specialmente poiché i fenomeni di assorbimento d'acqua per i riciclati - con alcune eccezioni per i prodotti plastici - sono molto maggiori che per i naturali [142] e possono impoverire le prestazioni meccaniche e la durabilità dei conglomerati [120,133].

Volendo sintetizzare quanto desunto dall'analisi della letteratura relativa alle malte confezionate con aggregati riciclati edili, poi confluita nel delineamento dell'attività sperimentale come sarà nell'immediato seguito descritto, è conveniente richiamare la sequenza già citata di “formulazione, prestazioni e campo d'impiego”. Ciò che si è riscontrato, in effetti, è che l'interesse è preminentemente rivolto a malte per la realizzazione di murature. Ciò implica, secondo i requisiti normativi, che la formulazione debba assecondare domande prestazionali meccaniche, poiché appunto è necessario che gli elementi tecnici e le unità tecnologiche nelle quali la malta è impiegata garantiscano sicurezza strutturale. Diretta conseguenza è la

preferenza per aggregati riciclati sufficientemente densi da non impoverire la resistenza meccanica del conglomerato, in particolare se ci si riferisce alla compressione. Considerazione, questa, confermata dalla numerosità degli articoli aventi ad oggetto aggregati riciclati provenienti dalle operazioni di costruzione e demolizione - in particolare cementizi, ceramici e misti - che pur comportando un aumento della porosità e dell'assorbimento d'acqua della malta rispetto all'opzione con aggregato siliceo, sono sufficientemente densi da garantire buone prestazioni meccaniche. Simmetricamente, una porzione abbastanza ridotta di articoli era orientata alla verifica dell'applicabilità degli aggregati riciclati in malte leggere ovvero, più correttamente, idonee all'impiego per intonaci, categoria che ricomprende una serie variegata di prodotti: malte termoisolanti, tonachina, intonaci deumidificanti. Considerate le caratteristiche generali di un aggregato riciclato - ossia densità contenuta e porosità elevata - la naturale vocazione d'impiego potrebbe essere più propriamente in prodotti ai quali non è demandata una prestazione meccanica importante. Pur tuttavia, la variabilità delle caratteristiche degli aggregati riciclati ne avvantaggia e ne condiziona l'utilizzo [143] poiché anche a parità di provenienza e di proprietà chimico-mineralogiche, la granulometria, la percentuale di impiego, la compatibilità con la matrice del legante [144] rendono gli inerti riciclati adattabili a diverse tipologie di prodotto.

Infine, per quanto attiene alle istanze dell'economia circolare, il ricorso ad aggregati provenienti dalle attività produttive di materiali per le costruzioni è risultato notevolmente contenuto, soprattutto nel caso di materiali cementizi. In tale direzione occorrono sforzi importanti per educare al riutilizzo dei sottoprodotti edili come Materie Prime Secondarie, in quanto pratica vantaggiosa per più soggetti. Dal punto di vista tecnico un aggregato "industriale" è di per sé stabile e controllato nella composizione e ciò si traduce nella costanza delle sue caratteristiche e quindi di un controllo più efficace sul risultato nel sistema "malta".

Inoltre, i produttori dei materiali edili ricaverrebbero benefici dall'industrializzazione della pratica di riciclo, potendo sia alleggerire gli oneri di conferimento a discarica sia introdurre nuovi prodotti nella propria filiera produttiva.

Sulla base di tutto quanto appena illustrato nel paragrafo 5.1 e nei paragrafi precedenti, è stato tracciato il cronoprogramma dell'attività sperimentale, per la cui articolazione, obiettivi, metodologia e risultati si rimanda al paragrafo seguente.

L'attività sperimentale, in pieno allineamento ai propositi dell'economia circolare auspicati per il comparto delle costruzioni, è stata finalizzata ad indagare la suscettività di impiego di uno scarto produttivo edile come aggregato per il confezionamento di un nuovo prodotto, ancora edile: una malta ecosostenibile. La circolarità dell'operazione deriva da una duplice possibilità offerta al soggetto produttore del componente edile da cui è originato il rifiuto, nel caso in commento blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato scartati in quanto non vendibili per difetti geometrici. *In primis*, l'eventualità di ampliare la linea produttiva reimpiegando lo scarto *in situ*, a valle di eventuali e contenute trasformazioni, per confezionare una malta premiscelata. In aggiunta ovvero in alternativa, nel caso di indisponibilità di attrezzature idonee al ramo produttivo dei premiscelati, la semplice conversione del rifiuto in Materia Prima Secondaria da adoperare come aggregato riciclato, appunto. Entrambe le opzioni prospettate sono spendibili economicamente e soprattutto sono sostenibili in quanto la riduzione della mole di rifiuti a discarica comporta benefici sia strettamente finanziari - il produttore risparmia gli ingenti oneri di conferimento - sia sociali, sia ambientali.

L'attività di laboratorio è stata eseguita presso le strutture del Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e del laboratorio di prove su materiali per le costruzioni TecnoLab srl (NA).

Il proposito complessivo del lavoro è stato scomposto in una serie di sotto-obiettivi da cui sono derivate le singole fasi di articolazione della ricerca. In un primo momento, infatti, l'attività è stata dedicata alla preliminare conoscenza del materiale tramite le caratterizzazioni fisica e chimico-mineralogica. Tale stadio, ritenuto imprescindibile, ha consentito di valutare la possibilità di impiego del materiale di scarto come aggregato, indipendentemente dal prodotto edilizio finale. Sulla scorta dei risultati positivi ottenuti, poi, si è formulata una prima ipotesi applicativa e si è proceduto al confezionamento di un ristretto gruppo di malte sul quale sono state eseguite prove di caratterizzazione fisica, chimico-mineralogica e di resistenza meccanica. Nella formulazione di queste malte si è optato per un'unica variabile di miscela, ossia la percentuale di sostituzione dell'aggregato naturale con quello riciclato, adoperando una sola tipologia di legante.

Conclusasi la prima fase sperimentale, nel programma di confezionamenti successivo, più corposo, è stata adottata l'impostazione metodologica del *mix design* ed aggiunta una seconda variabile di miscela. Con la percentuale di sostituzione dell'aggregato naturale con quello riciclato è stata, infatti, combinata la tipologia di legante. Le malte sono state poi caratterizzate in analogia a quanto operato per la prima campagna di confezionamenti, con l'aggiunta di ulteriori *test* di misurazione delle grandezze fisiche tenute in conto dalla normativa in materia di malte. Attesa l'incidenza della tipologia di legante sulle proprietà indurite e quindi sul campo di applicazione delle malte, infatti, i risultati ottenuti sono stati analizzati sia per investigare la variabilità del campo di utilizzo delle malte confezionate con l'*AAC*, sia per ottimizzare le scelte sui componenti della miscela proprio in funzione dell'applicazione del conglomerato. Le riflessioni hanno guidato nel delineamento dello stadio finale dell'attività sperimentale.

Ancora richiamando la connessione "formulazione, prestazioni e campo d'impiego", nella campagna di confezionamento finale i parametri di *mix design* - sia qualitativi che quantitativi - e la procedura di caratterizzazione dei prodotti induriti sono stati organizzati e distinti in funzione delle due categorie di impiego delle malte non strutturali: intonaci e allettamento delle murature. Ciò in considerazione della diversa *domanda di funzionamento*, poi prestazione, che ad uno stesso sistema materiale, la malta, sono richieste a seconda dell'elemento tecnico di impiego. Il soddisfacimento della domanda può essere raggiunto, infatti, tramite le scelte operate sull'assortimento della miscela della quale si è studiata, appunto, l'ottimizzazione.

5.2)1 FASE 1: OBIETTIVI, MATERIALI E METODI, RISULTATI, DISCUSSIONI

RIFERIMENTI NORMATIVI

- UNI EN 933-1:2012, *Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 1: Determinazione della distribuzione granulometrica - Analisi granulometrica per stacciatura*
- UNI EN 933-2:2020, *Prove per determinare le caratteristiche geometriche degli aggregati - Parte 2: Determinazione della distribuzione granulometrica - Setacci di controllo, dimensioni nominali delle aperture*
- UNI EN 1097-6:2013, *Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Parte 6: Determinazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua*
- UNI EN 197-1:2011, *Cemento - Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni*
- UNI EN 459-1:2015, *Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità*
- UNI EN 196-1:2016, *Metodi di prova dei cementi - Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche*
- UNI EN 1015-11:2019, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*
- UNI EN 1936:2007, *Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della massa volumica reale e apparente e della porosità totale e aperta*

OBIETTIVI

Le attività descritte nell'immediato seguito, come anticipato, hanno avuto due finalità principali. *In primis*, la caratterizzazione del materiale riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato (AAC) in maniera sufficiente a verificarne l'idoneità all'impiego come aggregato. Secondariamente, il confezionamento e la caratterizzazione di un gruppo di malte formulate sulla base di un'ipotesi applicativa, descritta nella sezione relativa ai risultati, conseguente agli esiti dei *test* sull'AAC. A tal proposito, in particolare, si è inteso indagare la risposta meccanica delle malte ed approfondire, mediante un'analisi diffrattometrica ai raggi X, gli aspetti inerenti alla potenziale attività del gesso¹³ - presente nell'aggregato riciclato - in un ambiente umido, quale quello successivo al mescolamento delle polveri con l'acqua nella fase di preparazione del conglomerato.

¹³ vedasi paragrafo 4.2, pagina 85

MATERIALI E METODI

CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE RICICLATO IN CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO | MATERIALI

L'oggetto della caratterizzazione, proveniente dallo scarto della produzione di blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato GASBETON®, è stato prelevato presso lo stabilimento sito in Volla (NA) dell'azienda EKORU srl, titolare del marchio. Il materiale - come mostrato in Figura 59 - è stato fornito in consistenza sciolta con una granulometria compresa tra 0 e 5 mm. L'operazione di molitura dei blocchi, scartati dalla vendita perché dotati di difetti geometrici, è stata eseguita mediante un frantumatore in dotazione presso lo stabilimento produttivo.



Figura 59. Il materiale oggetto della sperimentazione: blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato frantumati in una granulometria compresa tra 0 e 5 mm. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE RICICLATO IN CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO | METODI

Ai fini di verificarne l'idoneità di utilizzo come aggregato, il materiale riciclato è stato caratterizzato fisicamente e chimico-mineralogicamente. Le attività sono state svolte presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II.

GRANULOMETRIA. La distribuzione granulometrica è stata eseguita secondo la procedura di setacciatura a secco normata dalla UNI EN 933-1:2012, applicabile ad aggregati naturali ed artificiali fino ad una dimensione nominale di 63 mm. Allo

scopo, è stata impiegata una serie di setacci di controllo con dimensioni nominali delle aperture di 0,063 mm; 0,125 mm; 0,25 mm; 0,50 mm; 1,00 mm; 2,00 mm; 4,00 mm; 5,00 mm conformi alla UNI EN 933-2:2020. Previa esecuzione della setacciatura, una porzione di materiale è stata pesata mediante bilancia elettronica ed essiccata in stufa ad una temperatura costante di $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ per un tempo sufficiente a determinare il raggiungimento di una massa costante, ossia quella la cui variazione per pesate effettuate ad intervalli di un'ora è inferiore allo 0,1%. Raggiunta la condizione, la setacciatura è stata eseguita su una massa di 1 kg di materiale essiccato. Unitamente alle frazioni di materiale essiccato trattenute ad ogni setaccio è stata calcolata la percentuale di fini passanti attraverso il setaccio di maglia minore (0,0063 mm) secondo l'equazione:

$$f = \frac{100P}{M_1} \quad (\text{Eq.17})$$

con:

- f, percentuale di fini
- P, massa di materiale essiccato passante al setaccio di 0,0063 mm, espressa in g
- M_1 , massa di materiale essiccato della porzione di prova, espressa in g

MASSA VOLUMICA ED ASSORBIMENTO D'ACQUA. La caratterizzazione è proseguita con la misurazione della massa volumica dei granuli e dell'assorbimento d'acqua, effettuata secondo il metodo con *picnometro Le Chatelier per aggregati con granuli passanti attraverso il setaccio di prova da 31,5 mm e trattenuti dal setaccio di prova da 4 mm* normato dalla UNI EN 1097-6:2013. La prova è consistita nell'immergere nell'acqua distillata contenuta nel picnometro, mantenuta ad una temperatura di $22\pm 3^{\circ}\text{C}$, una porzione di materiale - come regolato dalla UNI EN 932-2:2000 - avendo cura di rimuovere l'aria intrappolata mediante la roteazione e lo scuotimento del sistema. Successivamente il picnometro è stato posto in un bagno d'acqua, ad una temperatura di $22\pm 3^{\circ}\text{C}$, per $24\pm 0,5$ h ed al termine del periodo è stato estratto e nuovamente scosso e roteato per eliminare residui di aria. Il picnometro è stato quindi riempito con acqua distillata fino al traboccamento, asciugato esternamente e pesato registrando il valore della massa dell'intero sistema (picnometro, acqua, porzione di materiale saturo), nominata M_2 . Il materiale è stato rimosso dall'acqua e lasciato scolare mentre il picnometro, vuoto, è stato riempito nuovamente a livello, asciugato esternamente e pesato, appuntando il valore M_3 (picnometro, acqua). In ambo le operazioni è stata letta anche la temperatura dell'acqua avendo cura che nella determinazione delle due masse non ci fosse una

differenza superiore ai 2°C. La porzione di materiale scolata è stata tamponata con un panno, così da allontanare l'acqua dalla superficie esterna dei granuli, pesata riportando il valore M_1 , ed essiccata in stufa ventilata ad una temperatura costante di $110\pm 5^\circ\text{C}$ per un tempo sufficiente a determinare il raggiungimento di una massa costante, ossia quella la cui variazione per pesate effettuate ad intervalli di un'ora è inferiore allo 0,1%. Ottenuta la condizione, il materiale è stato raffreddato e pesato appuntandone il valore M_4 .

Sono stati quindi calcolati:

- massa volumica apparente dei granuli (kg/m^3):

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (\text{Eq.18})$$

- massa volumica apparente dei granuli essiccati in stufa (kg/m^3):

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (\text{Eq.19})$$

- massa volumica apparente dei granuli saturi a superficie asciutta (kg/m^3):

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (\text{Eq.20})$$

- assorbimento d'acqua dopo l'immersione per 24 h (%):

$$W_{24} = 100 \frac{M_1 - M_4}{M_4} \quad (\text{Eq.21})$$

con

- ρ_w , massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova (kg/m^3):
- M_1 , massa in aria dell'aggregato saturo a superficie asciutta (g)
- M_2 , massa del picnometro contenente il campione di aggregato saturo e l'acqua (g)
- M_3 , massa del picnometro riempito con sola acqua (g)
- M_4 , massa in aria della porzione di prova essiccata in stufa (g)

CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-MINERALOGICA. Al fine di individuarne e classificarne le fasi chimiche e mineralogiche, il materiale è stato sottoposto ad un'analisi termogravimetrica (*ThermoGravimetric Analysis - TGA*) e ad una diffrattometria ai raggi X (*X-Ray Diffraction - XRD*).

La prima, specificamente, eseguita con una macchina *Netsch - STA 409 PC Luxx*, ha monitorato la perdita di massa di un campione di materiale di 20 mg riscaldato in condizioni ambientali controllate. La tecnica si basa sulla dipendenza delle reazioni chimiche di decomposizione dalla temperatura, ciò implica che ogni sostanza si degrada in un *range* termico piuttosto contenuto. La rilevazione delle

variazioni gravimetriche del campione in funzione della temperatura del sistema, quindi, fornisce sia informazioni qualitative sulla sua composizione chimica - le temperature in occasione delle quali sono letti i salti nella massa del campione corrispondono alla decomposizione di precisi composti - che quantitative, nella misura in cui nelle strutture chimiche a stechiometria fissa è possibile risalire alla stima delle percentuali dei componenti. Il campione di AAC è stato sottoposto ad un riscaldamento dai 23°C ai 1200°C con un incremento di 10°C/min ed i risultati sono confluiti nel tracciamento del diagramma che sarà mostrato nella sezione dedicata.

La diffrattometria ai raggi X, eseguita mediante una macchina *Philips X'pert PRO multipurpose powder diffractometer* con una lunghezza dei raggi X di 1,54 Å su una porzione di materiale preventivamente ridotto in polvere, invece, ha consentito l'identificazione delle specie mineralogiche cristalline presenti.

La combinazione dei dati restituiti dalle due analisi ha consentito di ricavare informazioni utili alla qualificazione complessiva del campione.

CONFEZIONAMENTO DELLE MALTE | MATERIALI

Il primo gruppo di malte è stato confezionato adoperando come legante una calce idraulica artificiale ottenuta mescolando un cemento *Portland CEM II 32,5 A/L* (classificazione secondo UNI EN 197-1:2011) ed una calce aerea *DL 85-30S* (classificazione secondo UNI EN 459-1:2015) in proporzioni in massa di 3:2. Come aggregati sono stati impiegati una sabbia silicea (SS) naturale fornita dalla Bacchi spa, con massa volumica in mucchio dichiarata dal produttore di 1460 kg/m³, ed il Calcestruzzo Aerato Autoclavato (AAC) con le proprietà risultate dalla procedura di caratterizzazione prima descritta. Per il proporzionamento tra i componenti legante, aggregato ed acqua, in questa prima campagna di confezionamenti si è fatto riferimento alle indicazioni della norma UNI EN 196-1:2016.

Cinque miscele sono state confezionate adoperando un rapporto aggregato-legante in massa costante di 3:1. La prima miscela - indicata d'ora in avanti "1" - è stata utilizzata come riferimento, *i.e. tal quale*, e formulata con solo aggregato naturale. Negli altri gruppi di malte, indicati d'ora in avanti "2,3,4,5", l'aggregato naturale (SS) è stato progressivamente sostituito con una percentuale in massa di aggregato riciclato (AAC) dal 12,5% al 50%. Le quantità di legante ed aggregato totale (sabbia silicea ed AAC) sono state mantenute invariate in tutte le miscele. Il rapporto acqua-legante, invece, è stato adattato in funzione della maggiore capacità di assorbimento dell'AAC rispetto alla sabbia silicea, dato, questo, supposto da quanto osservato in letteratura e confermato dalle attività di caratterizzazione eseguite. In particolare, l'acqua impiegata per la miscela 1 è stata triplicata in quella

della miscela 5 contenente il 50% di AAC. Le proporzioni delle diverse formulazioni sono riportate nella Tabella 5.

Tabella 5. Composizione delle malte testate.

Sigla miscela	B(g)	SS(g)	AAC(g)	W(g)	W/B	AR(%)
1	450	1350	0	225	0,50	0
2	450	1181	169	337	0,75	12,5
3	450	1012	338	450	1,00	25
4	450	844	506	562	1,25	37,5
5	450	675	675	675	1,50	50

B, legante; SS, sabbia silicea; AAC, Calcestruzzo Aerato Autoclavato; W, acqua di impasto; W/B, rapporto acqua-legante in massa; AR, percentuale in massa di aggregato riciclato su aggregato totale.

CONFEZIONAMENTO DELLE MALTE | METODI

Le malte sono state preparate secondo le modalità indicate nella UNI EN 196-1:2016 presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione Industriale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. L'aggregato naturale (SS) e quello riciclato (AAC) sono stati preliminarmente essiccati in stufa ventilata - secondo le modalità già descritte in proposito della caratterizzazione dell'aggregato riciclato - e miscelati a secco per poi essere uniti alla pasta di legante ed acqua nella mescolatrice planetaria (Figura 60).



Figura 60. Mescolatrice planetaria impiegata per la preparazione dell'impasto. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

L'impasto è stato quindi colato in appositi stampi metallici prismatici di dimensioni 40x40x160 mm conformi alla norma UNI EN 1015-11:2019 di specificazione della geometria dei provini da sottoporre a prova di resistenza a flessione e compressione. Le miscele fresche di questi campioni, cinque in totale e ciascuna con tre provini siglati con le lettere A, B, C, sono state compattate

adoperando un apparecchio a scosse ed infine stagionate per 28 giorni in una camera climatica a temperatura e umidità controllate, secondo quanto indicato nel prospetto 1 della norma UNI EN 1015-11:2019 per le *malte di cemento e di calce aerea/cemento con massa della calce aerea non maggiore del 50% della massa totale del legante* ed ivi richiamato:

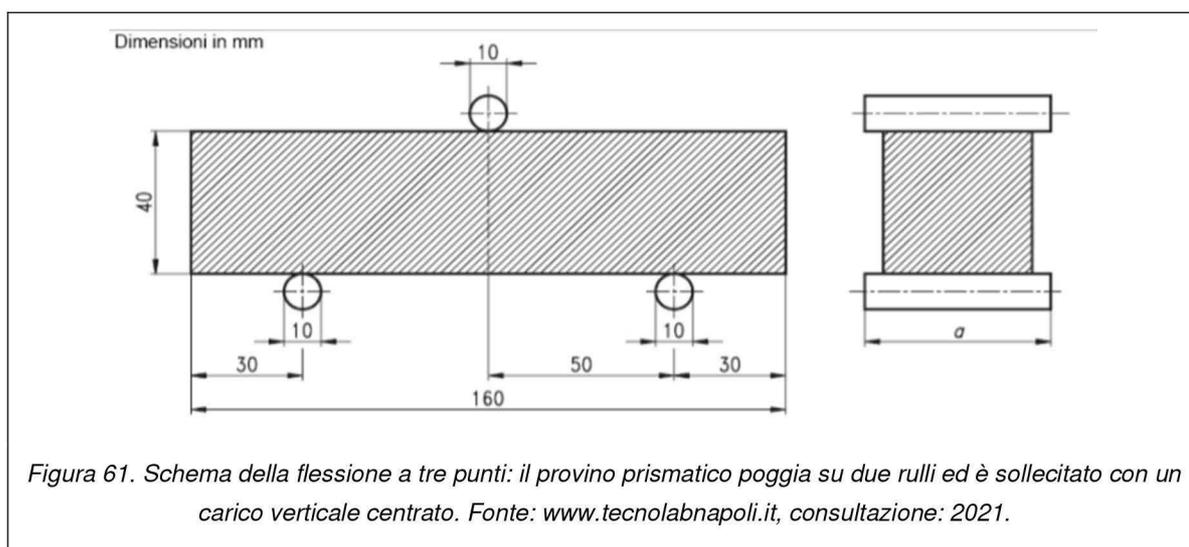
- 2 giorni in stampo metallico a temperatura di $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $95\pm 5\%$
- rimozione dello stampo e 5 giorni a temperatura di $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $95\pm 5\%$
- 21 giorni a temperatura di $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $65\pm 5\%$

CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE | METODI

Al termine dei 28 giorni di maturazione sono state eseguite le prove su malta indurita di caratterizzazione meccanica, fisica e chimico-mineralogica.

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA. Sui provini prismatici sono state eseguite le prove di resistenza a flessione a tre punti e compressione uniassiale, in regime di controllo di spostamento, normate dalla UNI EN 1015-11:2019. L'attività è stata eseguita presso il laboratorio di prove su materiali da costruzione TecnoLab srl (NA).

La resistenza a flessione è stata misurata sui tre provini delle cinque miscele applicando un carico centrato verticale ad una velocità di 50 ± 10 N/s secondo lo schema mostrato in Figura 61:



Raggiunta la rottura e letto il carico corrispondente, la resistenza a flessione è stata calcolata mediante l'Eq.(22) secondo il riferimento teorico alla trave appoggiata-appoggiata con carico applicato in mezzzeria:

$$\sigma_f = 1,5 \frac{FL}{bh^2} \quad (\text{Eq.22})$$

con:

- σ_f , resistenza a flessione (N/mm²)
- F, carico di rottura (N)
- L, distanza tra gli appoggi (100 mm)
- b, base della sezione retta del provino, (40 mm)
- h, altezza della sezione retta del provino, (40 mm)

Con stessa velocità di applicazione del carico e mediante l'utilizzo di un compressore, uno dei mezzi prismi ottenuti dalla rottura a flessione, per ogni miscela, è stato sollecitato a compressione uniassiale. Il valore del carico di rottura letto dal macchinario è stato inserito nell'Eq.23 per ricavare la resistenza a compressione:

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{Eq.23})$$

con:

- σ_c , resistenza a compressione (N/mm²)
- F_c , carico di rottura (N)
- A, area della sezione di base del provino (40x40 mm²)

CARATTERIZZAZIONE FISICA. Per la misurazione delle densità reale¹⁴ ed apparente¹⁵, della porosità accessibile all'acqua e dell'assorbimento d'acqua sono state seguite le procedure della UNI EN 1936:2007. Per ciascuna miscela tre prismi spezzati sono stati essiccati in stufa ventilata ad una temperatura di 70±5°C fino al raggiungimento di una massa costante. Raggiunta la condizione, i provini sono stati pesati e la loro massa asciutta è stata segnata come M₁. A questo punto i campioni sono stati tenuti per 24 h sottovuoto all'interno di una camera in vetro dove la pressione è stata gradualmente ridotta al valore di 15±5 mmHg così da evacuare l'aria contenuta nei pori (Figura 62). Trascorso il periodo è stato introdotto un volume d'acqua all'interno della camera sufficiente ad immergere la superficie laterali dei provini per almeno 5 mm di altezza. I campioni sono quindi stati tenuti sottovuoto e parzialmente immersi in acqua per 24 h alla pressione di 15±5 mmHg. Al termine di questo secondo stadio, la pressione è stata progressivamente riportata alle condizioni atmosferiche ed i provini sono stati mantenuti in acqua per ulteriori ed ultime 24 h (Figura 62).

¹⁴ Rapporto tra la massa del campione a secco ed il volume netto (volume apparente meno volume dei pori)

¹⁵ Rapporto tra la massa del campione a secco ed il volume apparente (volume netto più volume dei pori)



Figura 62. Condizionamento dei provini per la caratterizzazione fisica. A sinistra, inserimento nella camera e creazione del sottovuoto; a destra, inserimento dell'acqua per l'immersione dei provini. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

Conclusi i tre cicli, per un totale di 72 h, i campioni sono stati rimossi dalla camera e pesati con una bilancia idrostatica riportando il valore M_2 . La loro superficie esterna è stata rapidamente tamponata con un panno e ne è stata misurata la massa satura a superficie asciutta M_3 (Figura 63).

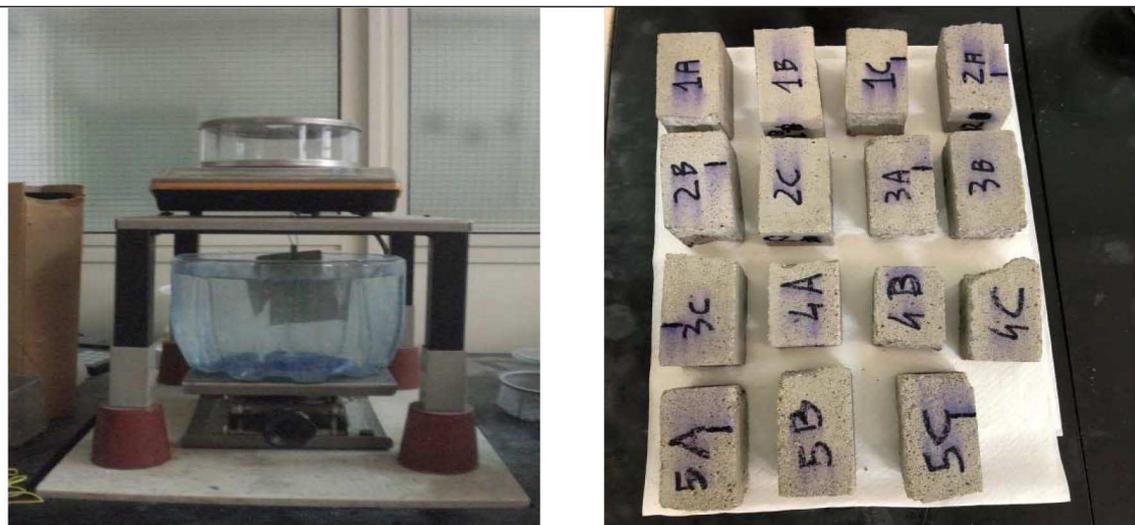


Figura 63. Caratterizzazione fisica dei provini. A sinistra, lettura della massa satura mediante bilancia idrostatica; a destra, campioni saturi con superficie asciutta. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

Le densità reale ed apparente, la porosità accessibile all'acqua ed il coefficiente di assorbimento d'acqua sono stati ricavati nel seguente modo:

- densità reale (kg/m^3):

$$\rho_r = \frac{M_1}{M_1 - M_2} \quad (\text{Eq.24})$$

- densità apparente (kg/m³):

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M_1}{M_3 - M_2} \quad (\text{Eq.25})$$

- porosità accessibile all'acqua (%):

$$p = 100 \frac{M_3 - M_1}{M_3 - M_2} \quad (\text{Eq.26})$$

- assorbimento d'acqua (%):

$$W_{\%} = 100 \frac{M_3 - M_1}{M_1} \quad (\text{Eq.27})$$

con

- M_1 , massa del campione a secco (kg)
- M_2 , massa satura idrostatica del campione (kg)
- M_3 , massa satura a superficie asciutta del campione (kg)

CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-MINERALOGICA. Conclusi le attività di caratterizzazione fisica, è stata eseguita una *XRD*, secondo le stesse modalità descritte in proposito del materiale riciclato¹⁶, su porzioni prelevate dai prismi spezzati delle miscele 1, 3 e 5 e ridotte in polvere. L'analisi, nota la presenza di gesso nell'*AAC*, ha inteso verificare se i gruppi solfatici presenti al suo interno fossero ritrovati tal quali nella malta indurita, ossia come solfato di calcio diidrato, oppure se, eventuali reazioni di solubilizzazione o lisciviazione in ambiente umido avessero comportato la formazione di composti come ettringite o monosolfato di alluminio¹⁷. La *XRD* è stata condotta soltanto su tre delle cinque formulazioni per confrontare le due situazioni limite - assenza e massima presenza dell'aggregato riciclato, miscele 1 e 5 - ed una situazione intermedia, miscela 3.

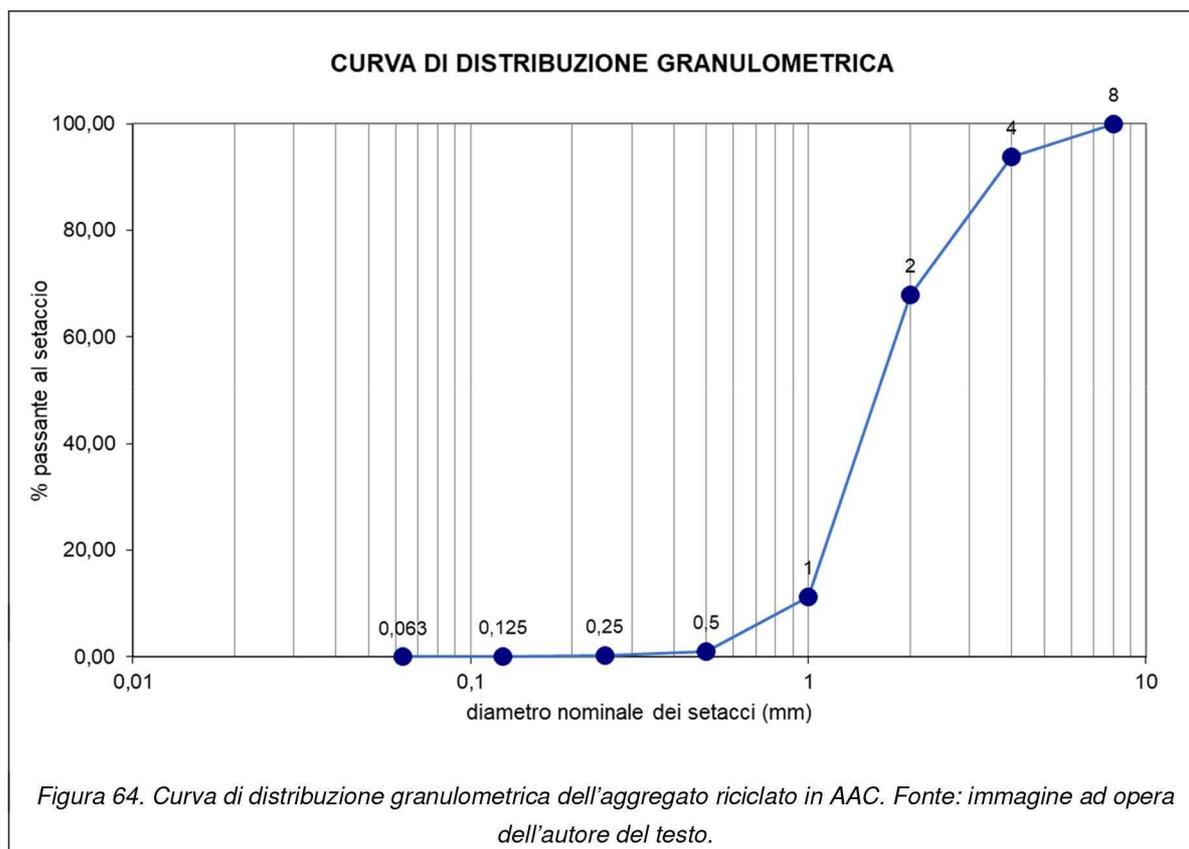
¹⁶ Caratterizzazione del materiale riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato | Metodi | Caratterizzazione chimico-mineralogica, pagina 131

¹⁷ Vedasi paragrafo 4.2, pagina 85

RISULTATI

CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE RICICLATO IN CALCESTRUZZO AERATO AUTOCLAVATO

GRANULOMETRIA. La curva di distribuzione granulometrica corrisposta alla stacciatura dell'aggregato riciclato è mostrata in Figura 64. Unitamente al grafico della curva, per facilitare la comprensione dei risultati, si riporta in Figura 65 la minuta di prova contenente le percentuali di trattenuto e passante per ogni intervallo granulometrico.



MASSA VOLUMICA ED ASSORBIMENTO D'ACQUA. I risultati delle misurazioni di masse volumiche ed assorbimento d'acqua sono riportate nella Tabella 6. La Figura 66 mostra alcune delle fasi delle operazioni di laboratorio.

Tabella 6. Proprietà fisiche degli aggregati secondo UNI EN 1097-6:2013.

M_1 (g)	M_2 (g)	M_3 (g)	M_4 (g)	ρ_{rd} (kg/m ³)	ρ_a (kg/m ³)	ρ_{ssd} (kg/m ³)	W_{24} (%)
77,93	477,73	452,29	45,11	860	1480	2290	72,76

M_1 , massa in aria dell'aggregato saturo a superficie asciutta; M_2 , massa del picnometro contenente il campione di aggregato saturo e l'acqua; M_3 , massa del picnometro riempito con sola acqua; M_4 , massa in aria della porzione di prova essiccata in stufa; ρ_{rd} massa volumica apparente dei granuli essiccati in stufa; ρ_{ssd} , massa volumica apparente dei granuli saturi a superficie asciutta; ρ_a , massa volumica apparente dei granuli; W_{24} , assorbimento d'acqua dopo l'immersione per 24 h.

Identificazione del Condizioni di prova Prova richiesta: Apparecchiatura			AAC riciclato Ur 65% , Temperatura 20°C Determinazione della distribuzione granulometrica Set di setacci UNI 933-2:2020				
RISULTATI DI PROVA							
Massa totale essicata = 1000			Passante		Setaccio Passante		
		Trattenuto					
	125	0	0,00%	1000	100,00%	0,063	0,08
	63	0	0,00%	1000	100,00%	0,125	0,14
	31,5	0	0,00%	1000	100,00%	0,25	0,39
	16	0	0,00%	1000	100,00%	0,5	1,15
SETAC	8	0	0,00%	1000	100,00%	1	11,40
CIO	4	61,63	6,16%	938,37	93,84%	2	68,02
UNI 933-	2	258,18	25,82%	680,19	68,02%	4	93,84
2	1	566,22	56,62%	113,97	11,40%	8	100,00
	0,500	102,47	10,25%	11,5	1,15%	16	100,00
	0,250	7,57	0,76%	3,93	0,39%	31,5	100,00
	0,125	2,51	0,25%	1,42	0,14%	63	100,00
	0,063	0,67	0,07%	0,75	0,08%	125	100,00
Massa sul fondo (P) [g]			0,75	Trattenuto allo 0,063 = M ₂ [g] =		0,67	
Massa Provino [g]			1000	Contenuto di fini "f"		7,50%	
Diametro min inerte [mm]			0,063	Diametro Max inerte [mm]		5	

Figura 65. Minuta di prova della distribuzione granulometrica dell'aggregato riciclato in AAC. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.



Figura 66. Fasi di misurazione delle proprietà fisiche dell'aggregato riciclato. A sinistra, aggregato immerso nel picnometro, a destra, picnometro con acqua fino al traboccamento. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

La massa volumica dell'aggregato riciclato, notevolmente inferiore rispetto a quella degli inerti silicei, ha spinto alla formulazione di una prima ipotesi applicativa per le malte ecosostenibili oggetto di studio. Si è supposto, in particolare, che l'eventuale alleggerimento della malta conseguente all'utilizzo dell'aggregato siffatto potesse conferire proprietà di termo-isolamento. Le considerazioni in merito sono

state espresse nella sezione relativa alle discussioni, a valle della caratterizzazione delle malte indurite.

CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-MINERALOGICA.

I risultati dell'analisi Termogravimetrica (TGA) sono mostrati in Figura 67. Il grafico riporta una curva tracciata in nero, rappresentativa della variazione percentuale della massa all'aumentare della temperatura, e la sua derivata prima (*Derivative Thermogravimetry - DTG*). I picchi nella *DTG* corrispondono a decomposizioni termiche di composti cristallini, a stechiometria fissa, per i quali la degradazione avviene rapidamente e a temperature precise. Attorno a tali picchi, biunivocamente, nella curva della *TGA* sono visibili i salti causati dalla repentina perdita di massa. Al contrario, i tratti frastagliati del grafico della derivata indicano la presenza di specie amorphe o semi-amorphe per le quali il processo degradativo è lento e dunque attuato in un *range* di temperatura: non è cioè individuabile con chiarezza il valore termico in corrispondenza del quale si verifica un salto gravimetrico.

Nel caso specifico dell'*AAC* sono leggibili tre picchi nella *DTG*, equivalenti ad altrettanti salti gravimetrici nella *TGA*: un primo, attorno ai 130°C, un secondo, attorno ai 570°C ed un terzo, infine, attorno ai 750°C. Queste temperature sono corrisposte nel *database* del *software* adoperato per l'elaborazione dell'analisi ai composti del gesso (solfato di calcio diidrato), della portlandite (idrossido di calcio) e del carbonato di calcio. La zona centrale del diagramma, invece, nell'intervallo di temperature tra 300°C e 500°C, è caratterizzata da una *DTG* frastagliata e da una *TGA* con pendenza negativa pressoché costante. Quel *range* termico è associato, infatti, alla degradazione dei silicati idrati di calcio, composti con un grado di cristallinità variabile.

La diffrattometria ha confermato le specie chimiche evidenziate nell'analisi termogravimetrica (gesso, carbonato di calcio e silicati idrati di calcio) ed aggiunto la silice, non rintracciabile nella *TGA* per la sua elevata temperatura di degradazione (circa 2000°C). Si riportano il grafico della *XRD* in Figura 68 e la Tabella 7 con l'elenco dei composti cristallini riscontrati. Nel grafico della *XRD*, in analogia concettuale a quello della *DTG*, i picchi sono corrispondenti all'individuazione di solidi cristallini, le zone frastagliate o rumorose, invece, a composti amorfi o semiamorfi.

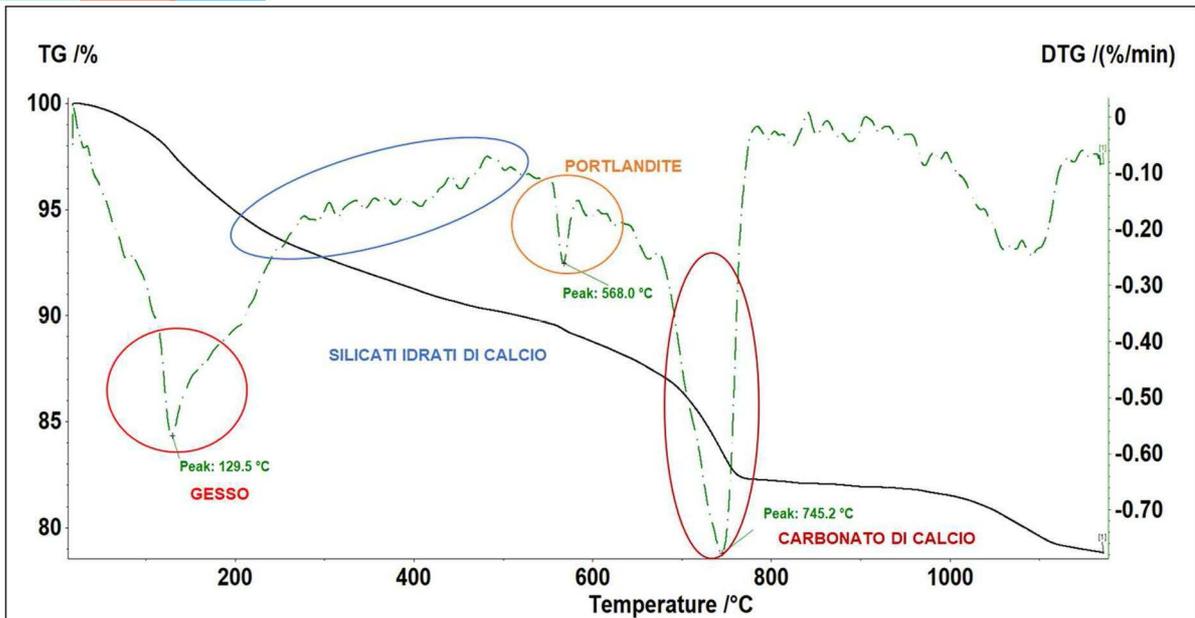


Figura 67. Curve dell'analisi termogravimetrica (TGA) e della derivata prima (DTG) dell'aggregato in AAC. Sono evidenziati i picchi nella DTG ed i composti associati. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

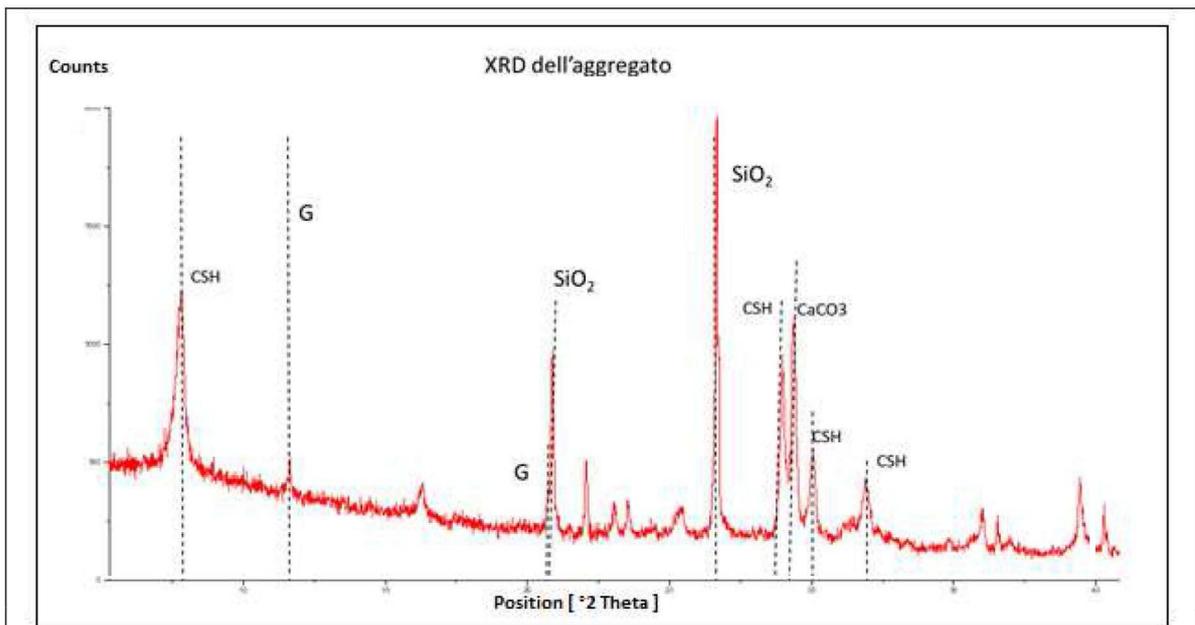


Figura 68. Risultato dell'analisi diffrattometrica eseguita sull'aggregato riciclato: i picchi corrispondono a composti cristallini, le zone rumorose a composti amorfi. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

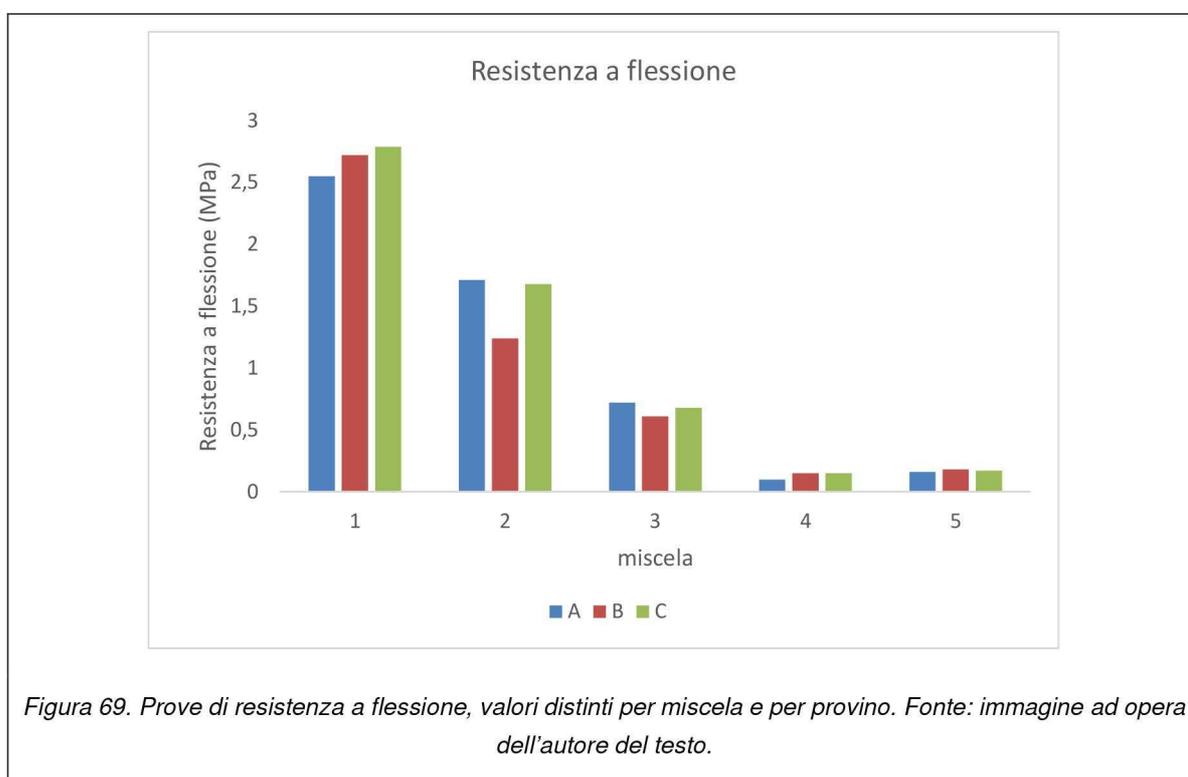
Tabella 7. Risultati della DTG.

Sigla di riferimento	Punteggio	Nome del composto
01-079-1906	56	Silice
01-086-2339	50	Carbonato di calcio
01-083-1520	39	Silicato idrato di calcio
01-089-3434	24	Silice
01-070-0984	16	Solfato di calcio diidrato (gesso)

B, legante; SS, sabbia silicea; AAC, Calcestruzzo Aerato Autoclavato; W, acqua di impasto; W/B, rapporto acqua-legante in massa; AR, percentuale in massa di aggregato riciclato su aggregato totale.

CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA. I risultati della prova a rottura per flessione a tre punti sono distinti per miscela e per provino (A, B, C) e riportati in diagrammi a colonne raggruppate mostrati nella Figura 69.



In aggiunta, si è proceduto a diagrammare i valori medi della resistenza a flessione (*i.e.* la tensione di rottura) in funzione della frazione in massa di aggregato riciclato adoperato nella miscela, ossia il rapporto tra massa di aggregato riciclato e polveri complessive, ottenendo il grafico riportato in Figura 70.

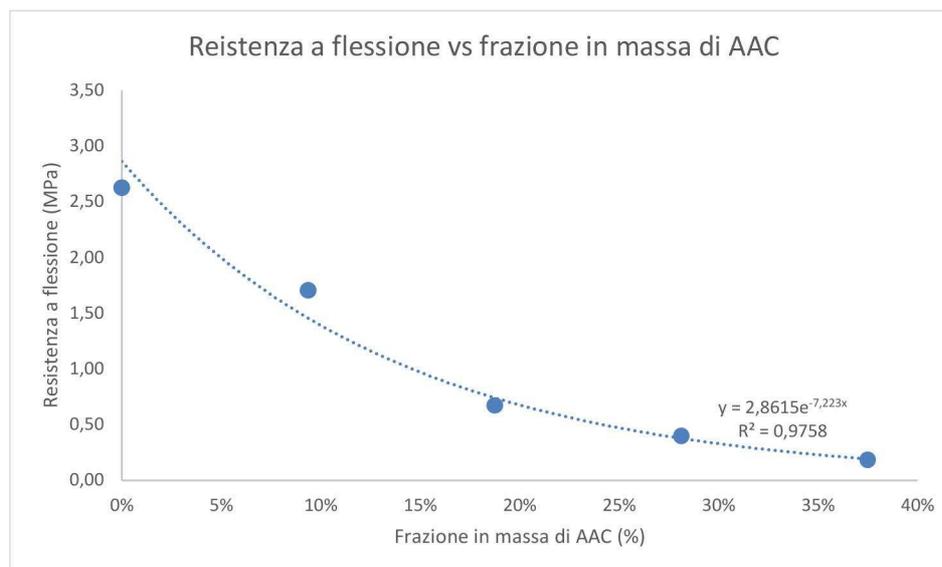


Figura 70. Prove di resistenza a flessione: grafico che diagramma la resistenza a flessione in funzione della massa di AAC su polveri totali. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi equazione e coefficiente di correlazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

L'andamento mostrato in Figura 70 evidenzia la relazione di proporzionalità inversa tra la prestazione meccanica e la percentuale di aggregato riciclato: la linea di tendenza riscontrata è esponenziale ed ha un coefficiente di correlazione pari a 0,98. Stesse informazioni sono riportate nelle Figura 71 e Figura 72 e riferite ai risultati della prova a rottura per compressione per la quale è stata evidenziata una proporzionalità inversa con la frazione in massa dell'aggregato riciclato: la linea di tendenza, ancora esponenziale, ha esibito un coefficiente di correlazione di 0,99.

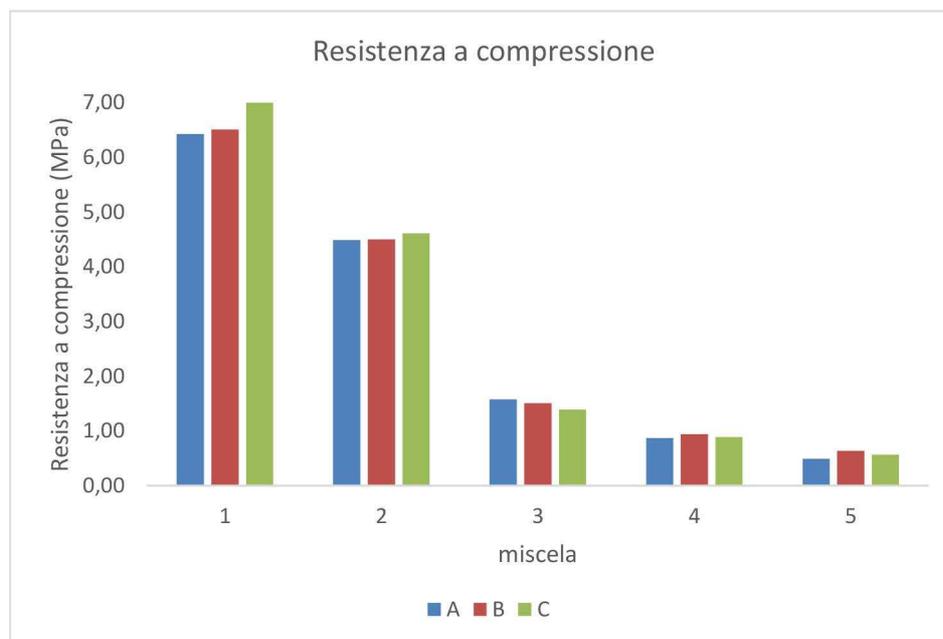


Figura 71. Prove di resistenza a compressione, valori distinti per miscela e per provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

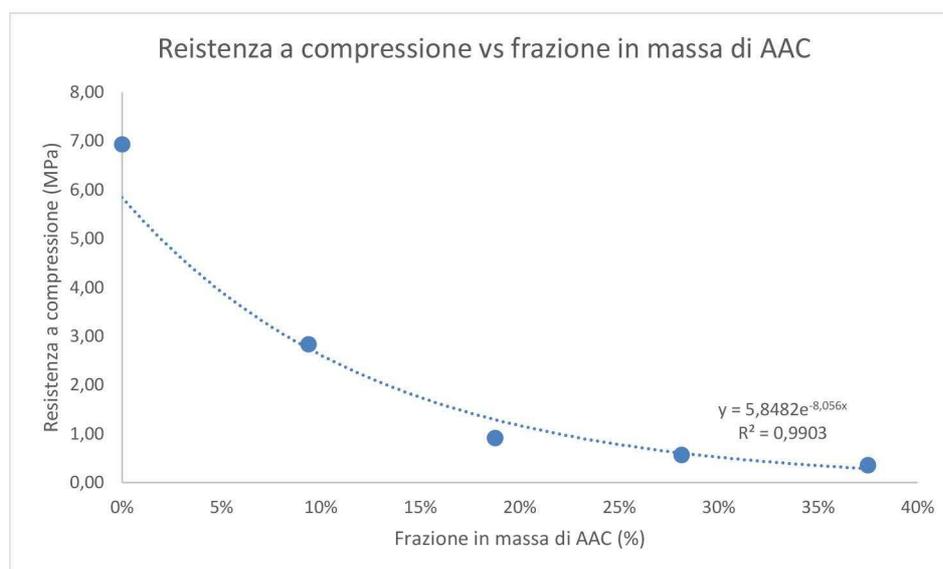


Figura 72. Prove di resistenza a compressione: grafico che diagramma la resistenza a flessione in funzione della massa di AAC su polveri totali. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi equazione e coefficiente di correlazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

CARATTERIZZAZIONE FISICA. I valori risultati dalla misurazione delle proprietà fisiche¹⁸ sono riportati nella Tabella 8. In aggiunta, le grandezze sono state

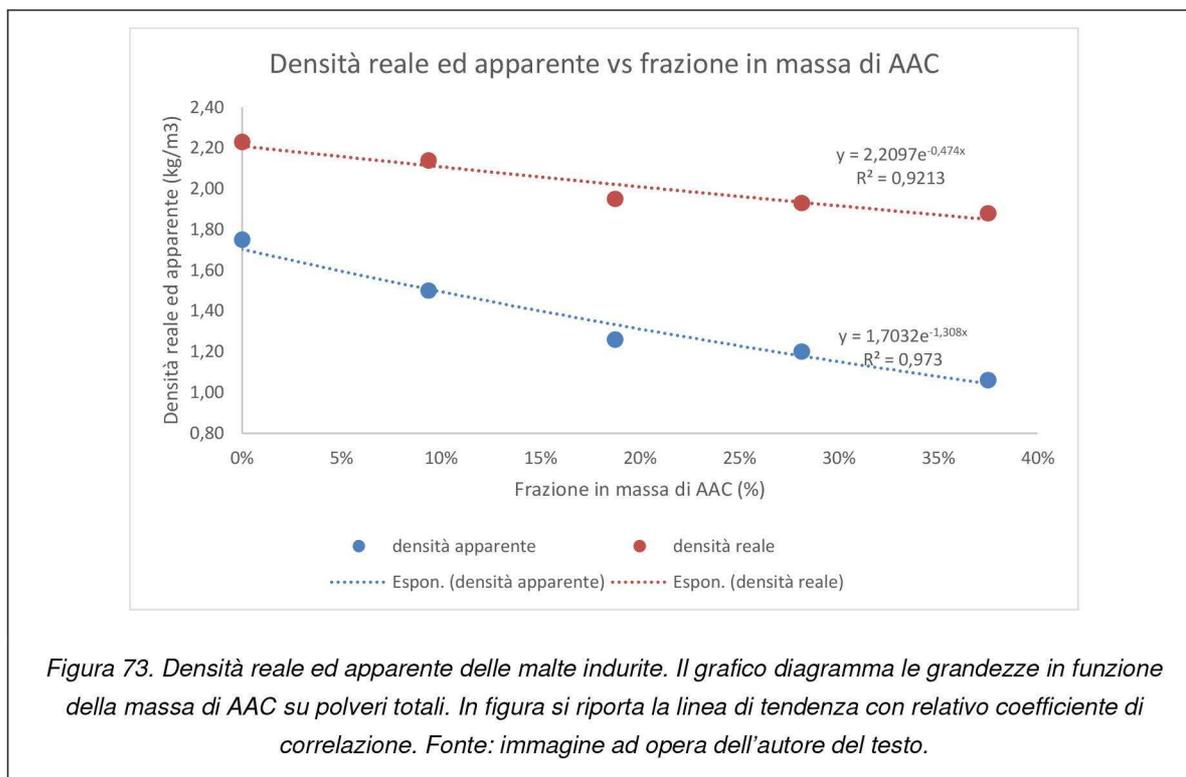
¹⁸ Densità reale ed apparente, porosità accessibile all'acqua, assorbimento d'acqua

diagrammate in funzione della frazione di massa dell'aggregato riciclato allo scopo di individuare eventuali relazioni qualitative e quantitative e sono mostrate nelle Figura 73 e Figura 74.

Tabella 8. Proprietà fisiche delle malte.

Sigla miscela		M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	ρ _r (g/cm ³)	ρ _{app} (g/cm ³)	p (%)	W (%)
1	A	212,47	117,39	238,79	2,23	1,75	21,68	12,39
	B	215,82	120,10	243,40	2,25	1,75	22,37	12,78
	C	216,28	119,35	243,47	2,23	1,74	21,91	12,57
2	A	184,21	97,99	220,67	2,14	1,50	29,72	19,79
	B	189,28	99,59	225,61	2,11	1,50	28,83	19,19
	C	195,27	104,51	232,52	2,15	1,53	29,10	19,09
3	A	154,24	75,13	196,40	1,95	1,27	34,77	27,33
	B	163,73	78,89	208,57	1,93	1,26	34,58	27,39
	C	162,74	79,50	206,10	1,96	1,29	34,25	26,64
4	A	115,10	55,34	151,32	1,93	1,20	37,74	31,47
	B	100,16	46,17	134,10	1,86	1,14	38,60	33,89
	C	125,89	54,00	160,97	1,95	1,27	35,26	27,87
5	A	127,34	61,49	181,62	1,85	1,04	44,12	42,63
	B	133,34	62,25	188,15	1,88	1,06	43,53	41,11
	C	134,78	63,07	189,86	1,88	1,06	43,44	40,87

M₁ massa del campione a secco; M₂, massa saturata idrostatica del campione; M₃, massa saturata a superficie asciutta del campione; ρ_r, densità reale; ρ_{app}, densità apparente; p, porosità accessibile all'acqua; W, assorbimento d'acqua



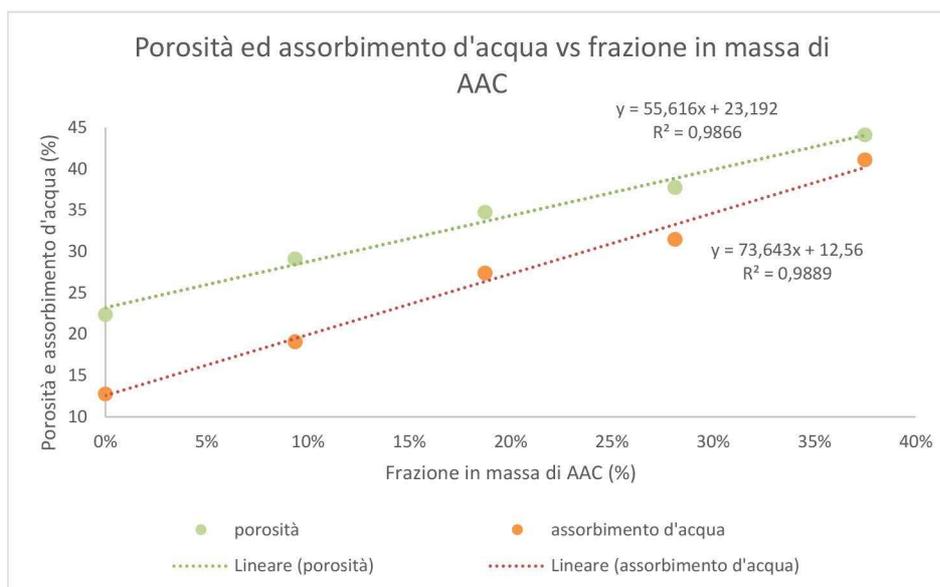
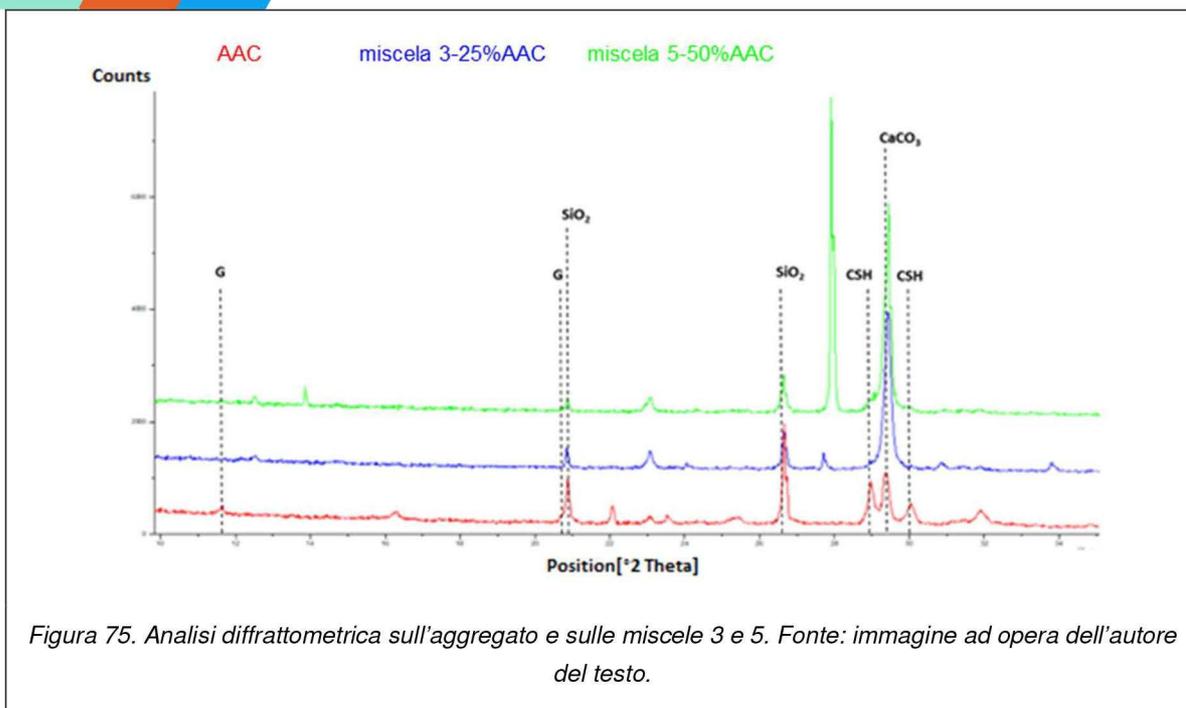


Figura 74. Porosità ed assorbimento d'acqua. Il grafico diagramma le grandezze in funzione della massa di AAC su polveri totali. In figura si riporta la linea di tendenza con relativo coefficiente di correlazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Mentre per la porosità e l'assorbimento d'acqua le linee di tendenza, lineari, hanno esibito coefficienti di correlazione quasi unitari, per le densità reale ed apparente, pur essendo inversamente proporzionali alla percentuale di aggregato riciclato, le correlazioni analitiche con la variabile massa di AAC sono risultate meno forti. I valori di porosità ed assorbimento d'acqua sono rispettivamente duplicati e triplicati nel passaggio dalla miscela 1 - senza aggregato riciclato - alla miscela 5 con il 50% in massa di aggregato riciclato, mentre le densità reale ed apparente si sono ridotte del 19% e del 39%.

CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-MINERALOGICA. I risultati dell'*XRD* sulla miscela 1 contenente solo sabbia silicea non hanno annoverato specie con gruppi solfatici tra quelle rilevate, confermando che l'eventuale presenza sulfurea sarebbe stata da attribuire unicamente all'aggregato riciclato. Per tale motivo, nella Figura 75 non è riportata la curva dell'analisi relativa alla miscela 1. È stata invece affiancata ai diagrammi delle miscele 2 e 3 - rispettivamente con 25% e 50% di aggregato riciclato in massa su aggregato totale - la *XRD* dell'AAC. La prova non ha rintracciato la presenza di gesso libero nelle miscele 2 e 3, riscontrato nell'aggregato riciclato, come precedentemente mostrato. L'analisi ha mappato, invece, un composto contenente alluminio e zolfo qualificato come idrossido solfato di alluminio idrato.



DISCUSSIONI

Come dichiarato nei capitoli iniziali, l'obiettivo del presente lavoro di ricerca è stato costruito seguendo un approccio deduttivo, secondo uno schema *top-down*. Il proposito ultimo di mettere a punto una metodologia di progettazione di miscela di malte ecosostenibili confezionate con aggregato riciclato (*down*), ha reso necessaria la fissazione di obiettivi precedenti e preliminari. Il primo di questi è stato quello di verificare l'idoneità del materiale di scarto della lavorazione dei blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato all'utilizzo come aggregato (*top*) mediante le caratterizzazioni dell'inerte e di un primo gruppo di malte confezionate con una percentuale massima di AAC su aggregato totale del 50% in massa¹⁹.

I risultati della caratterizzazione fisica del materiale riciclato in AAC hanno mostrato che i suoi valori di massa volumica asciutta (860 kg/m³) ed apparente (1480 kg/m³) sono notevolmente inferiori a quelli degli aggregati naturali di simile granulometria. Un esito analogo è stato riportato da alcuni autori che hanno investigato le proprietà fisiche di inerti riciclati ceramici e plastici [145–147]. Tuttavia, mentre la massa volumica apparente misurata nel presente studio è confrontabile con quella di Liu *et al.*, che si sono occupati di una sabbia riciclata con granulometria simile a quella testata ed ottenuta dalla macinazione di blocchi in Calcestruzzo Autoclavato, quella asciutta è sensibilmente superiore [141]. Stessa considerazione

¹⁹ Le percentuali in massa di AAC su aggregato totale sono state di 0%, 12,5%, 25%, 37,5% e 50%, in ordine, dalle miscele 1 a 5.

è valida per l'assorbimento di acqua che, coerentemente con i risultati di altri studi interessatisi di aggregati riciclati minerali, si è rivelato notevolmente maggiore di quello degli inerti naturali [17,125,148]. Questa peculiarità è intrinseca all'AAC e dipende dal processo di espansione cui è sottoposto in fase di produzione che genera - come detto al paragrafo 4.2 - una struttura aerata e porosa. L'analisi chimico-mineralogica ha sancito la similarità alla struttura di un aggregato in calcestruzzo riciclato proveniente da attività di demolizione - le cui fasi prevalenti sono i silicati, il carbonato di calcio e la calce - ma con il vantaggio di una composizione costante e controllata e la leggerezza dovuta alla porosità. Coerentemente, le malte che sono state confezionate in questa fase della ricerca hanno esibito una riduzione di densità ed un aumento di porosità ed assorbimento d'acqua. In particolare, nel passaggio dalla miscela 1 alla miscela 5, a fronte della riduzione del 40% della densità apparente (1747 kg/m^3 a 1053 kg/m^3) la porosità è duplicata (dal 21% al 42%) e l'assorbimento d'acqua è triplicato (dal 13% al 39%).

L'alleggerimento delle malte nelle quali si ricorre ad aggregati riciclati - meno densi di quelli naturali - è stato riportato da numerosi studi [77,106,121,134,137], pur con la dovuta considerazione che ad essere determinante per la densità della malta indurita, anche a parità di percentuale di sostituzione in massa o di rapporti volumetrici tra i componenti del conglomerato, è la densità dell'aggregato in sé [150,151]. L'aumento della porosità è stato particolarmente penalizzante per le prestazioni meccaniche delle malte testate. Il passaggio dalla miscela 1 a quella 5 si è tradotto in una riduzione delle resistenze a compressione da 6,93 MPa a 0,57 MPa ed a flessione da 2,69 MPa a 0,17 MPa. I risultati ottenuti sono numericamente confrontabili con quelli conseguiti da altri autori che hanno testato malte confezionate con cemento ed aggregati leggeri in vermiculite [136], perlite, vetro e polistirene espansi [152]. Torres e García-Ruiz [152], peraltro, hanno riportato una triplicazione dell'assorbimento d'acqua rispetto alla miscela di riferimento nel caso di utilizzo di perlite e polistirene espansi al 2% in massa. Tuttavia, se si tiene conto che la densità dell'aggregato in AAC è notevolmente superiore a quella della vermiculite (140 kg/m^3), della perlite (49 kg/m^3), del vetro (321 kg/m^3) e del polistirene espansi (19 kg/m^3), l'impoverimento delle prestazioni meccaniche delle miscele studiate è proporzionalmente più elevato. A questo proposito, l'aggregato in AAC, diversamente da quelli appena citati nelle sperimentazioni di altri autori, non è in grado di attivare reazioni pozzolaniche alle quali sono associati, invece, miglioramenti delle prestazioni meccaniche [153,154]. Il rapporto tra la resistenza a compressione e la densità per le miscele testate, infatti, si è ridotto di circa l'83% nel

passaggio da 1 a 5, ciò a conferma dell'assenza di contributo dell'aggregato riciclato alla risposta meccanica.

In questa fase, tuttavia, è stata adoperata soltanto una calce idraulica artificiale - legante di miscela - che rispetto al cemento può essere stata determinante nel peggioramento delle resistenze a flessione e compressione, anche per percentuali basse di aggregato riciclato, come conseguenza della diversa microstruttura associata ai prodotti contenenti calce, più porosi ed interconnessi di quelli a sola base cementizia [155]. Per tale motivazione, nelle campagne di confezionamenti seguenti si è ritenuto opportuno ampliare la casistica di leganti valutando le variazioni delle proprietà ad essi conseguenti.

Rispetto all'interazione eventuale dell'aggregato riciclato - contenente gesso - con il legante, dagli esiti dell'analisi diffrattometrica eseguita sulle miscele 2 e 3 i solfati presenti nell'AAC sembrerebbero formare una nuova fase, l'idrossido solfato di alluminio idrato ($\text{Al}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), per interazione con specie chimiche contenenti alluminio. Questi risultati differiscono da quelli riportati da Bergmans *et al.* [92] e da Ambroise *et al.* [156] che hanno rilevato, come composti conseguenti all'interazione tra gesso non legato e specie cementizie, il trisolfo ed il monosolfo alluminato di calcio idrato. Nella ricerca, tuttavia, le esigue quantità di gesso nell'aggregato riciclato e la diluizione nel volume della malta indurita potrebbero aver comportato una difficoltà nella lettura dei composti. Pertanto, ulteriori investigazioni di natura chimico-mineralogica si sono rese necessarie nelle fasi successive della ricerca.

5.2) 2 FASE 2: OBIETTIVI, MATERIALI E METODI, RISULTATI, DISCUSSIONI

RIFERIMENTI NORMATIVI

- UNI EN 206:2021, *Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità*
- UNI EN 197-1:2011, *Cemento - Parte 1: Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni*
- UNI EN 459-1:2015, *Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità*
- UNI EN 1097-3:1999, *Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Determinazione della massa volumica in mucchio e dei vuoti intergranulari*
- UNI EN 196-1:2016, *Metodi di prova dei cementi - Parte 1: Determinazione delle resistenze meccaniche*
- UNI EN 1015-11:2019, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*
- UNI EN 1015-10:2007, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 10: Determinazione della massa volumica apparente della malta indurita essiccata*
- UNI EN 1936:2007, *Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della massa volumica reale e apparente e della porosità totale e aperta*
- UNI EN 1745:2020, *Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare le proprietà termiche*
- UNI EN 1015-18:2004, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità della malta indurita*
- UNI EN 998-1:2016, *Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni*
- UNI EN 998-2:2016, *Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura*

OBIETTIVI

La seconda fase di attività sperimentali si è innestata sui risultati precedenti²⁰ ed ha avuto tre obiettivi principali. Anzitutto, definire la formulazione delle malte da testare mediante uno strumento con una struttura matematica, quale l'equazione dei volumi del *mix design* dei calcestruzzi. La scelta è stata operata per poter pesare le variazioni delle proprietà delle malte indurite in funzione delle modifiche quantitative operate sulle variabili di miscela, legate appunto per mezzo dell'equazione. Ciò equivale ad integrare le relazioni qualitative emerse dai risultati della prima

²⁰ Vedasi sezioni Risultati e Discussioni del sottoparagrafo 5.2)1

campagna di confezionamenti. Le variabili scelte e le condizioni al contorno fissate sono descritte e motivate nella sezione Materiali e Metodi del presente sottoparagrafo. I restanti obiettivi hanno invece riguardato la procedura di caratterizzazione delle malte indurite secondo le specificazioni normative delle UNI EN 998-1,2:2016. In particolare, l'indagine ha ricompreso anche la capacità di assorbimento d'acqua per capillarità, aspetto rilevante nell'ottica di applicabilità del prodotto sia come malta da muratura che da intonaco e, presumibilmente, presente nelle malte formulate con un aggregato - quale l'AAC - particolarmente poroso. Inoltre, sulla base di quanto emerso dalle prime prove effettuate, anche su alcune delle miscele neo-confezionate sono state eseguite prove di caratterizzazione chimico-mineralogica al fine di confutare o di rafforzare l'ipotesi circa l'attività chimica del gesso contenuto all'interno dell'aggregato riciclato.

MATERIALI E METODI

FORMULAZIONE DELLE MALTE: RIFERIMENTI TEORICI. Per pianificare la campagna di confezionamento e fissare le quantità dei componenti delle diverse miscele si è adoperato come riferimento l'equazione dei volumi dei calcestruzzi privata dei termini relativi ad additivi ed aria inglobata come nell'Eq.28:

$$1 = V_B + V_A + V_{AGG} \quad (\text{Eq.28})$$

con:

- V_B , volume di legante per metro cubo di miscela
- V_A , volume di acqua per metro cubo di miscela
- V_{AGG} , volume di aggregato per metro cubo di miscela

In prima ipotesi, si è tentato di adoperare anche per le malte le condizioni al contorno su quantità d'acqua e rapporto acqua-cemento per ridurre l'equazione ad una incognita secondo quanto mostrato nelle Eq.29 e 30:

$$1 = \frac{m_B}{d_B} + \frac{m_A}{d_A} + \frac{m_{AGG}}{d_{AGG}} \quad (\text{Eq.29})$$

$$\frac{m_{AGG}}{d_{AGG}} = 1 - \frac{m_A}{a \cdot d_B} + \frac{m_A}{d_A} \quad (\text{Eq.30})$$

con:

- m_B e d_B , massa per metro cubo di miscela e massa volumica di legante
- m_A e d_A , massa per metro cubo di miscela e densità dell'acqua
- m_{AGG} e d_{AGG} , massa per metro cubo di miscela e massa volumica di aggregato
- a , rapporto in massa tra acqua e legante

Non essendo presenti riferimenti normativi a classi di consistenza o di esposizione per le malte ma indicazioni su rapporti in massa o volume tra aggregato e legante ed acqua e legante si è proceduto con l'utilizzo dei rapporti legante-aggregato ed acqua-legante come condizioni al contorno per risolvere l'equazione.

Scissa la massa d'acqua nelle aliquote efficace (idratazione del legante) ed assorbita (fenomeno imputabile all'aggregato riciclato) e distinguendo il volume degli aggregati naturale (SS) e riciclato (AAC) l'equazione è divenuta:

$$1 = \frac{m_B}{d_B} + \frac{m_{SS\ rd}}{d_{SS\ rd}} + \frac{m_{AAC\ rd}}{d_{AAC\ rd}} + \frac{m_{A\ eff}}{d_A} + \frac{m_{A\ ass\ SS}}{d_A} + \frac{m_{A\ ass\ AAC}}{d_A} \quad (\text{Eq.31})$$

con:

- pedici "SS" e "AAC", grandezze riferite alla sabbia silicea e all'aggregato riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato
- pedice "ass", acqua assorbita
- pedice "rd", condizione di inserimento degli aggregati come asciutti
- da cui, introdotti i rapporti:
- a, rapporto in massa tra acqua efficace e legante
- b, rapporto in massa tra aggregato e legante
- c, frazione in massa di aggregato riciclato su aggregato totale²¹

da cui si è ottenuto:

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{d_B} + \frac{(1-c)*b}{d_{SS\ rd}} + \frac{c*b}{d_{AAC\ rd}} + \frac{a}{d_A} + \frac{(1-c)*b*W_{SS}}{d_A} + \frac{c*b*W_{AAC}}{d_A}\right)} = m_B \quad (\text{Eq.32})$$

introducendo anche i coefficienti di assorbimento d'acqua W_{AAC} e W_{SS} per calcolare le quantità assorbite rispettivamente dall'aggregato riciclato e da quello siliceo. Fissati i tre rapporti - come indicato nella sezione relativa ai materiali - l'equazione è stata risolta in funzione della massa di legante per metro cubo di miscela, unica incognita finale, dalla quale sono stati ricavati gli altri componenti.

Per la sperimentazione in commento è stato adottato il secondo approccio illustrato (Eq.32)

MATERIALI. Per studiare una casistica più ampia di prodotti, la relativa versatilità nei termini di campo di impiego e la compatibilità con le caratteristiche dell'aggregato riciclato, sono stati adoperati tre diversi leganti. In particolare, due leganti idraulici - un cemento Portland CEM II 32,5 A/L (UNI EN 197-1:2011) ed una calce idraulica naturale NHL 3,5 (UNI EN 459-1:2015) - ed uno aereo, una calce dolomitica DL 85-30 S (UNI EN 459-1:2015). La scelta ha considerato sia gli effetti dei leganti sulla microstruttura della malta e dunque sulle proprietà macroscopiche

²¹ $\frac{m_{AAC}}{(m_{AAC}+m_{SS})}$

che ne possono influenzare il campo d'applicazione ed il tipo di supporto (permeabilità al vapore, conducibilità termica, rigidità), sia - guardando all'elemento tecnico come sistema - la diversità di rivestimenti pittorici associata a ciascun legante (pittura a calce, silossanica e al quarzo).

Per gli aggregati, invece, si è adoperato come inerte naturale una sabbia silicea granita del fiume Po fornita dalla Bacchi spa, con granulometria compresa tra 0 e 5 mm, alla cui distribuzione è stata interamente sovrapposta quella dell'aggregato riciclato in AAC. Questo, proveniente dai blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato GASBETON® prodotti presso lo stabilimento sito in Volla (NA) dell'azienda EKORU, è stato fornito in tre intervalli granulometrici: maggiore di 4 mm, tra 1 e 4 mm ed inferiore ad 1 mm ed è mostrato in Figura 76.



METODI. Le attività d'ora in poi descritte, salvo diversa precisazione, sono state espletate presso il laboratorio di materiali da costruzione TecnoLab srl (NA).

PROPRIETÀ GEOMETRICHE E FISICHE DEGLI AGGREGATI. Gli aggregati, sabbia silicea e AAC, sono stati essiccati al fine di allontanare l'umidità naturalmente presente, adoperando una stufa ventilata a temperatura di $110 \pm 5^\circ\text{C}$ e seguendo le stesse procedure illustrate al sottoparagrafo 5.2)1. Successivamente, per l'aggregato riciclato si è proceduto a costruire la curva di distribuzione granulometrica, prelevando, per ogni intervallo, porzioni di materiale tali da ottenere un assortimento uguale a quello dell'aggregato siliceo.

Si è proceduto, quindi, alla misurazione della massa volumica in mucchio degli aggregati sciolti secondo le procedure della UNI EN 1097-3:1999. Dopo aver pesato la massa del recipiente volumetrico di 1 litro vuoto, questo è stato riempito con i campioni di materiali setacciati, avendo cura di non compattarli eccessivamente, ed è stata ripetuta l'operazione di pesatura (Figura 77). Calcolata per differenza la massa di aggregati, dividendola per il volume del recipiente si è ottenuta la massa volumica in mucchio in condizioni di asciutto. Il parametro è stato impiegato, poi, nell'equazione dei volumi (Eq. 32).



Figura 77. Misura della massa volumica in mucchio degli aggregati secondo la UNI EN 1097-3:1999. A sinistra, pesatura dell'aggregato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato; a destra, fase di riempimento del recipiente con la sabbia silicea. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

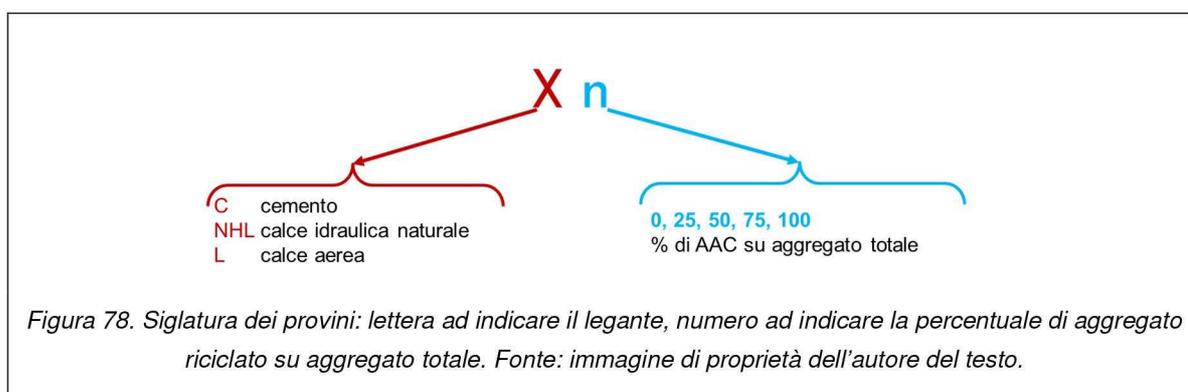
CONFEZIONAMENTO DELLE MALTE. Per passare al confezionamento delle miscele, sono stati fissati i parametri di controllo a, b e c dell'equazione succitata. Il rapporto acqua efficace-legante è stato posto pari a 0,50 per le malte idrauliche e pari a 1,00 per la malta aerea, tenendo conto del maggiore assorbimento della seconda rispetto alle prime. Per la proporzione in massa tra aggregato totale e legante, invece, si è mantenuto il valore di 3:1 già adoperato nella prima fase di confezionamenti e mutuato dalla UNI EN 196-1:2016. Infine, è stata ampliata la percentuale di sostituzione dell'inerte siliceo con quello riciclato, spingendola sino al 100% con il proposito di investigare situazioni limite. La Tabella 9 riporta sinteticamente le combinazioni dei valori dei parametri fissati per il proporzionamento delle miscele.

Tabella 9. Parametri di miscela distinti a seconda dei leganti.

		NHL					
a		0,50					
b		3					
c		0	0,125	0,25	0,50	0,75	1,00
		L					
a		1					
b		3					
c		0	0,125	0,25	0,50	0,75	1,00
		C					
a		0,50					
b		3					
c		0	0,125	0,25	0,50	0,75	1,00

NHL: calce idraulica naturale; L: calce aerea; C: cemento; a: rapporto acqua efficace-legante; b: rapporto in massa aggregato-legante; c: frazione in massa di aggregato riciclato su aggregato totale

È stato, quindi, introdotto il seguente sistema di siglatura dei provini (Figura 78):



e le miscele sono state proporzionate, come sinteticamente mostrato in Tabella 10, ricavando le masse per metro cubo di tutti i componenti. Sono state ottenute 15 miscele, 3 delle quali (C0, NHL0 e L0) utilizzate anche in questo caso come riferimento, *i.e. tal quale*, e formulate con solo aggregato naturale.

Tabella 10. Composizione delle miscele.

Sigla	B kg/m ³	A kg/m ³	SS kg/m ³	AAC kg/m ³
C0	382,92	191,46	1148,76	0,00
C25	309,94	154,97	813,58	116,23
C50	260,32	130,16	585,72	195,24
C75	224,39	112,20	420,74	252,44
C100	197,18	98,59	295,78	295,78
NHL0	375,08	187,54	1125,25	0,00
NHL25	304,78	152,39	800,05	114,29
NHL50	256,67	128,34	577,51	192,50
NHL75	221,68	110,84	415,65	249,39
NHL100	195,08	97,54	292,63	292,63
L0	315,70	315,70	947,10	0,00
L25	264,37	264,37	693,98	99,14
L50	227,40	227,40	511,65	170,55
L75	199,50	199,50	374,06	224,44
L100	177,70	177,70	266,55	266,55

NHL: calce idraulica naturale; L:calce aerea; C:cemento; B: legante; A: acqua; SS: sabbia silicea; AAC: aggregato riciclato

Le malte sono state preparate secondo le modalità indicate nella UNI EN 196-1:2016 e già descritte nel sottoparagrafo 5.2)1. Il numero di provini prismatici 40x40x160 mm confezionato per ogni miscela è stato pari a 3 (Figura 79). I tre provini sono stati siglati - in aggiunta all'indicazione relativa al legante e alla percentuale di aggregato riciclato - con le lettere "A, B, C". Le miscele fresche sono state compattate e stagionate seguendo il prospetto 1 della norma UNI EN 1015-11:2019, distinguendo le formulazioni idrauliche da quelle aeree. Conclusasi la fase di maturazione di 28 giorni sono state eseguite le prove su malta indurita di caratterizzazione fisica e meccanica.



CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE. Al termine dei 28 giorni di maturazione sono state eseguite le prove su malta indurita di caratterizzazione meccanica, fisica e chimico-mineralogica.

CARATTERIZZAZIONE FISICA. *In primis*, i provini sono stati essiccati in stufa ventilata fino al raggiungimento della massa costante per procedere, poi, al calcolo della massa volumica apparente disciplinato dalla norma UNI EN 1015-10:2007. Sono stati misurati la massa ed il volume medi per ciascuna terna di provini ed il rapporto tra le due dimensioni ha restituito la massa volumica apparente. Per le miscele contenenti il 100% di aggregato riciclato (C100, NHL100, L100) alla massa volumica apparente secondo UNI EN 1015-10:2007 è stata affiancata anche la misurazione della porosità e dell'assorbimento d'acqua per capillarità - oltre alle densità reale ed apparente - mediante la procedura, di cui si riportano alcune fasi nella Figura 80, descritta per i provini della prima campagna di confezionamenti (UNI EN 1936:2007).



Figura 80. Misurazione di densità reale ed apparente, porosità e assorbimento d'acqua secondo la UNI 1936:2007: da sinistra, immersione sottovuoto dei provini e pesatura con bilancia idrostatica. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

La massa volumica apparente è stata adoperata per il calcolo della conducibilità termica mediante il metodo tabellare della norma UNI EN 1745:2020 al fine di qualificare, almeno in via preliminare, la prestazione termica dei prodotti e l'eventuale rispondenza alle specificazioni della norma UNI EN 998-1:2016 per gli intonaci termoisolanti. In particolare, interpolando i valori di massa volumica apparente e conducibilità termica - frattile al 50% - della tabella A.12 della norma è stata costruita la funzione esponenziale di regressione (Eq.33) del tipo:

$$\lambda = ae^{bm} \quad (\text{Eq.33})$$

con:

- λ , conducibilità termica (W/mK)
- a e b, coefficienti ricavati dall'interpolazione
- m, massa volumica apparente asciutta (kg/m^3)

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA. A seguire, i provini sono stati sottoposti alle prove di resistenza a flessione a tre punti e compressione uniassiale, adoperando la macchina mostrata in Figura 81, in regime di controllo di spostamento, normate dalla UNI EN 1015-11:2019 e secondo le modalità descritte al sottoparagrafo 5.2)1.



Figura 81. Attrezzatura per l'esecuzione della prova di resistenza a flessione a tre punti. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

Su uno dei due mezzi prismi ottenuti per ogni provino dalla prova a flessione è stata eseguita la prova per la misurazione dell'assorbimento di acqua per capillarità, secondo le procedure della UNI EN 1015-18:2004, utile a quantificare un altro dato (il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità) ricompreso tra le specifiche normative della UNI EN 998-1:2016. La superficie laterale dei provini spezzati è stata

rivestita con della paraffina, avendo cura di non sigillare le sezioni trasversali, al fine di assicurare un flusso idrico monodirezionale (Figura 82).



Una volta ultimata la preparazione, i campioni sono stati disposti in un volume d'acqua sufficiente ad assicurare l'immersione delle facce spezzate per un'altezza di almeno 0,5 cm e fino ad un massimo di 1 cm. Sono state lette le masse di ciascun mezzo prisma (tre per ogni miscela) a 10' e 90' di immersione avendo cura di tamponare delicatamente la sezione immersa del provino per rimuovere l'acqua in eccesso (Figura 83). Il coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità è stato infine calcolato secondo l'Eq.34:

$$W=0,1*(M_{90}-M_{10}) \quad (\text{Eq.34})$$

con:

- W, coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità secondo UNI EN 1015-18:2004 ($\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$)
- M_{90} , massa dei provini dopo 90' di immersione
- M_{10} , massa dei provini dopo 10' di immersione



Figura 83. Esecuzione della prova di assorbimento d'acqua per capillarità: immersione dei provini in acqua.
Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-MINERALOGICA.

Infine, un'analisi termogravimetrica (TGA), con la stessa procedura descritta nel sottoparagrafo 5.2)1, è stata eseguita, presso il Dipartimento di Ingegneria Chimica, dei Materiali e della Produzione industriale dell'Università Federico II di Napoli, su porzioni ridotte in polvere di provini delle miscele C100, NHL100, L100, contenenti soltanto aggregato riciclato, e su quelle C0 ed L0, contenenti sola sabbia silicea. Le prime (100% di AAC) sono state selezionate in ragione della maggiore quantità di gesso in esse presenti, le seconde - simmetricamente - per essere impiegate come riferimento "neutro". In particolare, la C0 è stata testata per verificare l'eventuale traccia di solfati all'interno del cemento usato come legante, la L0 perché certamente priva di fonti sulfuree.

RISULTATI

PROPRIETÀ GEOMETRICHE E FISICHE DEGLI AGGREGATI. La curva di distribuzione granulometrica ottenuta per l'aggregato riciclato (costruita su quella della sabbia silicea) è mostrata in Figura 84.

Unitamente al grafico della curva, per facilitare la comprensione dei risultati, si riporta in Figura 85 la minuta di prova contenente le percentuali di trattenuto e passante per ogni intervallo granulometrico.

La massa volumica in mucchio degli aggregati sciolti ottenuta è stata di 1707 kg/m³ per la sabbia silicea e di 665 kg/m³ per l'aggregato riciclato.

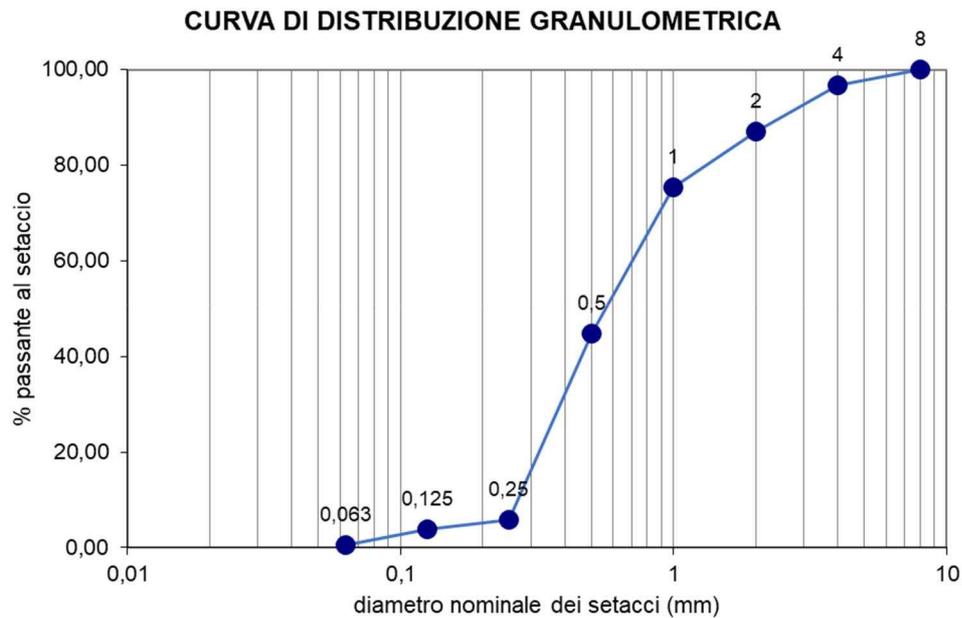


Figura 84. Curva di distribuzione granulometrica dell'aggregato riciclato in AAC. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Identificazione del Condizioni di prova		AAC riciclato					
Prova richiesta:		Ur 65% ,Temperatura 20°C					
Apparecchiatura Utilizzata:		Determinazione della distribuzione granulometrica					
		Set di setacci UNI 933-2:2020					
RISULTATI DI PROVA							
Massa totale essicata = M ₁ 1000		Trattenuto		Passante		Setaccio Passante	
	125	0	0,00%	1000	100,00%	0,063	0,56
	63	0	0,00%	1000	100,00%	0,125	3,80
	31,5	0	0,00%	1000	100,00%	0,25	5,80
	16	0	0,00%	1000	100,00%	0,5	44,80
SETACC	8	0	0,00%	1000	100,00%	1	75,40
IO	4	33	3,30%	967	96,70%	2	87,10
UNI 933-	2	96	9,60%	871	87,10%	4	96,70
2	1	117	11,70%	754	75,40%	8	100,00
	0,500	306	30,60%	448	44,80%	16	100,00
	0,250	390	39,00%	58	5,80%	31,5	100,00
	0,125	20	2,00%	38	3,80%	63	100,00
	0,063	32,4	3,24%	5,6	0,56%	125	100,00
Massa sul fondo (P) [g]		5,6		Trattenuto allo 0,063 = M ₂ [g] =		32,4	
Massa Provino [g]		1000					
Diametro min inerte [mm]		0,063		Diametro Max inerte [mm]		5	

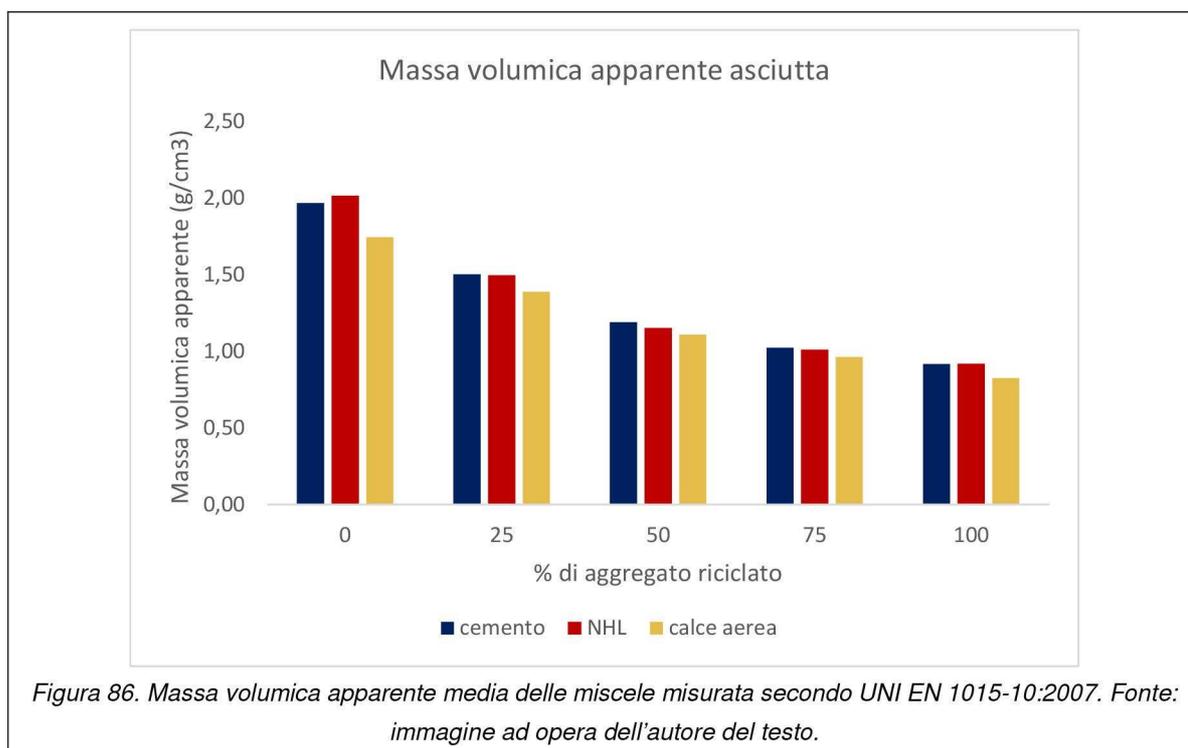
Figura 85. Minuta di prova della distribuzione granulometrica dell'aggregato riciclato in AAC. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE

CARATTERIZZAZIONE FISICA.

I valori medi della massa volumica apparente, per ciascuna delle miscele, sono riportati nel grafico a colonne raggruppate della Figura 86. L'aumento progressivo del dosaggio di aggregato riciclato a sostituzione di quello siliceo ha comportato una riduzione media della massa - e quindi della massa volumica - nel passaggio dalla miscela "0" a quella "100" del 54% per i leganti idraulici e del 51% per la calce aerea. Per tutti e tre i leganti, inoltre, le variazioni parziali "0-25" e "25-50" si sono mediamente attestate sul 20% e quelle "50-75" e "75-100" sul 12%.

La relazione qualitativa tra assortimento dell'aggregato e massa volumica apparente della malta indurita è stata integrata con un approfondimento quantitativo. La proprietà fisica è stata infatti diagrammata in funzione delle masse di aggregato siliceo e riciclato per metro cubo di miscela ottenendo i grafici riportati nella Figura 87. L'intersezione tra le due rette corrisponde alla miscela al 50% di aggregato riciclato. Le variabili scelte sono risultate correlate linearmente con coefficienti tutti prossimi all'unità.



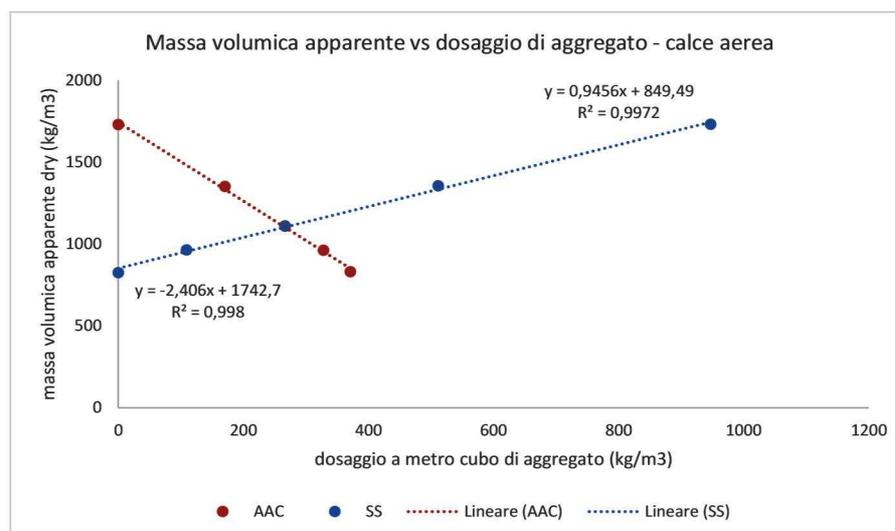
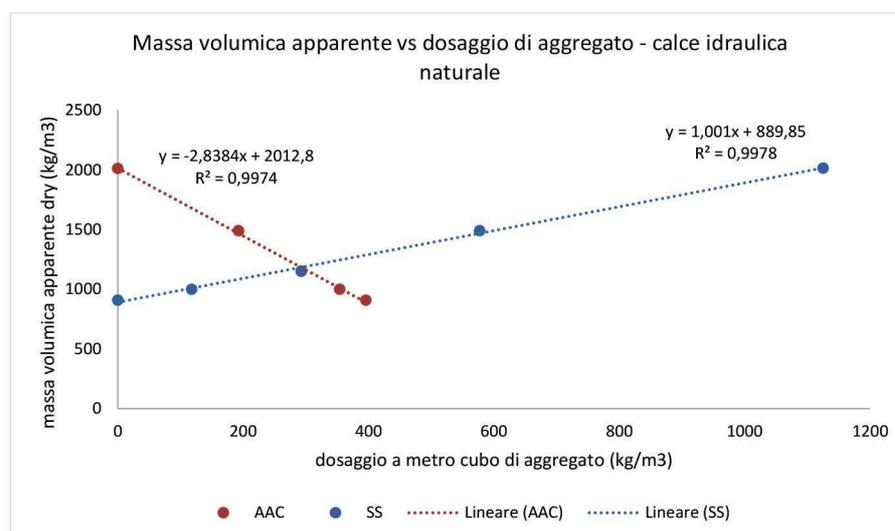
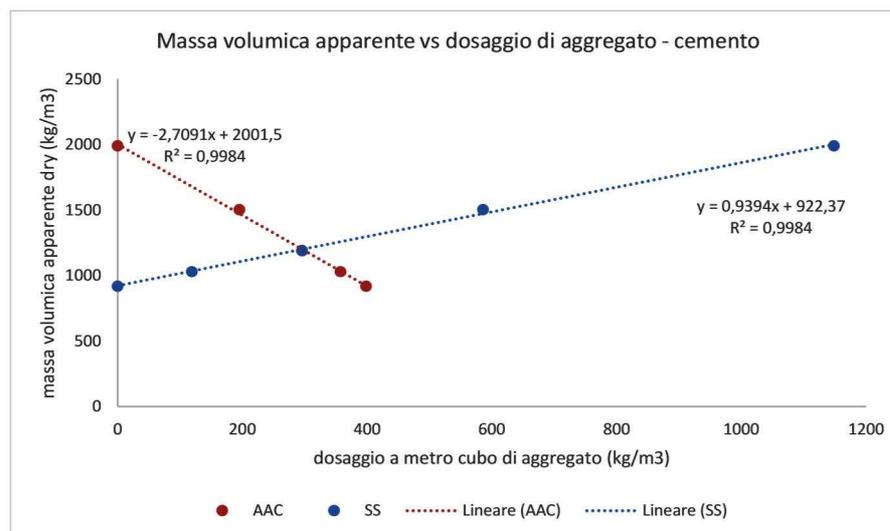


Figura 87. Massa volumica apparente media delle miscele in funzione del dosaggio per metro cubo di aggregato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Per quanto attiene alle miscele C100, NHL100 e L100 in Tabella 11 si riportano i valori delle densità reale ed apparente, della porosità e del coefficiente di assorbimento d'acqua misurati con il metodo della UNI EN 1936:2007, il valore della massa volumica apparente ottenuto con la procedura della UNI EN 1015-10:2007 e lo scostamento - in valore assoluto - tra le due grandezze apparenti, analoghe e confrontabili.

Tabella 11. Proprietà fisiche delle malte.

Sigla miscela	M ₁ (g)	M ₂ (g)	M ₃ (g)	ρ _r (g/cm ³)	p (%)	W (%)	ρ _{app} (g/cm ³)	mva (g/cm ³)	Δ (%)	
C 100	A	123,44	75,79	210,55	2,59	64	71	0,92	0,93	1
	B	106,96	65,47	178,41	2,58	63	67	0,95	0,92	4
	C	107,00	64,00	180,00	2,49	63	68	0,92	0,91	1
NHL 100	A	106,15	64,99	179,22	2,58	64	69	0,93	0,90	3
	B	103,60	63,57	174,45	2,59	64	68	0,93	0,93	0
	C	101,00	65,00	172,00	2,81	66	70	0,94	0,93	1
L 100	A	117,28	72,32	202,65	2,61	66	73	0,90	0,82	8
	B	112,20	69,05	194,96	2,60	66	74	0,89	0,82	7
	C	110,20	72,00	192,00	2,88	68	74	0,92	0,83	10

M₁ massa del campione a secco; M₂, massa satura idrostatica del campione; M₃, massa satura a superficie asciutta del campione; ρ_r, densità reale; p, porosità accessibile all'acqua; W, assorbimento d'acqua; mva, massa volumica apparente secondo UNI EN 1015-10:2007; ρ_{app}, densità apparente; Δ, scostamento in valore assoluto e percentuale tra la densità apparente e la massa volumica apparente

Il calcolo della conducibilità termica tabellare - secondo la UNI EN 1745:2020 - è stato effettuato adoperando l'Eq.35 ottenuta tramite l'interpolazione dei valori presenti nella tabella A.12 della norma:

$$\lambda = 0,0556e^{0,0015m} \quad (\text{Eq.35})$$

- λ, conducibilità termica (W/mK)
- m, massa volumica apparente asciutta (kg/m³)

In Tabella 12 sono riportati i valori ottenuti, evidenziando l'eventuale soddisfacimento dei requisiti fissati dalla norma di riferimento per gli intonaci termici (conducibilità termica inferiore a 0,20 W/mK)

Tabella 12. Conducibilità termica tabellare. Le celle campite corrispondono alle miscele qualificabili come intonaci termici.

sigla	mva (kg/m ³)	λ (W/mK)	sigla	mva (kg/m ³)	λ (W/mK)	sigla	mva (kg/m ³)	λ (W/mK)
C0 A	1963	1,05	NHL0 A	2049	1,19	L0 A	1745	0,76
C0 B	1951	1,03	NHL0 B	1971	1,06	L0 B	1731	0,75
C0 C	1988	1,09	NHL0 C	2023	1,15	L0 C	1749	0,77
C25 A	1492	0,52	NHL25 A	1511	0,53	L25 A	1366	0,45
C25 B	1530	0,55	NHL25 B	1476	0,51	L25 B	1349	0,45
C25 C	1489	0,52	NHL25 C	1501	0,53	L25 C	1350	0,44
C50 A	1196	0,33	NHL50 A	1178	0,33	L50 A	1104	0,29
C50 B	1189	0,33	NHL50 B	1154	0,31	L50 B	1103	0,29
C50 C	1184	0,33	NHL50 C	1120	0,30	L50 C	1119	0,30
C75 A	1008	0,25	NHL75 A	986	0,25	L75 A	960	0,23
C75 B	1019	0,26	NHL75 B	1010	0,26	L75 B	959	0,23
C75 C	1043	0,26	NHL75 C	1006	0,25	L75 C	970	0,24
C100 A	931	0,22	NHL100 A	899	0,22	L100 A	824	0,19
C100 B	916	0,22	NHL100 B	927	0,22	L100 B	824	0,19
C100 C	908	0,22	NHL100 C	932	0,23	L100 C	828	0,19

mva, massa volumica apparente secondo UNI EN 1015-10:2007; λ, conducibilità termica tabellare

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA.

I risultati della prova a rottura per flessione a tre punti e per compressione uniassiale sono distinti per legante e per provino (A, B, C) e riportati in diagrammi a colonne raggruppate mostrati nelle Figura 88 e Figura 89.

I valori medi della resistenza meccanica a flessione hanno esibito, nel passaggio dalla miscela “0” a quella “100”, una riduzione dell’84%, dell’71% e del 84% rispettivamente per le miscele con cemento, calce idraulica naturale e calce aerea. I valori medi della resistenza meccanica a compressione, invece, una riduzione del 89%, dell’82% e del 65% rispettivamente per le miscele con cemento, calce idraulica naturale e calce aerea.

Le resistenze, sia a flessione che a compressione, sono state infine diagrammate in funzione del dosaggio di aggregato riciclato per metro cubo di miscela, ottenendo i grafici riportati in Figura 90. La relazione di proporzionalità inversa tra la prestazione meccanica e il dosaggio di aggregato riciclato per metro cubo di miscela è analiticamente traducibile - nella quasi totalità dei casi - mediante funzioni esponenziali con coefficiente di correlazione prossimo all’unità. Fanno eccezione la linea di tendenza della flessione per le miscele cementizie, non esponenziale ma lineare, e quella della compressione per le formulazioni con malta aerea che si attesta ad una correlazione di 0,86.

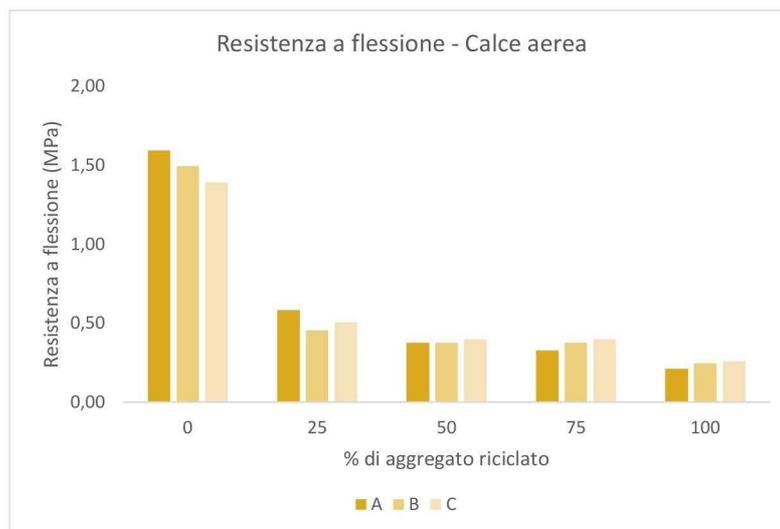
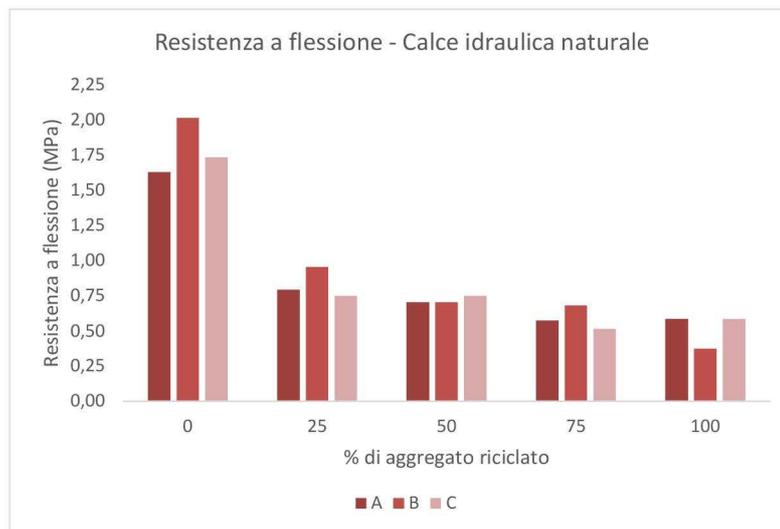
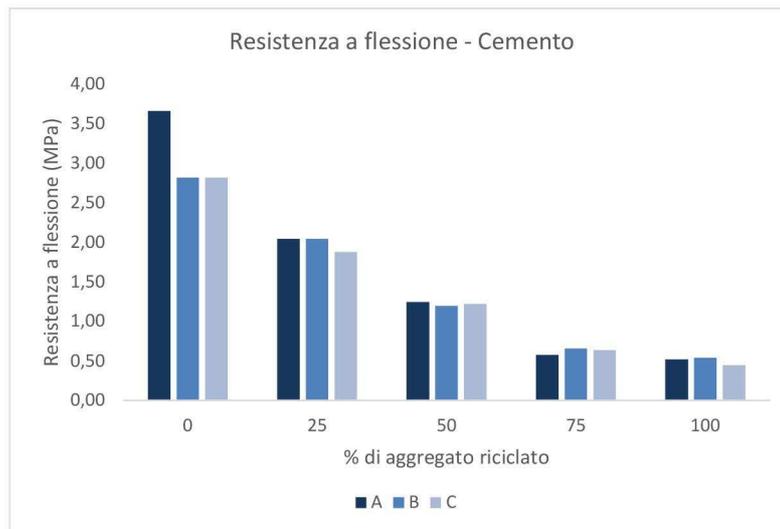


Figura 88. Prove di resistenza a flessione delle malte: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

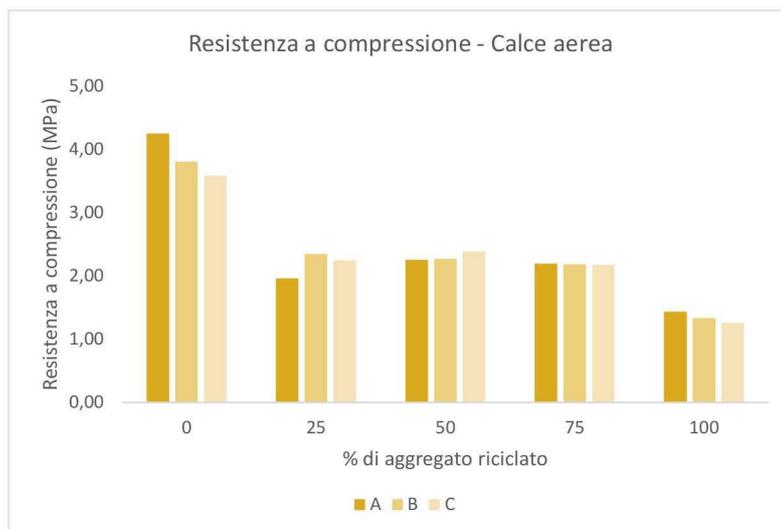
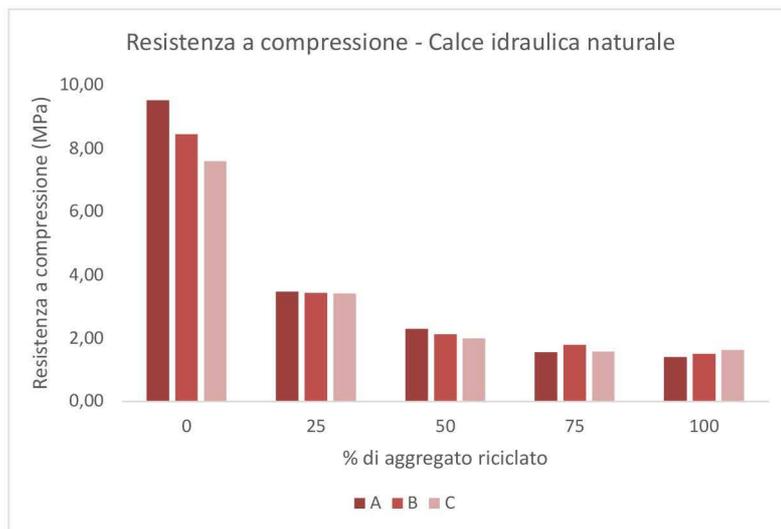
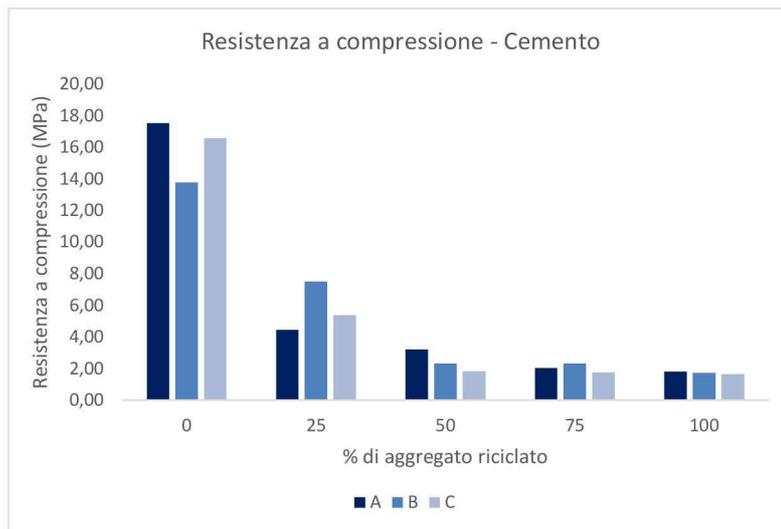


Figura 89. Prove di resistenza a compressione delle malte: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

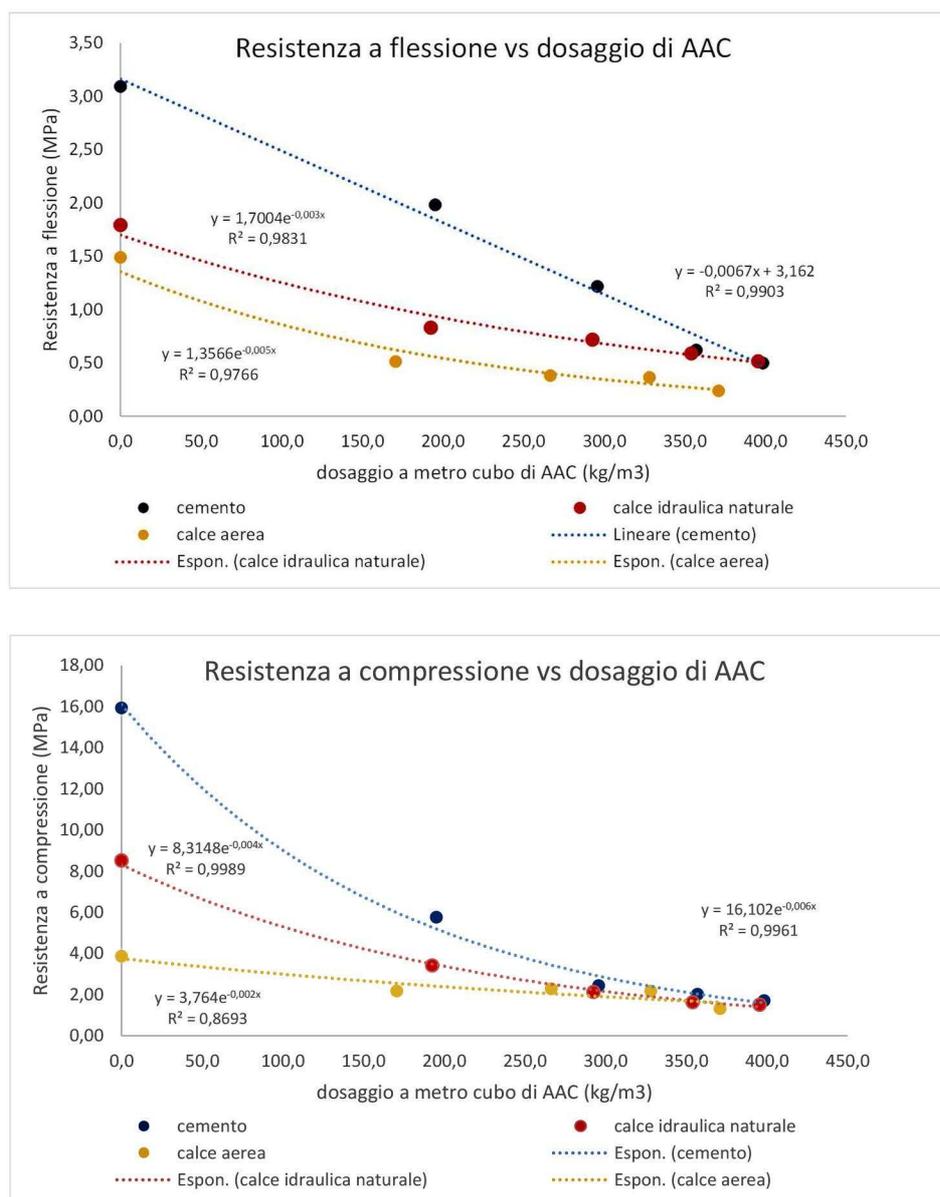


Figura 90. Prove di resistenza a flessione e compressione: grafico che diagramma le resistenze medie in funzione della massa di AAC per metro cubo di malta. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi coefficiente di correlazione ed equazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Per quanto attiene all'assorbimento d'acqua per capillarità, il coefficiente è aumentato - nel passaggio dalla miscela "0" a quella "100" di circa il 280% per le malte con cemento e del 125% per quelle con calce idraulica naturale. La calce aerea, invece, ha esibito un aumento più contenuto dei fenomeni di assorbimento con una variazione complessiva del solo 43%. I risultati sono riportati per singoli legante e miscela in Figura 91 mentre in Figura 92 sono stati confrontati i valori medi per miscela di tutti e tre i leganti.

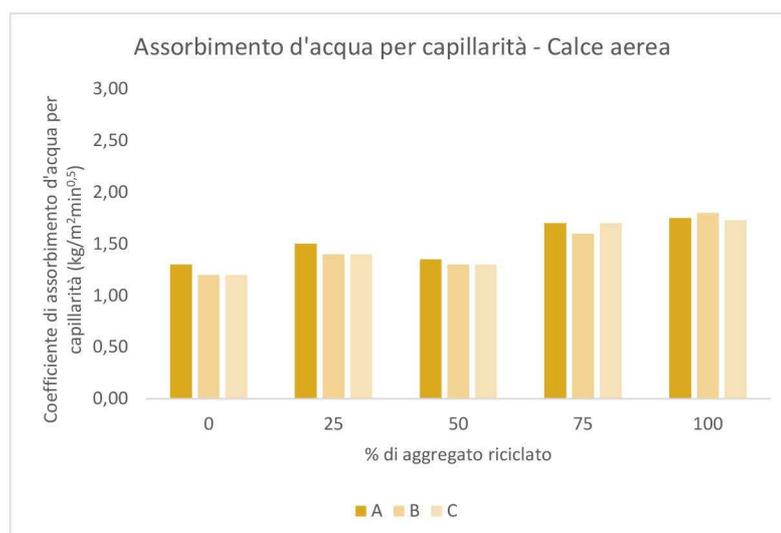
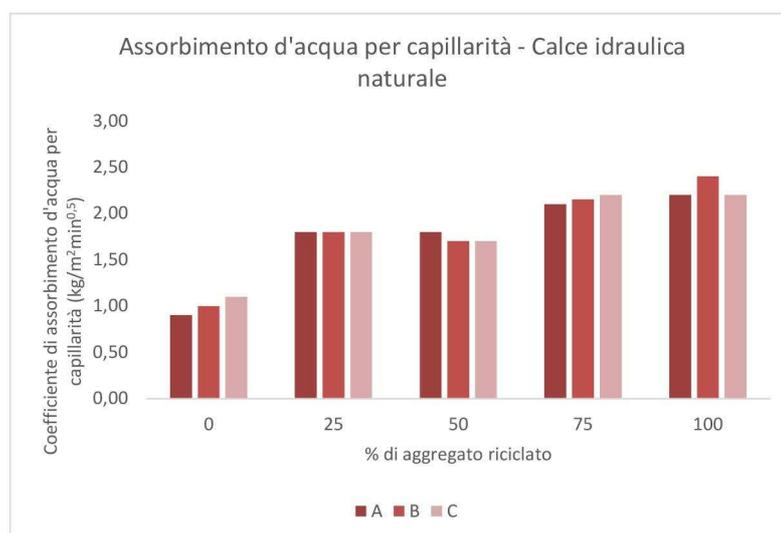
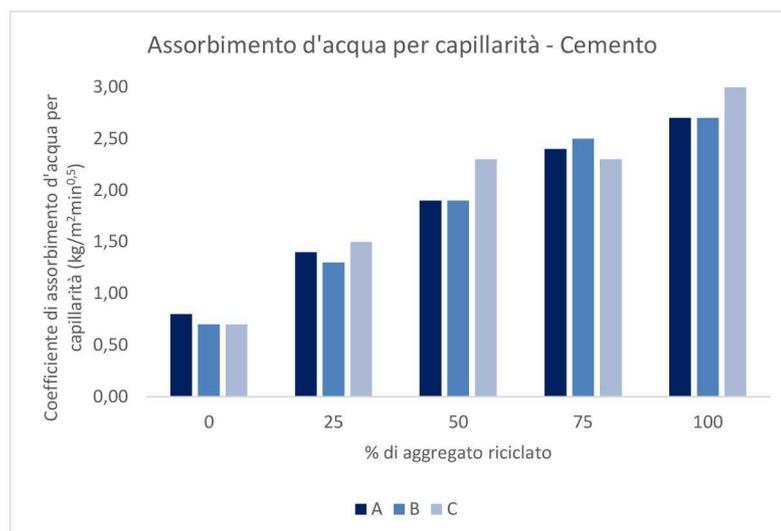


Figura 91. Prova di assorbimento di acqua per capillarità delle malte: valori distinti per miscela e provino.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

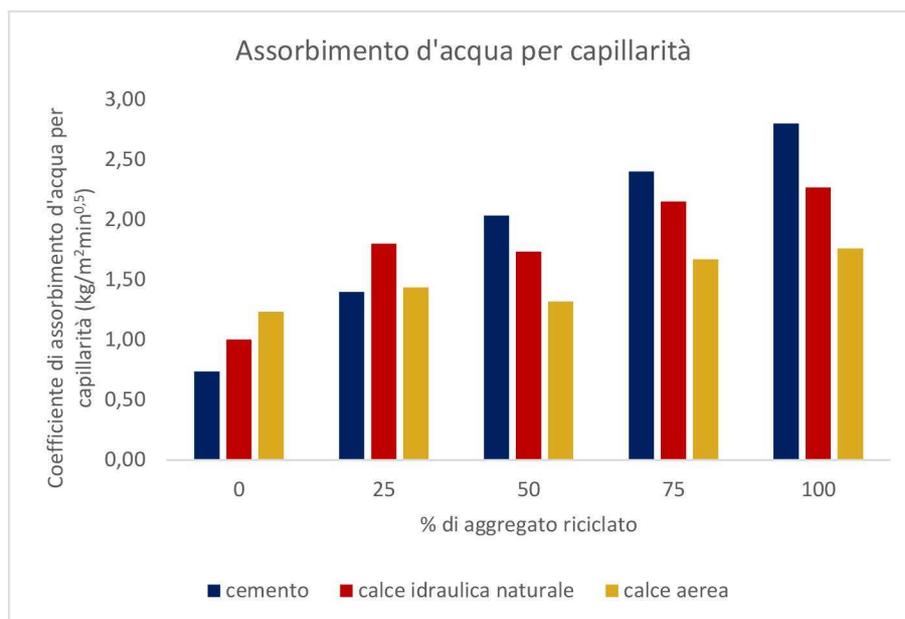
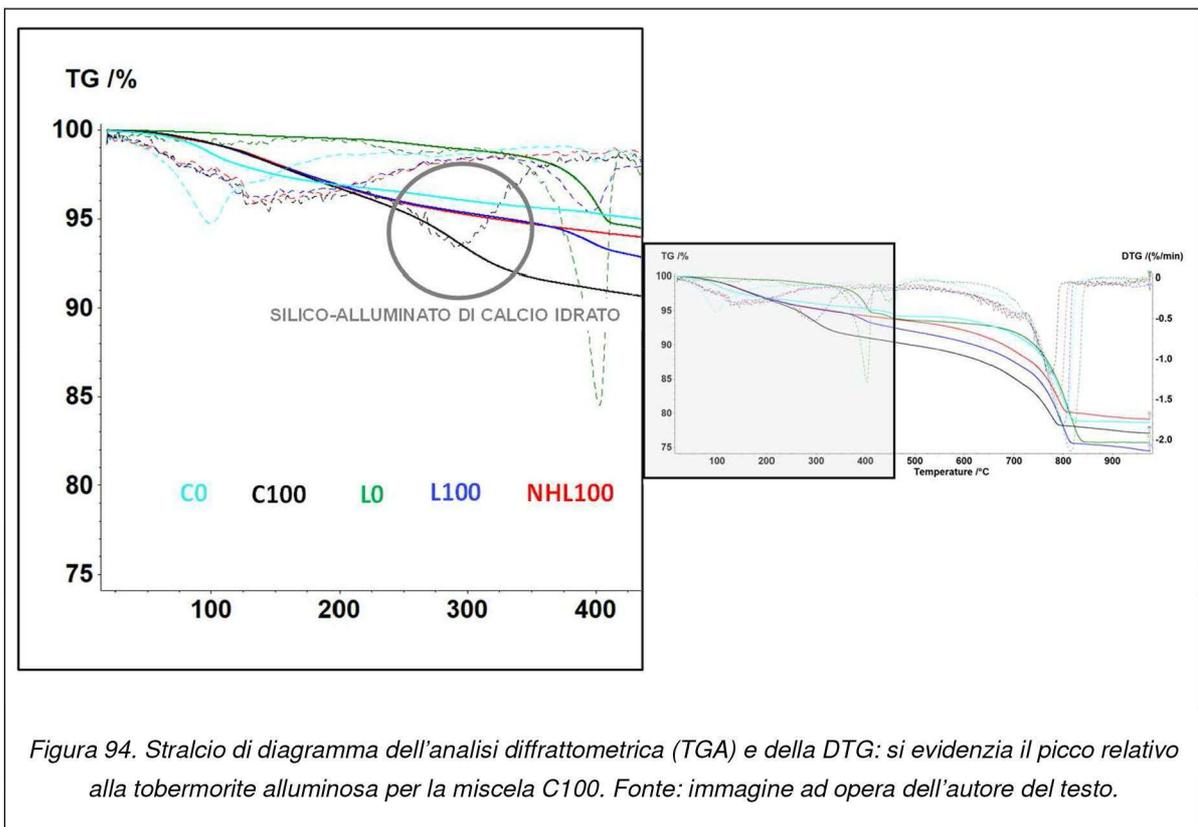
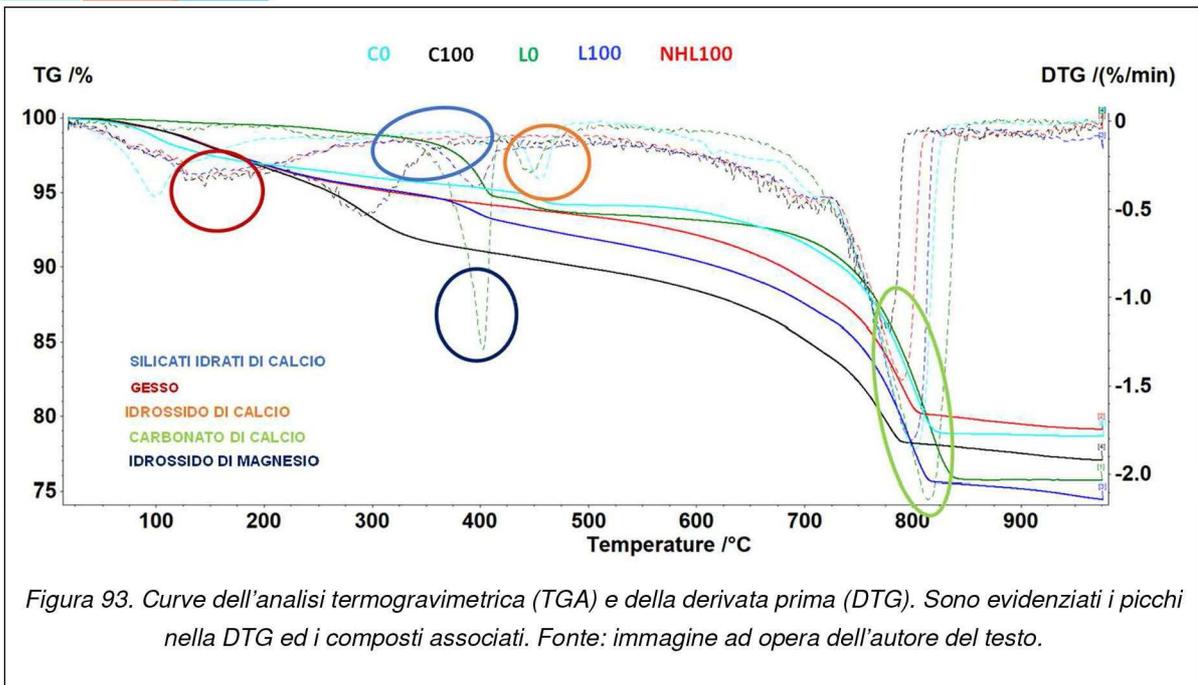
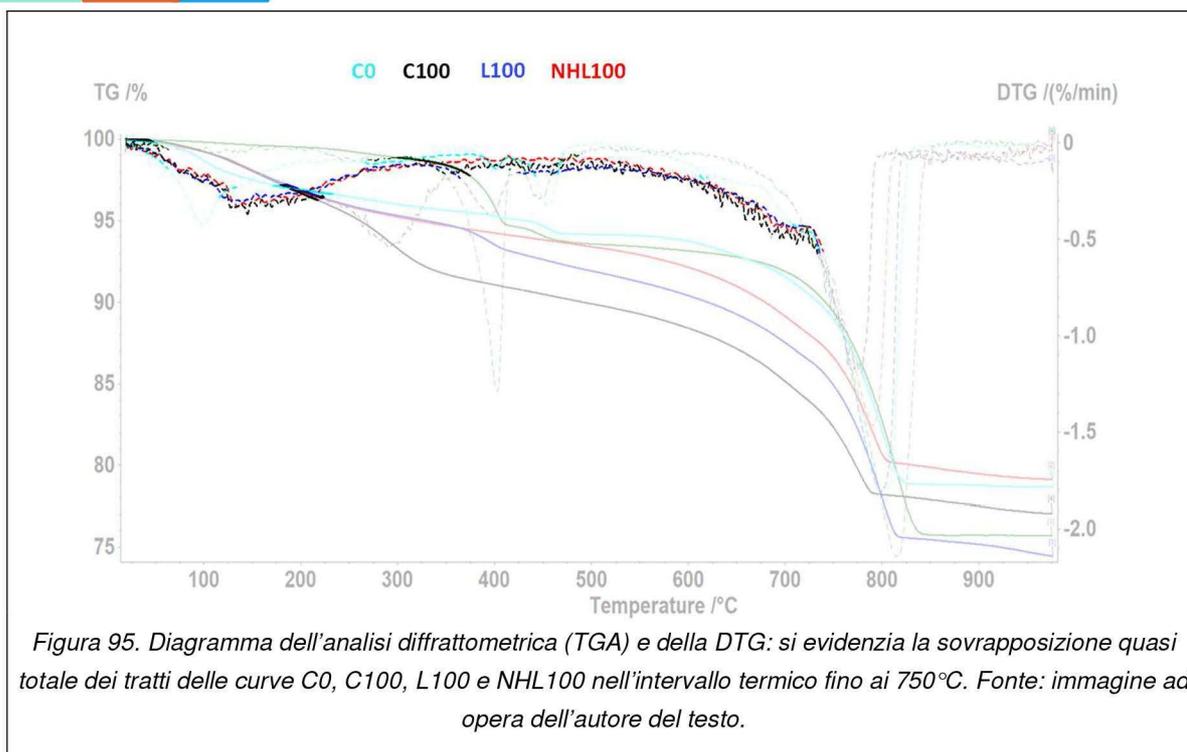


Figura 92. Coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità medio, distinto per legante e miscela. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

CARATTERIZZAZIONE CHIMICO-MINERALOGICA.

I risultati dell'analisi Termogravimetrica (TGA) delle miscele C0, L0, C100, NHL100 e L100 sono mostrati in Figura 93. Il grafico riporta con linea continua le curve rappresentative della variazione percentuale della massa, in linea tratteggiata le derivate prime (*Derivative Thermogravimetry - DTG*). Ad essere visibili nelle formulazioni con aggregato riciclato sono i picchi nella *DTG* corrispondenti alla decomposizione del gesso, attorno ai 130°C, dell'idrossido di calcio (portlandite), attorno ai 500°C e del carbonato di calcio, attorno ai 750°C. A differenziare la *DTG* della miscela C100 da quella di NHL100 e L100 è la presenza nella zona centrale del diagramma, comune alle tre formulazioni e rumorosa poiché corrispondente a dei composti non elevatamente cristallini di un picco - attorno alla temperatura di 300°C - associato alla degradazione di un silico-alluminato di calcio idrato (tobermorite alluminosa), come mostrato nella Figura 94. Infine, le curve delle *DTG* relative alle miscele con il 100% di AAC, indipendentemente dal tipo di legante, e a quella C0 mostrano una sovrapposizione quasi totale nell'intervallo termico fino ai 750°C, fatta eccezione per il picco della tobermorite alluminosa e per quello - nella L100 - dell'idrossido di magnesio, come riportato in Figura 95.





Infine, per operare la caratterizzazione delle miscele ai sensi delle specificazioni normative della UNI EN 998-1,2:2016 si è considerato in primo luogo il parametro più discriminante, ossia la resistenza a compressione, in funzione del quale le miscele sono state classificate come malte da muratura (UNI EN 998-2:2016) e/o come intonaci (UNI EN 998-1:2016). I risultati per le prime sono riportati nella Tabella 13. Si osserva che nessuna delle miscele è qualificabile come M20 e soltanto quella cementizia senza aggregato riciclato ha un valore medio di resistenza meccanica tale da rientrare nelle categorie M15 e M10. Anche per le M5 e M2,5, escluse le formulazioni con sola sabbia silicea, è al più la miscela al 25% di AAC con i leganti idraulici a consentire il raggiungimento del valore minimo di resistenza a compressione. Per quanto attiene alle malte da intonaco, nella Tabella 14 sono sintetizzate le classificazioni secondo le quattro categorie normative CSI, CSII, CSIII e CSIV, alle quali corrispondono - rispettivamente - valori medi del parametro meccanico di:

- >0,4 MPa per CSI
- >1,5 MPa e <5,0 MPa per CSII
- >3,5 MPa e <7,5 MPa per CSIII
- >6,0 MPa per CSIV

La domanda prestazionale per gli intonaci è inferiore rispetto a quella per le malte da muratura, pertanto più miscele sono risultate idonee all'impiego, in particolare nelle categorie CSI e CSII, senza distinzione di legante e fino alla

percentuale di sostituzione massima dell'aggregato riciclato. Le richieste più "severe" per CSIII e CSIV sono state soddisfatte, invece, soltanto dalle formulazioni idrauliche senza AAC.

Tabella 13. Classificazione delle miscele secondo la UNI EN 998-2:2016: si riportano i numeri parziale e complessivo di miscele per ogni categoria.

	M20	M15	M10	M5	M2,5
C0		1	1	1	1
C25				1	1
C50					
C75					
C100					
NHL0				1	1
NHL25					1
NHL50					
NHL75					
NHL100					
L0					1
L25					
L50					
L75					
L100					
	0	1	1	3	5

Tabella 14. Classificazione delle miscele secondo la UNI EN 998-1:2016: si riportano i numeri parziale e complessivo di miscele per ogni categoria.

	CSIV	CSIII	CSII	CSI
C0	1			
C25		1		
C50			1	1
C75			1	1
C100			1	1
NHL0	1			
NHL25			1	
NHL50			1	1
NHL75			1	1
NHL100			1	1
L0		1	1	
L25			1	1
L50			1	1
L75			1	1
L100				1
	2	2	11	10

Il valore di assorbimento d'acqua per capillarità è invece sempre abbondantemente superiore alle soglie W_1 e W_2 , rispettivamente $0,40 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ e $0,20 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$, individuate dalla UNI EN 998-1:2016.

DISCUSSIONI

La seconda campagna sperimentale si è posta come proposito quello di valutare l'influenza della variabile "legante" sulle malte indurite mediante il confronto delle proprietà fisiche e meccaniche di miscele confezionate con una stessa percentuale di AAC ma diverso legante. Ogni formulazione, peraltro, è stata messa a punto ricorrendo all'equazione dei volumi del calcestruzzo così da controllarne il proporzionamento. Tra gli ulteriori obiettivi, infine, quello di verificare la praticabilità dell'ipotesi applicativa di malta termoisolante e di approfondire le tematiche inerenti alla composizione mineralogica delle miscele, con riferimento particolare alle specie chimiche contenenti zolfo.

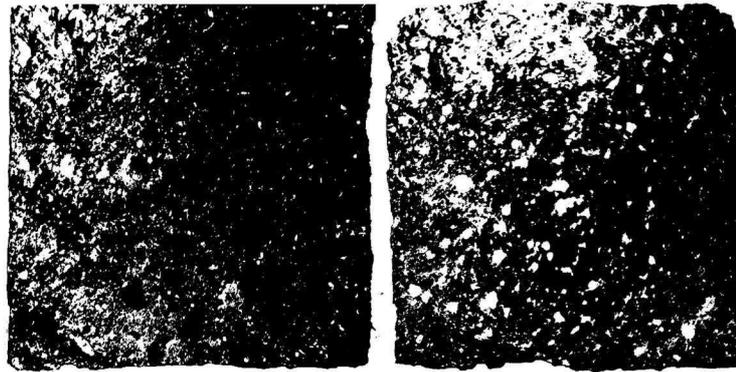
L'estensione della percentuale di aggregato riciclato sostitutiva della sabbia sino al 100% ha comportato, coerentemente con quanto discusso al paragrafo 5.2)1 al quale si rimanda per i riferimenti bibliografici, una riduzione maggiore della massa volumica apparente delle malte. La tipologia di legante ha determinato una variazione assoluta della proprietà fisica, nel senso che le malte con cemento e calce idraulica naturale hanno esibito valori di massa volumica apparente sempre superiori a quelli della calce aerea, e questo è coerente con quanto osservato in proposito della variabilità della microstruttura dei conglomerati in dipendenza dal legante [72,157,158]. Le variazioni relative per ogni intervallo²² sono risultate, tuttavia, quasi sovrapposte per i tre leganti e progressivamente ridotte: il passaggio dallo 0% al 25% di AAC ha comportato - in media - una diminuzione della massa volumica apparente del 25%, mentre dal 50% al 75% del 14% e dal 75% al 100% del 9%. È lecito ipotizzare che per l'impostazione dell'equazione dei volumi utilizzata, per congruenza, l'aggiunta di massa di AAC sia gradualmente diminuita dalla miscela 0 a quella 100. Il rapporto in massa aggregato totale-legante, infatti, è stato mantenuto costante mentre quello in volume è aumentato. Tuttavia, le variazioni della volumetria di aggregato riciclato per metro cubo di miscela si sono tradotte in lievi oscillazioni della sua massa, in ragione della contenuta densità dell'AAC. Nonostante l'attingimento di un valore di massa volumica asciutta di circa 920 kg/m³ per calce idraulica naturale e cemento e di circa 820 kg/m³ per la calce aerea, le miscele non sono risultate sufficientemente leggere per essere classificate come intonaci termoisolanti secondo i parametri del prospetto della UNI EN 998-1:2016, fatta eccezione per i provini L100 confezionati con la calce aerea. Considerate le soglie di 0,1 e 0,2 W/mK fissate per gli intonaci termici T1 e T2, ne deriva, secondo il metodo tabellare della UNI 1745:2020, che la massa volumica asciutta delle malte dovrebbe

²² Si intende la variazione percentuale delle miscele al 25%, 50%, 75% e 100% rispetto alla 0%

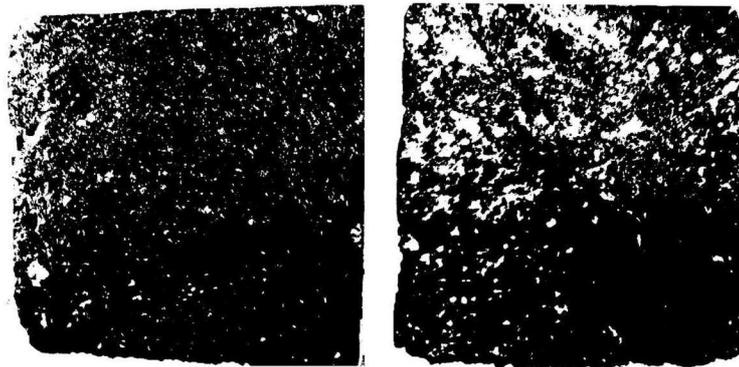
attestarsi su 400 e 800 kg/m³, rispettivamente. In tal senso, si può asserire che nelle formulazioni studiate l'unica variabile sulla quale agire per ottenere queste prestazioni sia la massa volumica dell'aggregato, evidentemente troppo alta per garantire la leggerezza demandata. In effetti, alcune delle sperimentazioni su aggregati riciclati per il confezionamento di prodotti termoisolanti hanno ricorso a vermiculite e polistirene espansi (con massa volumica di 140 e 19 kg/m³) che hanno consentito - pur con rapporti aggregato-legante contenuti e pari a 3 - di raggiungere densità delle malte indurite tra i 400 ed i 950 kg/m³ e conducibilità termiche tra 0,09 e 0,45 W/mK [136]. Altre, invece, hanno impiegato sughero, vetro ed ancora prodotti plastici che oltre ad essere di per sé materiali più isolanti del calcestruzzo, sono anche meno densi [137,159]. Le prestazioni meccaniche, come prevedibile, hanno subito decrementi sino al 90% nel caso di totale sostituzione dell'aggregato siliceo con quello riciclato. Mentre la resistenza a compressione delle miscele con cemento e calce idraulica naturale è diminuita del 60% già nella malta con il 25% di AAC, nella casistica della calce aerea la riduzione è stata contenuta al 44%. Nell'avanzamento della sostituzione, peraltro, i leganti idraulici hanno manifestato maggiormente gli effetti dell'alleggerimento delle malte, mentre nella calce aerea i valori di resistenza a compressione per il 25%, il 50% ed il 75% di AAC si sono mantenuti pressoché costanti. La variazione percentuale tra la miscela al 100% e quella allo 0%, infine, si è attestata sul 65% per la calce aerea a fronte del 90% e dell'82% per cemento e calce idraulica naturale. Questa circostanza potrebbe ricondursi al fatto che l'inserimento di un aggregato riciclato in calcestruzzo nella matrice aerea della calce si traduce concretamente in un'addizione di "idraulicità". L'analisi termogravimetrica delle miscele L100 e NHL100, infatti, è risultata in una sovrapposizione quasi totale delle due curve a riprova dell'effetto dell'aggregato in AAC sulla calce aerea. In proposito delle caratterizzazioni chimico-mineralogiche, anche con la sostituzione al 100% della sabbia silicea con l'inerte riciclato non sono stati riscontrati composti contenenti gruppi solfatici diversi dal gesso. Ciò, pertanto, ha fatto supporre che la rilevazione dell'idrossido solfato di alluminio idrato - registrata nella prima fase sperimentale - fosse da ricondurre ad un errore di lettura del *software*. Nella miscela C100, invece, è stata osservata una nuova fase - la tobermorite alluminosa - ascrivibile alla famiglia dei silico-alluminati di calcio idrati che, in linea con quanto riportato da altri autori [160], potrebbe essere originata dall'interazione dell'aggregato riciclato con i composti del cemento *Portland*, ed in particolare con la portlandite che in effetti nella miscela C100 è meno presente, probabilmente consumata nella reazione di formazione della tobermorite. Tuttavia, i risultati relativi alle prestazioni

meccaniche dei provini C100 sono in disaccordo con quanto osservato da Lan *et al.* [161] in merito all'apporto migliorativo della tobermorite alluminosa sulle resistenze a compressione e flessione dei conglomerati.

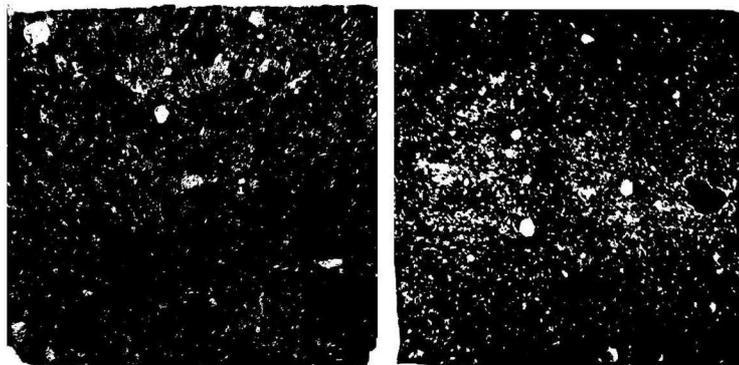
L'inserimento del 25% di AAC ha pesato maggiormente sulla resistenza a flessione delle calci, rispetto al cemento. La prestazione, infatti, si è ridotta del 36% nella miscela C25 e del 60% e 66% nelle miscele NHL25 e L25. L'incremento di massa successivo dell'aggregato riciclato, tuttavia, ha allineato le riduzioni al 60% in media. I risultati conseguiti differiscono da quelli riportati da Ferreira *et al.* [162] che hanno misurato un incremento della resistenza a flessione di malte da intonaco confezionate con aggregati riciclati cementizi. Tuttavia, la diversa distribuzione granulometrica dell'aggregato e la frazione di fini, ridotta per l'AAC adoperato, potrebbero aver azzerato l'effetto di *fillerizzazione*. Ulteriore fattore da considerare è l'elevato assorbimento dell'aggregato riciclato che ha richiesto l'adattamento dell'acqua di impasto per assicurare la lavorabilità della malta. Il rapporto acqua-legante in tutte le miscele è passato dai valori di 0,50 e 0,90 per i leganti idraulici e la calce aerea, rispettivamente, a 2,69 nelle malte al 100% di AAC. Come conseguenza, i prodotti sono divenuti progressivamente più porosi ed accessibili all'acqua, sino ad un valore di porosità di circa il 70% in C100, NHL100 e L100, e quindi meno resistenti meccanicamente, similmente a quanto riportato da Saiz-Martinez *et al.* [163]. In Figura 96 sono mostrate le fotografie scattate ai provini delle miscele 0 e 100 dei tre leganti, processate con operazioni di soglia ed inversione. Ciò che si intende evidenziare - al netto dei disturbi dovuti alla luce dell'ambiente, visibili negli angoli in alto a sinistra delle immagini - sono le dimensioni e il numero di pori (punti bianchi) che nelle malte al 100% di AAC sono immediatamente distinguibili.



Da sinistra: C0 - C100



Da sinistra: NHL0 - NHL100



Da sinistra: L0 - L100

Figura 96. Fotografie delle sezioni dei provini 0 e 100 per ciascuno dei leganti: evidenza della porosità più diffusa e dimensionalmente maggiore all'aumentare della percentuale di aggregato riciclato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

L'esecuzione della prova di assorbimento capillare, peraltro, ha mostrato che le miscele con cemento hanno quadruplicato il proprio coefficiente - da 0,73 a 2,80 $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ - così come quelle con calce idraulica naturale sono passate da 1,00 a 2,27 $\text{kg/m}^2\text{min}^{0,5}$. Per la calce aerea si è confermato l'intervento dell'aggregato cementizio di modifica della microstruttura del composto verso la direzione

dell'idraulicità. Il valore del coefficiente di assorbimento d'acqua pari a $1,23 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$ della miscela L0 è aumentato soltanto del 22% nella L100, attestandosi su $1,50 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0,5}$.

I risultati sono coerenti con quanto riportato da Oliveira *et al.* [164] relativamente all'aumento della porosità capillare - e conseguentemente dell'assorbimento di acqua - in proporzione alla diminuzione della quantità di legante cementizio. Una diversa circostanza, invece, è quella presentata da Li *et al.* [139] che hanno riscontrato una riduzione della quantità d'acqua assorbita per capillarità in caso di utilizzo di aggregati riciclati ceramici. Tuttavia, anche in questo caso il ricorso a materiali polverosi potrebbe aver realizzato un effetto di *fillering* che ha di fatto ridotto la porosità capillare.

Nella campagna di confezionamenti appena discussa l'equazione dei volumi è stata risolta in funzione della massa di legante per metro cubo di miscela. Ciò ne ha comportato la riduzione progressiva ed il raggiungimento, nelle miscele al 100% di AAC, di un dosaggio di 130 kg per metro cubo, notevolmente inferiore rispetto alle quantità tipicamente adoperate per il confezionamento di malte. Le formulazioni con calce aerea, peraltro, sono sembrate troppo vincolanti rispetto al campo di impiego considerato che la perdita di prestazione meccanica non si è tradotta in un guadagno valido in altre *performances*. Sulla base di quanto osservato, dunque, nella terza fase di confezionamenti sono state operate modifiche all'approccio per il proporzionamento delle formulazioni.

5.2)3 FASE 1: OBIETTIVI, MATERIALI E METODI, RISULTATI, DISCUSSIONI

RIFERIMENTI NORMATIVI

- UNI EN 197-1:2011, *Cemento - Parte 1: Composizione, specifiche e criteri di conformità per cementi comuni*
- UNI EN 459-1:2015, *Calci da costruzione - Parte 1: Definizioni, specifiche e criteri di conformità*
- UNI EN 1097-3:1999, *Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati - Determinazione della massa volumica in mucchio e dei vuoti intergranulari*
- UNI EN 1015-11:2019, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*
- UNI EN 1015-3:2007, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca (mediante tavola a scosse)*
- UNI EN 1015-10:2007, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 10: Determinazione della massa volumica apparente della malta indurita essiccata*
- UNI EN 1936:2007, *Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della massa volumica reale e apparente e della porosità totale e aperta*
- UNI EN 1745:2020, *Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare le proprietà termiche*
- UNI EN 1015-18:2004, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione del coefficiente di assorbimento d'acqua per capillarità della malta indurita*
- UNI EN 998-1:2016, *Specifiche per malte per opere murarie - Parte 1: Malte per intonaci interni ed esterni*
- UNI EN 998-2:2016, *Specifiche per malte per opere murarie - Parte 2: Malte da muratura*
- UNI EN 1015-12:2016, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 12: Determinazione dell'aderenza al supporto di malte da intonaco esterno ed interno*
- UNI EN 1015-19:2008, *Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 19: Determinazione della permeabilità al vapore d'acqua delle malte da intonaco indurite*
- UNI EN 12504-4:2021, *Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*

OBIETTIVI

Le rilevanze della seconda fase di attività sperimentali hanno funto da premessa per la parte conclusiva della ricerca. L'elevato assorbimento d'acqua e la penalizzazione delle prestazioni meccaniche associati alla sostituzione

dell'aggregato siliceo con l'aggregato riciclato, indipendentemente dal legante impiegato, hanno spinto ad apportare una correzione all'impostazione del *mix design* precedente e a verificare i risultati conseguenti alla modifica. In aggiunta, con lo scopo di differenziare le formulazioni e la conseguente procedura di caratterizzazione, la rimodulazione delle condizioni al contorno nell'equazione dei volumi è stata approntata scindendo le casistiche della malta da muratura e degli intonaci e ampliando, per i secondi, l'analisi delle prestazioni con gli aspetti di lavorabilità, igrometrici e di aderenza al supporto. In ultimo, si è operata una sintesi dei dati ottenuti nelle tre fasi di lavoro con l'obiettivo di ricavare correlazioni generali tra le variabili di miscela e le prestazioni esibite dai prodotti.

MATERIALI E METODI

FORMULAZIONE DELLE MALTE: RIFERIMENTI TEORICI. Nella fase precedente della sperimentazione il confezionamento delle miscele si è basato sull'Eq.36:

$$\frac{1}{\left(\frac{1}{d_B} + \frac{(1-c)*b}{d_{ss\ rd}} + \frac{c*b}{d_{AAC\ rd}} + \frac{a}{d_A} + \frac{(1-c)*b*W_{SS}}{d_A} + \frac{c*b*W_{AAC}}{d_A}\right)} = m_B \quad (\text{Eq.36})$$

con:

- pedici "SS" e "AAC", grandezze riferite alla sabbia silicea e all'aggregato riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato
- pedice "ass", acqua assorbita
- pedice "rd", condizione di inserimento degli aggregati come asciutti

e sulle condizioni al contorno della Tabella 15:

Tabella 15. Parametri di miscela distinti a seconda dei leganti.

		NHL					
a		0,50					
b		3					
c	0	0,125	0,25	0,50	0,75	1,00	
		L					
a		1					
b		3					
c	0	0,125	0,25	0,50	0,75	1,00	
		C					
a		0,50					
b		3					
c	0	0,125	0,25	0,50	0,75	1,00	

NHL: calce idraulica naturale; L: calce aerea; C: cemento; a: rapporto acqua efficace-legante; b: rapporto in massa aggregato-legante; c: frazione in massa di aggregato riciclato su aggregato totale

Ciò ha comportato che all'aumentare di "c" e quindi del volume di aggregato riciclato per metro cubo di miscela, per congruenza si siano ridotti i volumi di aggregato siliceo e di legante. In particolare, le masse per metro cubo di legante nella miscela al 100% di AAC sono divenute inferiori di circa il 66% rispetto a quelle della formulazione di riferimento con sola sabbia silicea. In termini di proporzioni volumetriche, nelle malte con solo aggregato riciclato circa il 60% del volume complessivo è stato occupato da AAC a fronte del 4% competente al legante, come mostrato nella Figura 97. Si precisa che le informazioni riportate sono relative soltanto ai due leganti idraulici poiché il legante aereo - attesi i bassi valori di resistenza meccanica esibiti dalle miscele testate e la limitazione sull'ambiente di applicazione - non è stato adoperato nella terza fase di sperimentazione.

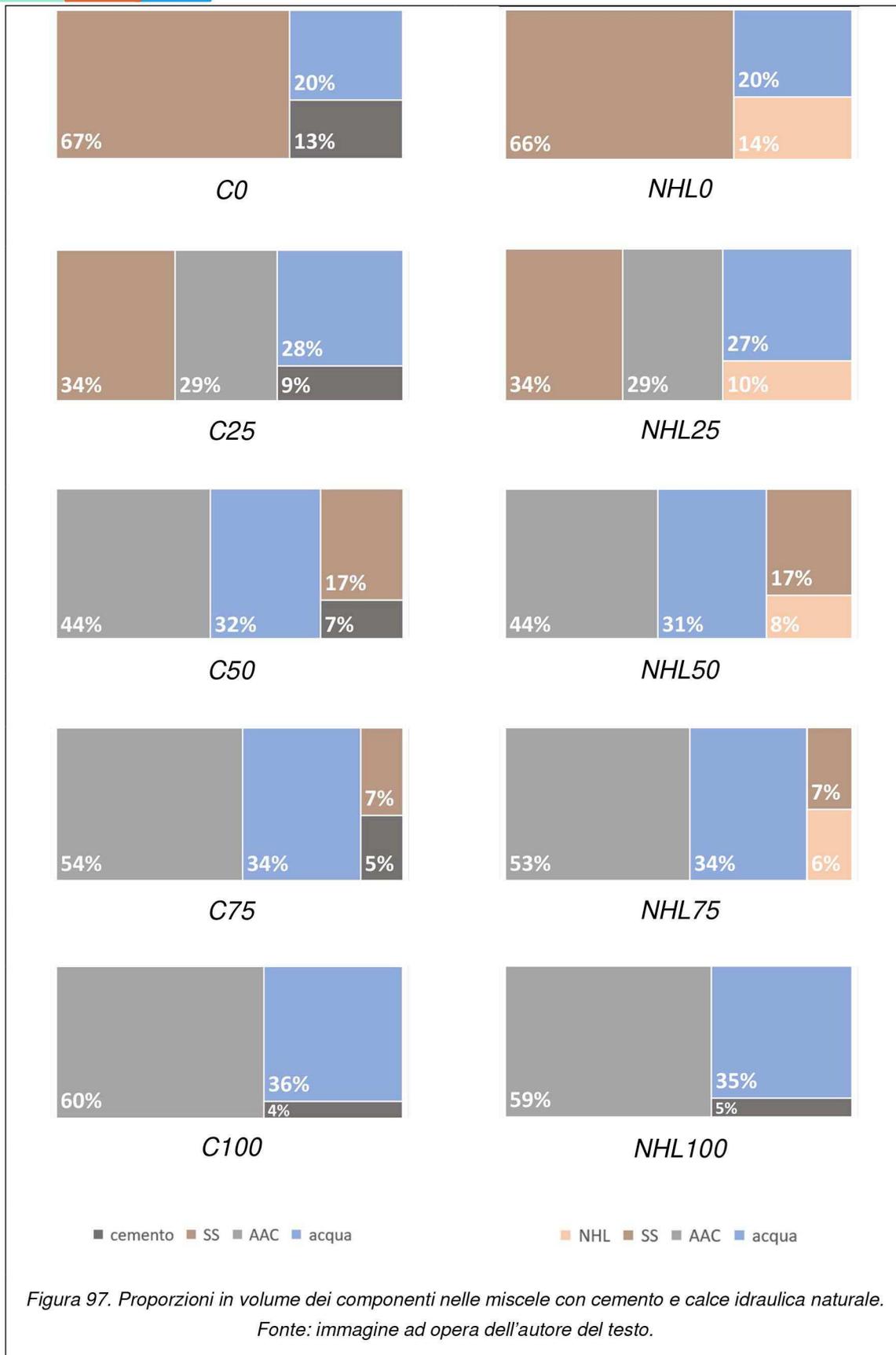


Figura 97. Proporzioni in volume dei componenti nelle miscele con cemento e calce idraulica naturale.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Sulla base di queste premesse, nella fase in commento si è deciso di modificare l'incognita nell'equazione dei volumi (Eq.32), approcciando in maniera analoga ai calcestruzzi e cioè fissando la quantità di massa di legante per metro cubo di miscela - invariante - ed il rapporto acqua efficace-legante mediante i parametri:

- a, rapporto in massa tra acqua efficace e legante
- b, massa di legante per metro cubo di miscela
- c, rapporto in massa tra aggregato riciclato e aggregato siliceo²³

da cui l'equazione è divenuta risolvibile in funzione del volume complessivo di aggregati²⁴. I valori di a, b e c - descritti nella sezione relativa ai metodi - sono stati differenziati a seconda della classe di impiego prospettata per le miscele: malta da muratura e malta da intonaco.

MATERIALI. La distinzione a cui si è appena fatto riferimento ha riguardato anche la scelta dei materiali. Per la preparazione delle malte da muratura - d'ora in avanti indicate con MUR - è stato adoperato un cemento Portland CEM II 42,5 A/L (UNI EN 197-1:2011), per quelle da intonaco - nel seguito nominate INT - una calce idraulica naturale NHL3,5 (UNI EN 459-1:2015). Dell'aggregato naturale, una sabbia silicea granita del fiume Po, la curva di distribuzione granulometrica è stata costruita *ad hoc*, come sarà descritto nei metodi, e differenziata per le classi MUR e INT. Sulle stesse curve, è stata sovrapposta quella dell'aggregato riciclato, proveniente dai blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato GASBETON® prodotti presso lo stabilimento sito in Volla (NA) dell'azienda EKORU, e fornito in due intervalli granulometrici: tra 1 e 4 mm ed inferiore ad 1 mm.

METODI. Le attività d'ora in poi descritte, salvo diversa precisazione, sono state espletate presso il laboratorio di materiali da costruzione TecnoLab srl (NA).

DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DEGLI AGGREGATI. Le curve di distribuzione degli aggregati sono state costruite a partire da un set di premiscelati disponibili in commercio, assortiti per impiego come malte da muratura e come intonaci per scopi generali. Dopo aver prelevato porzioni di 200 g di ciascuno dei prodotti, si è proceduto all'essiccazione in stufa ventilata ed alla stacciatura, seguendo le stesse modalità illustrate al sottoparagrafo 5.2)1. L'operazione è stata eseguita anche su campioni di cemento e calce idraulica naturale così da poter escludere dalle curve dei premiscelati, con un sufficiente grado di approssimazione, i tratti corrispondenti al legante ed ottenere, quindi, la distribuzione granulometrica degli aggregati. Le curve così ottenute per i premiscelati sono state quindi sovrapposte per poterne

²³ $\frac{m_{AAC}}{m_{SS}}$

²⁴ $V_{AAC} + V_{SS} = m_{AAC}d_{AAC} + m_{SS}d_{SS}$

individuare analogie e differenze a seconda della categoria d'uso del prodotto. Sulla base delle osservazioni ottenute, si è proceduto alla costruzione della curva di assortimento della sabbia silicea e dell'AAC per MUR e per INT. È stata quindi misurata la massa volumica in mucchio degli aggregati sciolti secondo le procedure della UNI EN 1097-3:1999, già descritte al sottoparagrafo 5.2)2.

CONFEZIONAMENTO E CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE. Per passare al confezionamento delle miscele, sono stati fissati i parametri di controllo a, b e c prima citati. Sia per MUR che per INT il rapporto acqua efficace-legante è stato posto pari a 0,50. La quantità di legante per metro cubo di miscela (b) è stata, invece, differenziata per categoria di malta. Per l'applicazione nelle murature il dosaggio di cemento è stato posto pari a 375 kg/m³, per le malte da intonaco, invece, la quantità di calce idraulica naturale è stata mantenuta a 310 kg/m³. Entrambi i valori sono stati concertati con esperti del settore consultati allo scopo, tenendo conto della relazione intercorrente tra la dose di legante e la prestazione meccanica della malta. Un'ulteriore differenziazione ha riguardato il valore del parametro "c", ossia il rapporto tra aggregato riciclato e aggregato naturale in massa. Per le malte MUR si è deciso di contenerne il valore tra 0 e 0,25 - infittendone il passo - mentre per le malte INT tra 0 e 0,40. La Tabella 16 riporta sinteticamente le combinazioni dei valori dei parametri fissati per il proporzionamento delle miscele.

Il sistema di siglatura dei provini è stato mutuato dalla sperimentazione precedente: lettera ad indicare il legante, numero per il riferimento al fattore "c", e le miscele sono state proporzionate, come sinteticamente mostrato in Tabella 17, ricavando le masse per metro cubo di tutti i componenti. Sono state ottenute dieci miscele, due delle quali (C0 e NHL0) utilizzate anche in questo caso come riferimento, *i.e. tal quale*, e formulate con solo aggregato naturale.

Tabella 16. Parametri di miscela distinti a seconda dei leganti.

MUR - C					
a					0,50
b					375
c	0	0,10	0,15	0,20	0,25
INT - NHL					
a					0,50
b					310
c	0	0,10	0,20	0,30	0,40

INT: malte da intonaco; NHL: calce idraulica naturale; C: cemento; MUR: malte da muratura; a: rapporto acqua efficace-legante; b: massa di legante per metro cubo di miscela; c: rapporto in massa tra aggregato riciclato e aggregato naturale

Tabella 17. Composizione delle miscele.

	Sigla	B kg/m ³	A kg/m ³	SS kg/m ³	AAC kg/m ³
MUR	C0	375	196,66	1145,04	0,00
	C10	375	257,80	901,34	90,13
	C15	375	279,56	814,65	122,20
	C20	375	297,49	743,17	148,63
	C25	375	312,53	683,23	170,81
INT	NHL0	310	164,59	1198,97	0,00
	NHL10	310	231,45	943,79	94,38
	NHL20	310	274,84	778,17	155,63
	NHL30	310	305,27	662,00	198,60
	NHL40	310	327,80	576,01	230,40

NHL: calce idraulica naturale; C: cemento; B: legante; A: acqua; SS: sabbia silicea; AAC: aggregato riciclato

Le malte sono state preparate secondo le modalità indicate nella UNI EN 196-1:2016 e già descritte nei sottoparagrafi 5.2)1 e 5.2)2. Alla miscelazione è seguita la fase di preparazione di tre tipologie di campioni, distinte a seconda che si trattasse di malte MUR o INT.

GRUPPO “INT”. Per le miscele del gruppo INT, formulate con calce idraulica naturale, sono stati confezionati 3 provini prismatici 40x40x160mm conformi alla norma UNI EN 1015-11:2019 di specificazione della geometria da sottoporre a prova di resistenza a flessione e compressione. I tre provini sono stati siglati - in aggiunta all’indicazione relativa al legante e alla percentuale di aggregato riciclato - con le lettere “A, B, C”. Al momento della preparazione, sono state misurate la consistenza dell’impasto mediante il metodo della tavola a scosse (UNI EN 1015-3:2007), la massa volumica delle polveri e la massa volumica apparente della malta allo stato fresco (UNI EN 1015-10:2007) (Figura 98). Le miscele sono state quindi compattate e stagionate seguendo il prospetto 1 della norma UNI EN 1015-11:2019. È stata monitorata la massa dei provini a 3, 7, 14, 21 e 28 giorni dal confezionamento. Conclusasi la fase di maturazione di 28 giorni, su questi campioni sono state eseguite le seguenti prove di caratterizzazione fisica e meccanica su malta indurita:

- misurazione della massa volumica apparente asciutta, secondo le modalità descritte al sottoparagrafo 5.2)2
- prova a rottura per flessione a tre punti e compressione uniassiale, secondo le modalità descritte al sottoparagrafo 5.2)2
- misurazione del coefficiente di assorbimento di acqua per capillarità, secondo le modalità descritte al sottoparagrafo 5.2)2

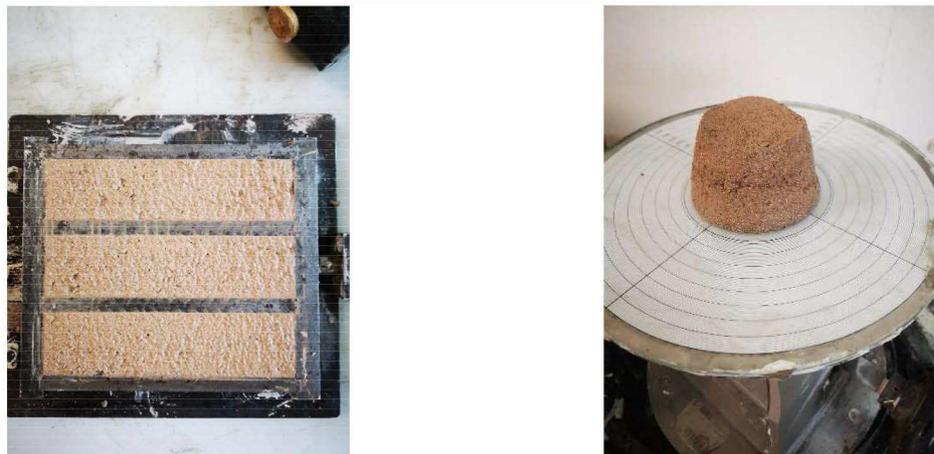


Figura 98. Fasi di preparazione dei campioni INT. Da sinistra: stampi metallici 40x40x160mm, tavola a scosse. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

In aggiunta ai provini prismatici, per le miscele con aggregato riciclato sono stati preparati campioni per l'esecuzione delle prove di aderenza al supporto, disciplinata dalla UNI EN 1015-12:2016, e della permeabilità al vapore acqueo (UNI EN 1015-19:2008). Per quanto attiene all'aderenza al supporto, la malta, confezionata secondo le modalità indicate in precedenza, è stata applicata, avendo cura di livellarla per ottenere una superficie liscia ed omogenea, in due strati con uno spessore complessivo di circa 1 cm, per ogni miscela, su tre supporti preventivamente condizionati in Calcestruzzo Aerato Autoclavato, laterizio e calcestruzzo. I materiali sono stati scelti tenendo conto del riferimento normativo (supporto in calcestruzzo), delle soluzioni tecnologiche più frequentemente adoperate nell'edilizia tradizionale (laterizio), volendo simulare con la prova l'effettiva condizione di esercizio di un intonaco, ed infine per studiare la compatibilità delle malte testate - con aggregato riciclato - con la sua stessa materia prima "madre". Atteso un breve periodo, utile a garantire la presa iniziale dello strato di malta, cinque anelli troncoconici in metallo conformi alla normativa, puliti e lubrificati, sono stati impressi nello spessore, fino al raggiungimento del supporto, accompagnando il gesto con una leggera rotazione. La disposizione delle forme è stata tale da garantire uno spazio di almeno 5 cm tra gli anelli e tra questi ed il bordo libero (Figura 99). Dopo un tempo sufficiente a far acquisire solidità al sistema, gli elementi metallici sono stati delicatamente rimossi imprimendo ancora un leggero effetto rotatorio. I campioni sono quindi stati condizionati nel seguente modo:

- 7 giorni a temperatura di $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $95\pm 5\%$
- 21 giorni a temperatura di $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $65\pm 5\%$



Figura 99. Prova di aderenza al supporto: preparazione campioni su laterizio e su calcestruzzo. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

Decorsi i 28 giorni si è proceduto all'incollaggio, tramite resina epossidica bicomponente, di piastrine metalliche sullo spessore di malta - in corrispondenza delle superfici a sezione circolare ottenute tramite gli anelli - e all'esecuzione della prova di aderenza (Figura 100).



Figura 100. Prova di aderenza al supporto: incollaggio delle piastrine metalliche. Da sinistra: supporto in AAC, supporto in laterizio. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

La forza di trazione è stata applicata con apposita macchina (Figura 101), gradualmente e perpendicolarmente all'area tramite le piastrine adese, con un incremento di carico tale che la tensione aumentasse con velocità massima di $0,100 \text{ N/mm}^2\text{s}$ ed il distacco si avesse in un tempo massimo di 60 s. La prova si è considerata interrotta quando all'aumento del carico non è corrisposto ulteriore aumento della forza resistente letta dal *display* della macchina. Il dato finale, la forza

di distacco, è stato poi diviso per la superficie circolare dei provini (quattro per ogni supporto, per ogni miscela) così da ricavare l'aderenza (Eq.37)

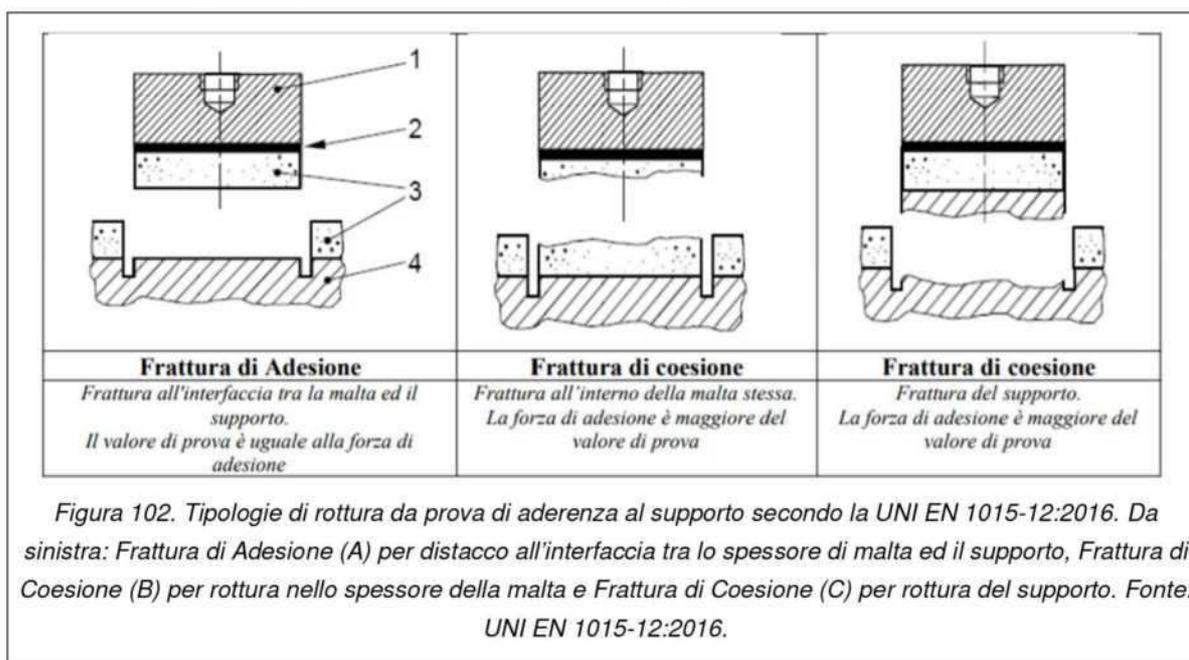
$$\sigma_D = \frac{F_D}{A} \quad (\text{Eq.37})$$

con:

- σ_D , aderenza (N/mm²)
- F_D , forza di distacco (N)
- A , area della sezione circolare del provino ($\pi \times 50^2$ mm²)



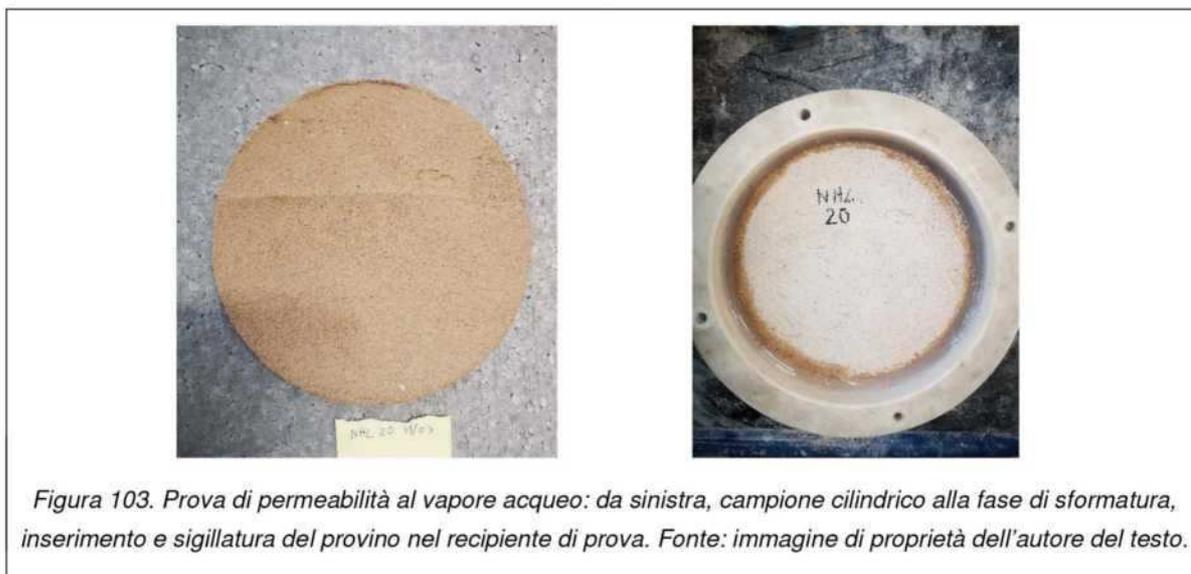
La rottura è stata infine qualificata secondo la legenda riportata nella norma UNI EN 1015-12:2016 distinguendo *Frattura di Adesione (A)*, nel caso di distacco all'interfaccia tra lo spessore di malta ed il supporto, *Frattura di Coesione (B)*, nel caso di rottura nello spessore della malta e *Frattura di Coesione (C)*, nel caso di rottura nel supporto, come schematizzato in Figura 102.



Per l'esecuzione della prova di permeabilità al vapore acqueo, invece, l'impasto è stato steso, avendo cura di livellarlo per ottenere una superficie liscia ed omogenea, in due strati con uno spessore complessivo di circa 1 cm, per ogni miscela, su un supporto poroso in Calcestruzzo Aerato Autoclavato. Due strati di garza di cotone sono stati apposti sul substrato prima di applicarvi la malta. Uno stampo circolare ad anello di diametro leggermente più largo di quello dei contenitori di prova (circa 16 cm) è stato impresso nello spessore di malta al fine di ricavare tre provini cilindrici per ogni miscela. Dopo un tempo sufficiente a far acquisire solidità al sistema, l'anello è stato rimosso, i campioni sformati e condizionati nel seguente modo:

- 7 giorni a temperatura di $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $95\pm 5\%$
- 21 giorni a temperatura di $20\pm 3^{\circ}\text{C}$ e umidità relativa di $65\pm 5\%$

Conclusasi la fase di stagionatura, i campioni circolari sono stati alloggiati nei contenitori di prova sigillando con cura il bordo mediante un prodotto siliconico (Figura 103).



Nella camera inferiore del recipiente è stata quindi aggiunta una soluzione satura di nitrato di potassio (KNO_3) per realizzare la prova in condizione di elevata umidità relativa. Tra il campione e la superficie della soluzione è stata lasciata una piccola intercapedine di aria di 10 ± 5 mm e si è proceduto alla chiusura del sistema (Figura 104) riportandone la massa iniziale. I provini sono stati riposti in camera climatica - secondo le condizioni definite dalla norma - e pesati giornalmente sino ad ottenere una massa costante, condizione raggiunta in caso di variazioni inferiori allo 0,1% di tre pesate successive. Dichiarata conclusa la prova, si è proceduto al calcolo del fattore di resistenza al vapore acqueo (μ) secondo le Eq.38-40:

$$\mu = \frac{1,94 \cdot 10^{-10}}{\pi} \quad (\text{Eq.38})$$

$$\pi = \Pi s \quad (\text{Eq.39})$$

$$\Pi = \frac{1}{\frac{\Delta p \cdot A}{\Delta G} - R_a} \quad (\text{Eq.40})$$

con:

- μ , fattore di resistenza al vapore acqueo
- π , permeabilità al vapore acqueo (kg/(s×Pa×m))
- s , spessore del provino (m)
- Π , permeanza al vapore acqueo (kg/(s×Pa×m²))
- $\frac{\Delta G}{\Delta t}$, flusso di vapore acqueo (kg/s)
- A , area di apertura del recipiente di prova (m²)
- R_a , resistenza alla diffusione del vapore acqueo dell'intercapedine d'aria tra il campione e la soluzione salina (0,048×10⁹ Pa×m²× s)/kg per intercapedine di aria di 10 mm
- Δp , differenza di tensione di vapore dell'acqua tra l'aria dell'ambiente e la soluzione salina, tabellata in funzione delle condizioni di umidità dell'ambiente



Figura 104. Prova di permeabilità al vapore acqueo: da sinistra, inserimento della soluzione nella camera inferiore, chiusura del sistema, pesatura del sistema. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

GRUPPO "MUR". Per le miscele del gruppo MUR, formulate con cemento, sono stati confezionati 3 provini prismatici 40x40x160mm (Figura 105) conformi alla norma UNI EN 1015-11:2019. Al momento della preparazione sono state misurate la massa volumica della polvere e la massa volumica apparente della malta fresca

secondo le indicazioni della UNI EN 1015-3:2007. I tre provini sono stati quindi siglati - in aggiunta all'indicazione relativa al legante e alla percentuale di aggregato riciclato - con le lettere "A, B, C". Le miscele sono state compattate e stagionate seguendo il prospetto 1 della norma UNI EN 1015-11:2019. È stata monitorata la massa dei provini a 3, 7, 14, 21 e 28 giorni dal confezionamento. Conclusasi la fase di maturazione di 28 giorni sono state eseguite le seguenti prove di caratterizzazione fisica, chimica e meccanica su malta indurita:

- misurazione della massa volumica apparente, secondo le modalità descritte nel sottoparagrafo 5.2)2
- misurazione indiretta del modulo elastico dinamico con metodo agli ultrasuoni, come sarà nell'immediato seguito spiegato
- prova a rottura per flessione a tre punti e compressione uniassiale, secondo le modalità descritte nel sottoparagrafo 5.2)2
- analisi termogravimetrica, secondo le modalità descritte nel sottoparagrafo 5.2)2, sulle miscele C0, C10 e C25, scelte per approfondire ulteriormente gli aspetti inerenti al gesso dell'AAC e la sua eventuale solubilità



Il metodo agli ultrasuoni è stato impiegato per misurare mediante una prova non distruttiva il modulo elastico dei provini di malta, tenendo conto della relazione intercorrente tra la velocità di propagazione delle onde longitudinali in un mezzo e le sue caratteristiche elastiche. La prova, normata nella UNI EN 12504-4:2021, restituisce anche informazioni qualitative atteso che la presenza di discontinuità, difetti, disomogeneità modificano la risposta del materiale. Due sonde, una trasmettente ed una ricevente, sono state collocate alle basi del provino prismatico (prova in regime di trasmissione diretta) e tramite apposita apparecchiatura sono stati

inviati gli impulsi ultrasonici (Figura 106). Come mezzo di accoppiamento è stata adoperata della vaselina. Letto il tempo di volo dell'onda - ossia l'intervallo necessario alla ricezione dell'impulso nella sonda ricevente - si è calcolata la velocità, considerata la distanza tra le sonde pari all'altezza del provino. Il modulo elastico, infine, è stato computato, per ogni provino di ogni miscela, mediante l'Eq.41:

$$E = \frac{v^2 \rho (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad (\text{Eq.41})$$

con:

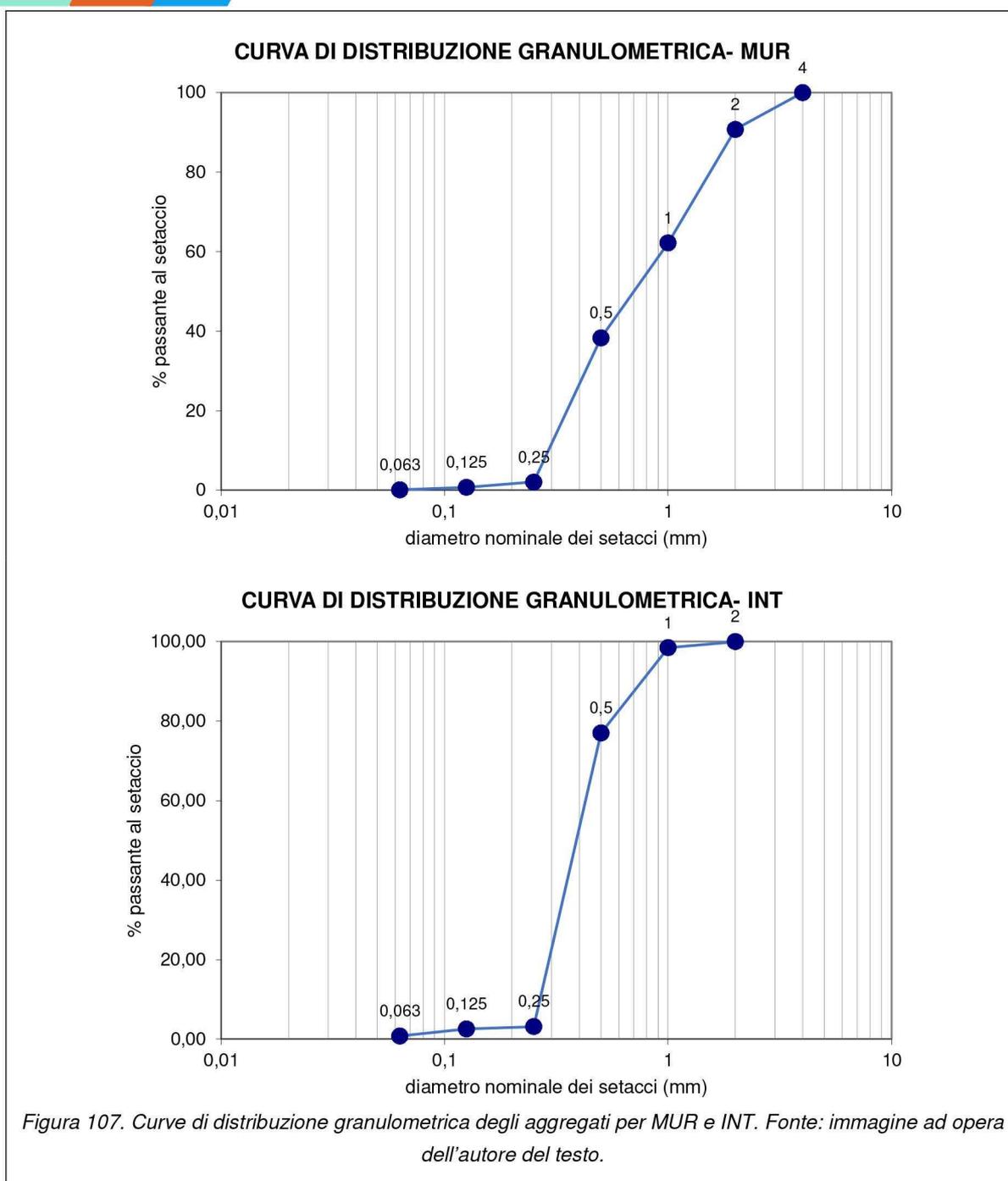
- ν , coefficiente di Poisson
- ρ , densità del mezzo (kg/m^3)
- v , velocità di propagazione dell'onda (m/s)
- E , modulo elastico (MPa)



RISULTATI

DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DEGLI AGGREGATI. Le curve di distribuzione granulometrica ottenute per gli aggregati riciclato e naturale (sovrapposte) sono mostrate in Figura 107, distinte per categoria di malta (MUR e INT).

La massa volumica in mucchio degli aggregati sciolti ottenuta è stata, per MUR, di 1750 kg/m^3 per la sabbia silicea e di 680 kg/m^3 per l'aggregato riciclato mentre per INT di 1610 kg/m^3 per la prima e di 611 kg/m^3 per il secondo.



CARATTERIZZAZIONE DELLE MALTE.

GRUPPO "INT". La Figura 108 riporta la massa volumica delle polveri e la massa volumica apparente allo stato fresco della malta, misurate al momento del confezionamento dei provini prismatici. In fase di preparazione dei provini sono stati apportati aggiustamenti della quantità di acqua di impasto rispetto al valore definito in sede di progettazione della miscela, resisi necessari perché la consistenza fosse lavorabile. I valori in massa di acqua (sul totale delle polveri) sono stati modificati per NHL0, dall'11% al 17%, per NHL10 dal 17% al 22% e per NHL20, dal 22% al 27%.

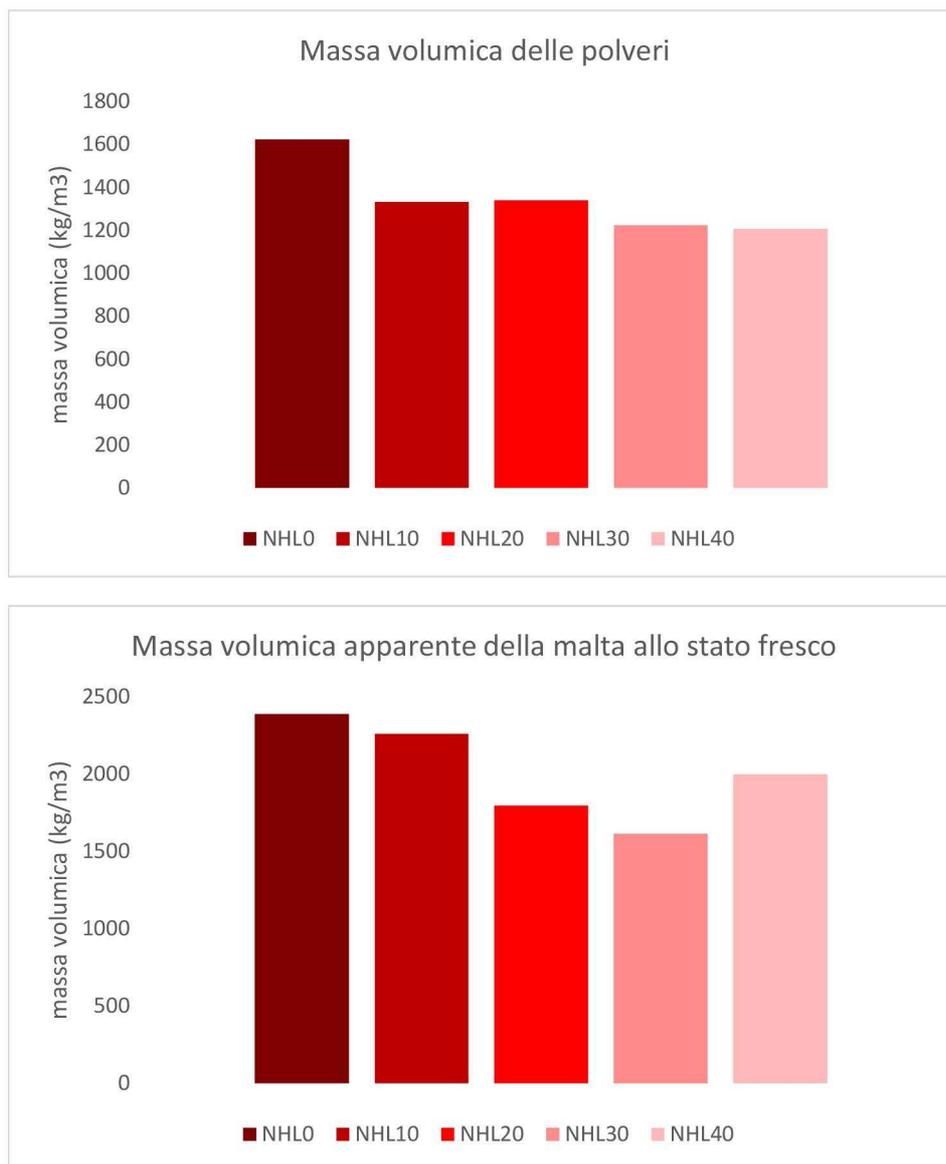


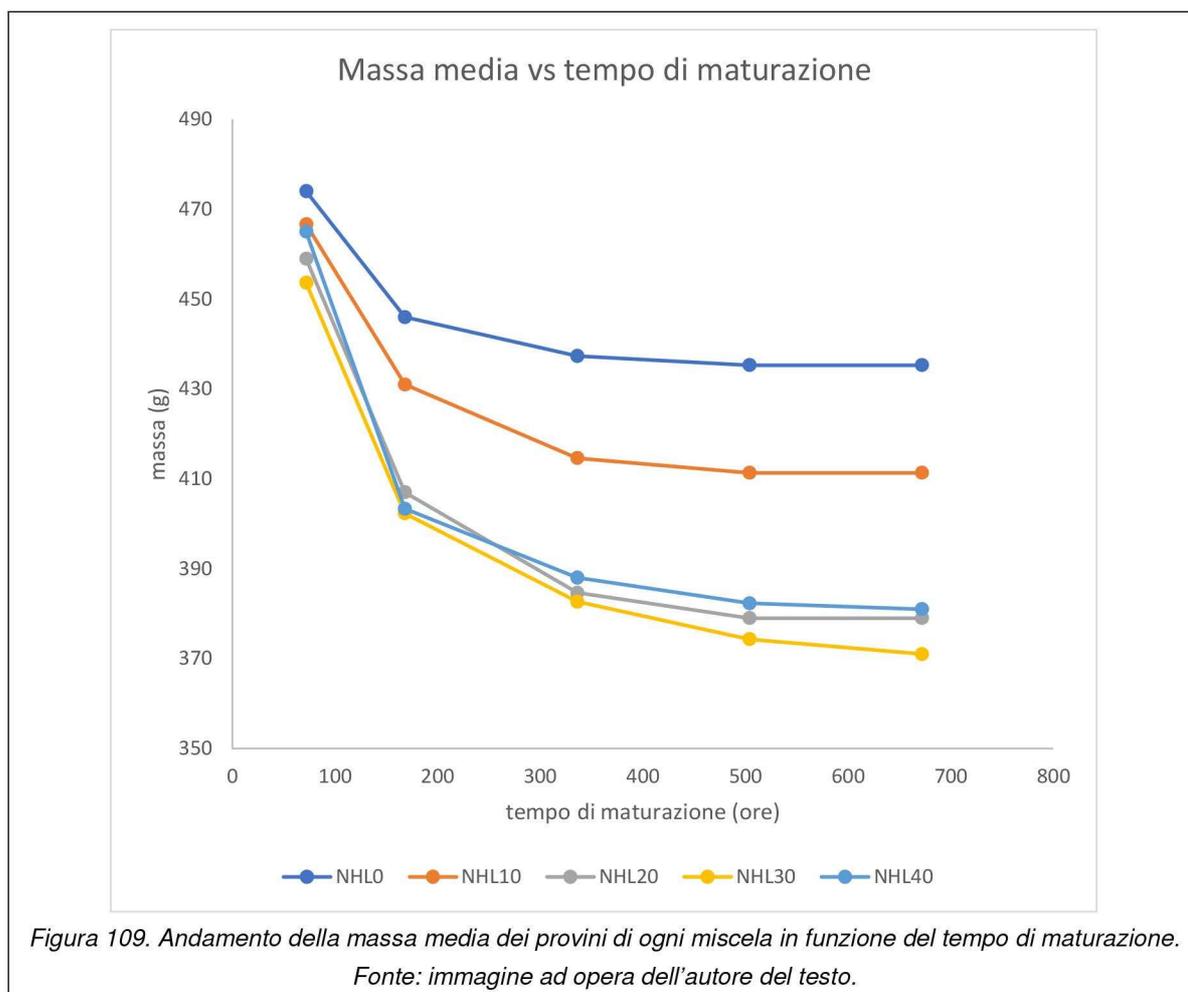
Figura 108. Prove allo stato fresco: massa volumica delle polveri e massa volumica apparente della malta.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Le variazioni dell'acqua di impasto sono servite per rendere le consistenze degli impasti di NHL0, NHL10 e NHL20 idonee alla lavorabilità, con i valori finali riportati in Tabella 18, condizione non presente prima della rimodulazione del contenuto idrico.

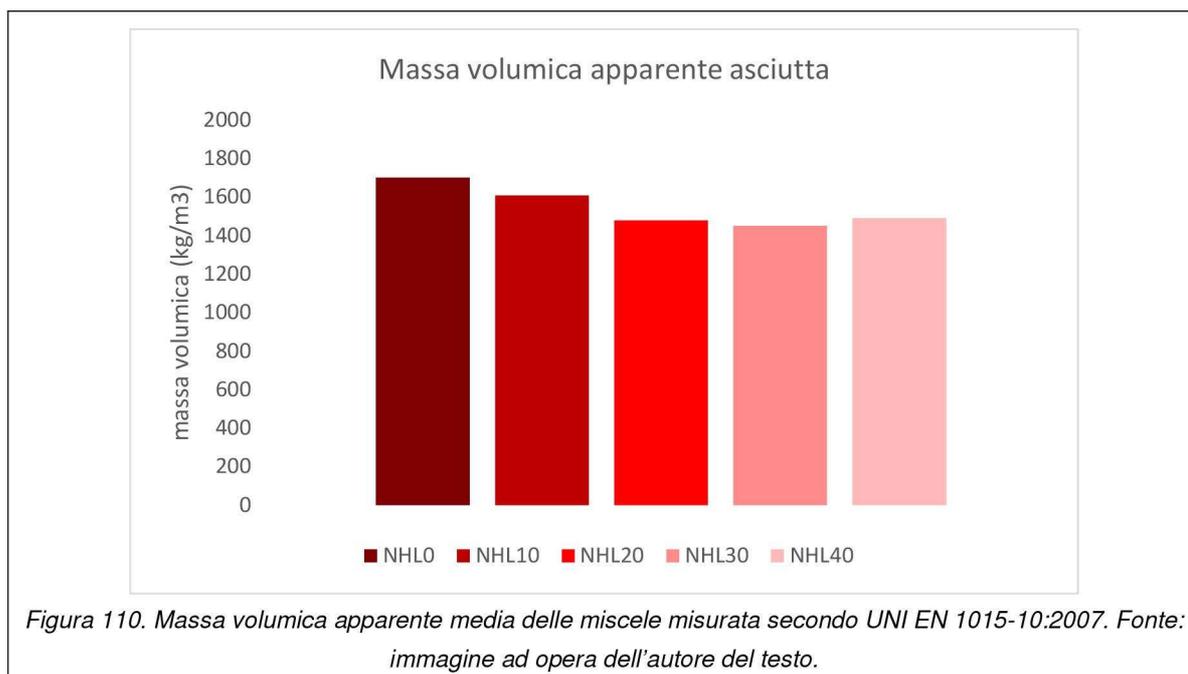
Tabella 18. Consistenze delle miscele misurate con metodo della tavola a scosse.

Sigla	Consistenza (mm)
NHL0	165
NHL10	152
NHL20	160
NHL30	147
NHL40	165

Il monitoraggio nel tempo della massa dei provini ha restituito gli andamenti mostrati nella Figura 109. La perdita di massa più consistente si è verificata per tutte le miscele nel primo intervallo temporale (tra i tre e i sette giorni dal confezionamento) come evidenziato dalla pendenza della retta congiungente i due valori della massa. In questo dominio, infatti, la riduzione è stata del 6%, 8%, 11%, 11% e 13%, rispettivamente per NHL0, NHL10, NHL20, NHL30 e NHL40. Tuttavia, nelle miscele con una maggiore percentuale di aggregato (NHL20, NHL30 e NHL40) l'oscillazione nel suddetto tratto è stata maggiore ed in generale i grafici sono risultati quasi sovrapposti. Un'anomalia è riscontrabile nell'andamento relativo alla miscela NHL30 che ha esibito una riduzione della massa superiore a quella NHL40, pur contenendo una percentuale di aggregato riciclato inferiore. La variazione percentuale complessiva della massa nel periodo è stata dell'8% per NHL0, del 12% per NHL10 e del 18% per le restanti tre formulazioni. La riduzione a 28 giorni rispetto alla miscela di riferimento, invece, è stata del 6%, 13%, 15% e 12%, per NHL10, NHL20, NHL30 e NHL40.



I valori medi della massa volumica apparente, per ciascuna delle miscele, sono riportati nel grafico a colonne raggruppate della Figura 110. L'aumento del dosaggio di aggregato riciclato ha comportato una riduzione della massa volumica - nel passaggio dalla miscela NHL0 a quella NHL40 del 12%. Un valore simile è stato ottenuto per le formulazioni NHL20 (-13%) e NHL30 (-15%) mentre per NHL10 la variazione è stata più contenuta (-6%). Per nessuna delle miscele la massa volumica apparente è risultata inferiore alla soglia di 1300 kg/m³ che la norma UNI EN 998-1:1016 adopera per la qualificazione di malte alleggerite (LW).



Anche per queste miscele la massa volumica apparente è stata diagrammata in funzione delle masse di aggregato riciclato per metro cubo di miscela ottenendo il grafico riportato nella Figura 111. Si osserva il disallineamento del valore della miscela NHL40 rispetto al *trend* delle restanti. La linea di tendenza, lineare, ha esibito un coefficiente di correlazione di 0,88.

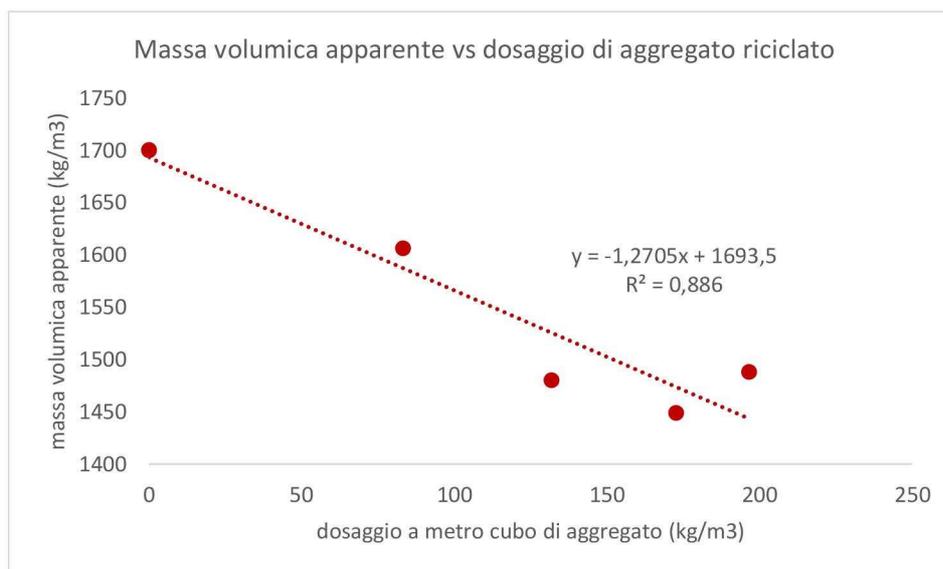


Figura 111. Massa volumica apparente media delle miscele in funzione del dosaggio per metro cubo di aggregato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

I risultati della prova a rottura per flessione a tre punti e per compressione uniassiale sono distinti per miscela e provino (A, B, C) e riportati in diagrammi a colonne raggruppate mostrati nelle Figura 112 e Figura 113.

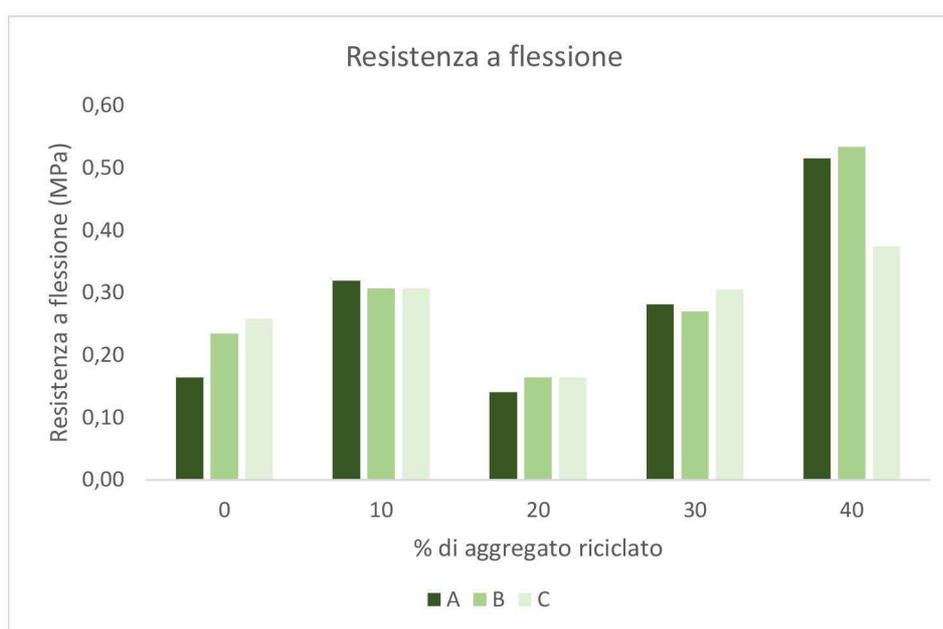


Figura 112. Prove di resistenza a flessione delle malte INT: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

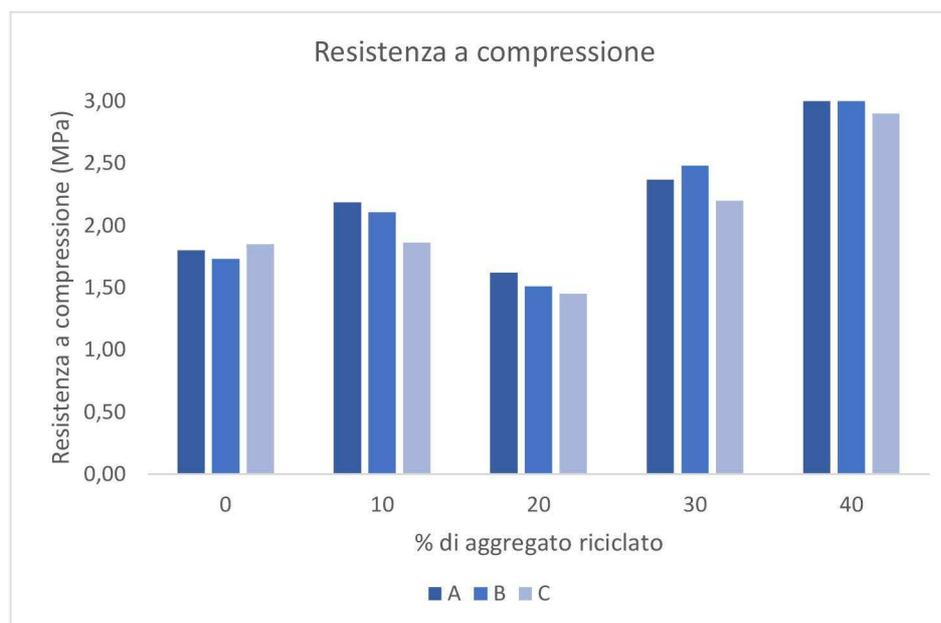


Figura 113. Prove di resistenza a compressione delle malte INT: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Per questo gruppo di malte le resistenze meccaniche hanno esibito un andamento simmetrico rispetto a quanto verificatosi nei confezionamenti precedenti. L'aumento della massa di aggregato riciclato, infatti, ha comportato un aumento delle resistenze a flessione e compressione, salvo per le miscele NHL20 e NHL30 per le quali si confermano le anomalie già segnalate in proposito delle altre grandezze misurate. In particolare, nel passaggio dalla miscela "0" a quella "40" la resistenza a compressione è aumentata del 74% e quella a flessione del 118%. La relazione analitica tra le prestazioni meccaniche ed il dosaggio di aggregato riciclato per metro cubo di miscela, tuttavia, non ha esibito una buona correlazione, come mostrato in Figura 114.

Per quanto attiene all'assorbimento d'acqua per capillarità, il coefficiente è aumentato nel passaggio dalla miscela "0" a quella "40" di circa il 17%. L'andamento non è stato però regolare nel dominio complessivo, come riportato in Figura 115: il coefficiente della miscela NHL30 è risultato inferiore anche a quella di riferimento. Si riportano nelle Figura 116 alcune istantanee delle prove eseguite.

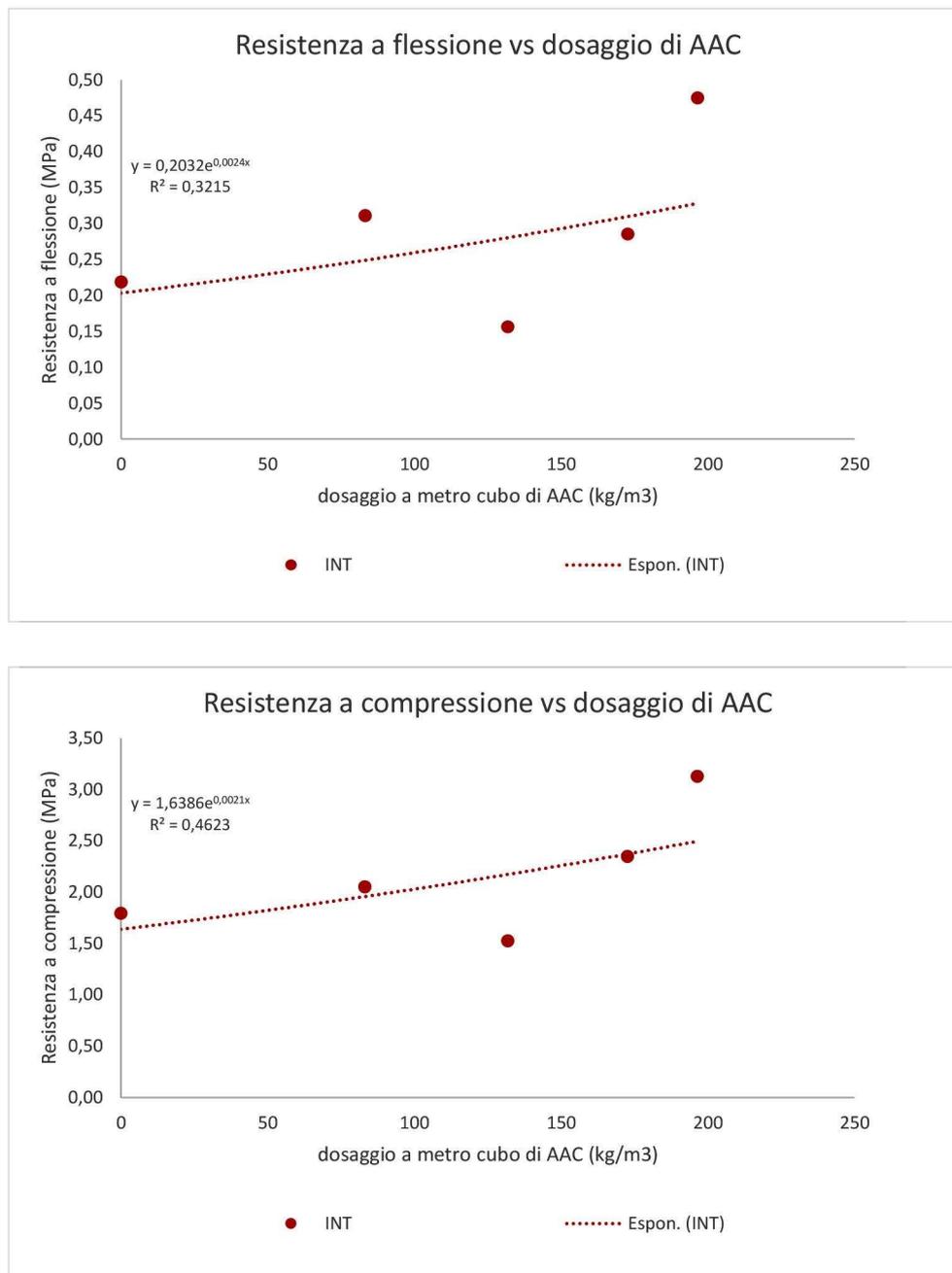


Figura 114. Prove di resistenza a flessione e compressione: resistenze medie in funzione della massa di AAC per metro cubo di malta. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

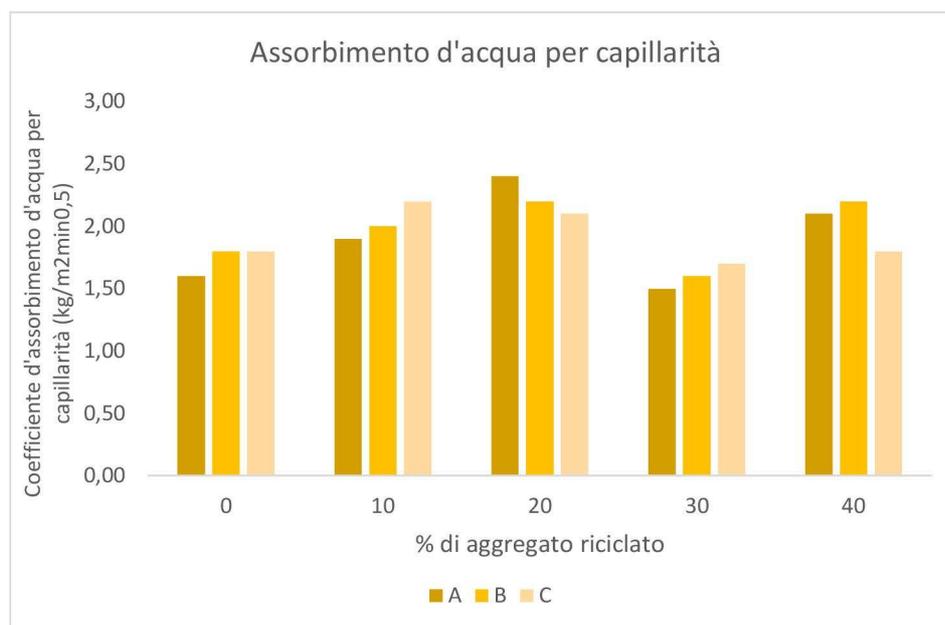


Figura 115. Prova di assorbimento di acqua per capillarità delle malte INT: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.



Figura 116. Prova di assorbimento di acqua per capillarità delle malte INT: inserimento dei provini nel volume d'acqua con le facce spezzate immerse. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

La preparazione dei campioni per la prova di aderenza al supporto delle malte ha incontrato una serie di problematiche operative che in taluni casi ne hanno comportato l'impossibilità di esecuzione oltre a richiedere una rimodulazione della campagna di confezionamenti prospettata. Si procede, quindi, a dettagliare le fasi di preparazione dei campioni per gruppo di miscele, precisando quelle per le quali le difficoltà operative non hanno consentito la lettura della forza di aderenza. Si introduce la seguente notazione, adoperata per i grafici:

- LAT, supporto in laterizio
- CLS, supporto in calcestruzzo

- AAC, supporto in calcestruzzo aerato autoclavato
- “b”, supporto bagnato sotto getto di acqua corrente
- “i”, supporto immerso in acqua per 15’
- “r”, utilizzo di rete di armatura porta-intonaco
- 1,2,3,4,5, numero del provino

La tipologia di rottura verificatasi è sempre A, salvo diversa specificazione.

NHL10. La preparazione dei supporti in laterizio, calcestruzzo e Calcestruzzo Aerato Autoclavato è stata effettuata, secondo le indicazioni normative, vaporizzando dell’acqua sulla superficie del substrato e procedendo con la stesura della malta. In tale occasione si è osservato, tuttavia, in tutti e tre i casi un consistente ritiro dell’acqua di impasto che sul laterizio e sul Calcestruzzo Aerato Autoclavato ha determinato, al termine del periodo di stagionatura, l’insorgenza di fessurazioni e la quasi totale mancanza di adesione della malta al supporto. Sul calcestruzzo, meno poroso, la malta era comunque staccata dal substrato pur non essendo presenti fessure. Tali condizioni, osservabili macroscopicamente come mostrato nelle Figura 117, Figura 118 e Figura 119, non hanno consentito l’esecuzione della prova poiché i provini circolari erano completamente sconnessi dal supporto.



Figura 117. Preparazione dei campioni su laterizio della miscela NHL10 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

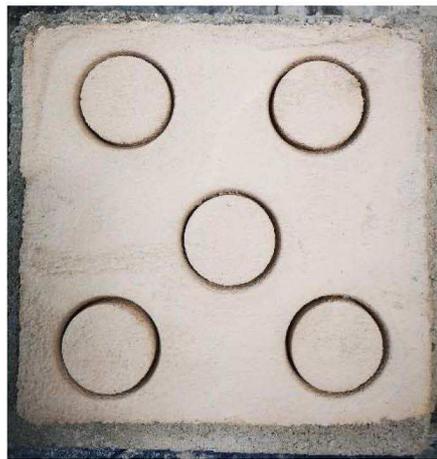


Figura 118. Preparazione dei campioni su calcestruzzo della miscela NHL10 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: vista dall'alto, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

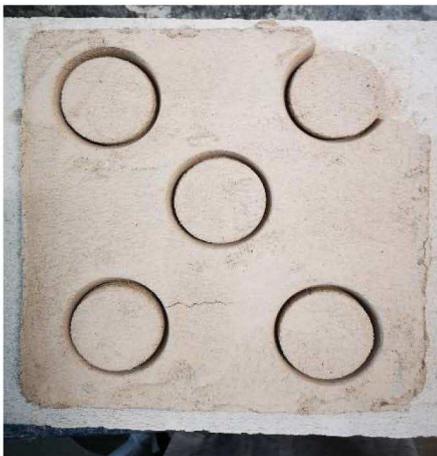


Figura 119. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato della miscela NHL10 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

NHL20. Sulla scorta di quanto verificatosi per la miscela NHL10 sui supporti in laterizio, calcestruzzo e Calcestruzzo Aerato Autoclavato, per la miscela NHL20 la preparazione dei due substrati più porosi è stata effettuata bagnando i blocchi in laterizio e Calcestruzzo Aerato Autoclavato sotto un getto di acqua corrente. Il fenomeno di ritiro e l'insorgenza delle fessurazioni si sono, però, comunque verificati sul supporto in AAC (Figura 120) per il quale, quindi, è stato preparato un secondo campione, procedendo ad un'immersione completa del blocco in acqua per 15' ed inserendo una rete di armatura porta-intonaco nello spessore della malta. La problematica, tuttavia, non è stata risolta poiché al termine della stagionatura il campione si presentava comunque fessurato, come mostrato nella Figura 121. I risultati della prova sono riportati nel grafico in Figura 122.

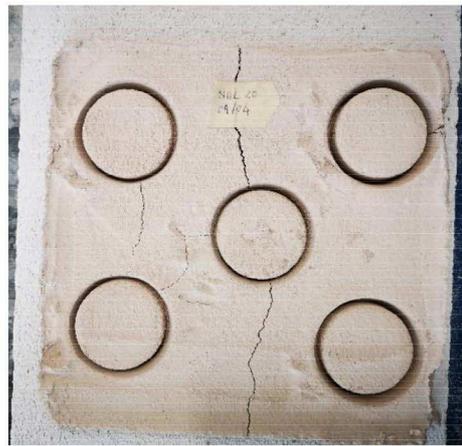


Figura 120. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato della miscela NHL20 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.



Figura 121. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato con rete porta-intonaco della miscela NHL20 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

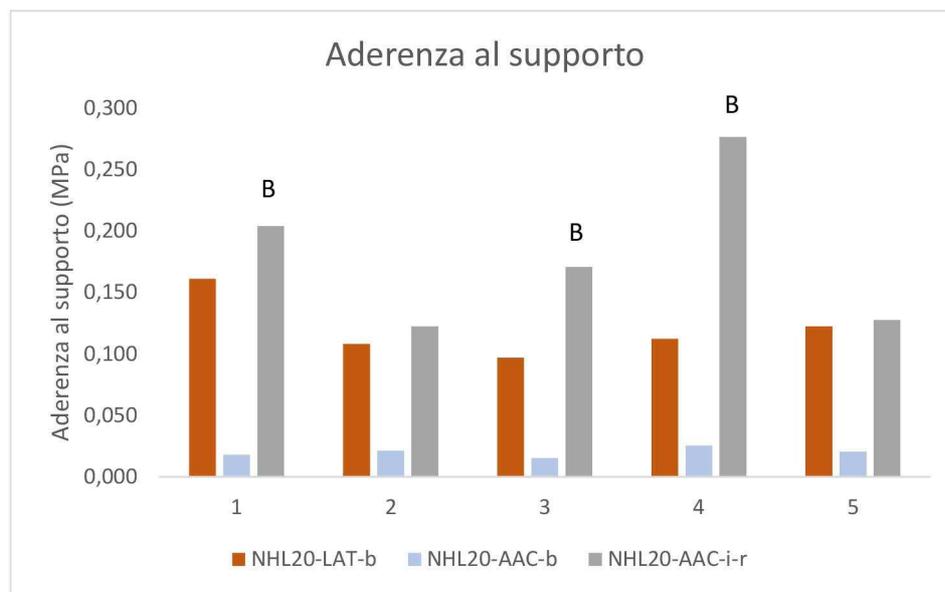


Figura 122. Aderenza al supporto, miscela NHL20, sono riportati i valori per ogni provino di ogni campione.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

NHL40. La stesura della miscela sul supporto in Calcestruzzo Aerato Autoclavato, previa immersione in acqua per 15' ed utilizzo della rete porta-intonaco - si è accompagnata ad un assorbimento istantaneo dell'acqua di impasto, mostrato in Figura 123, che ha qualificato il campione come inutilizzabile. Sul calcestruzzo, ancora, l'immersione e la rete non hanno risolto il problema delle fessurazioni - evidenti a 28 giorni (Figura 124) - ma è stato possibile eseguire la prova. Sul laterizio si è deciso di verificare l'effetto della sola immersione - senza ricorso alla rete - ed il risultato ottenuto è stato quello di un campione privo di fessurazioni visibili a occhio e discretamente adeso al supporto (Figura 125). I risultati della prova di aderenza al supporto sono riportati nel grafico in Figura 126.



Figura 123. Preparazione dei campioni su Calcestruzzo Aerato Autoclavato della miscela NHL40 per la prova di aderenza al supporto: fessure da ritiro al momento della stesura della malta. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

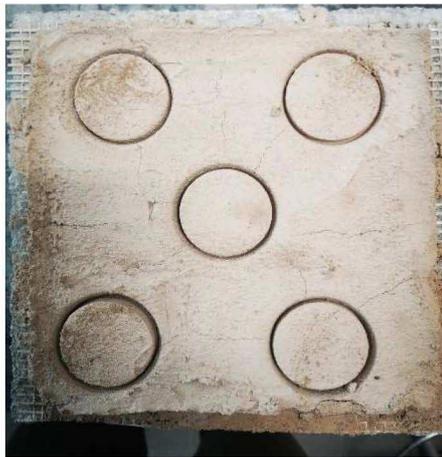


Figura 124. Preparazione dei campioni su calcestruzzo della miscela NHL40 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: fessure da ritiro, distacco. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

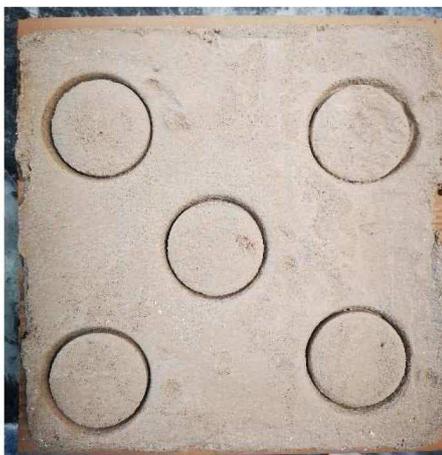


Figura 125. Preparazione dei campioni su laterizio della miscela NHL40 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: vista dall'alto, vista laterale. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

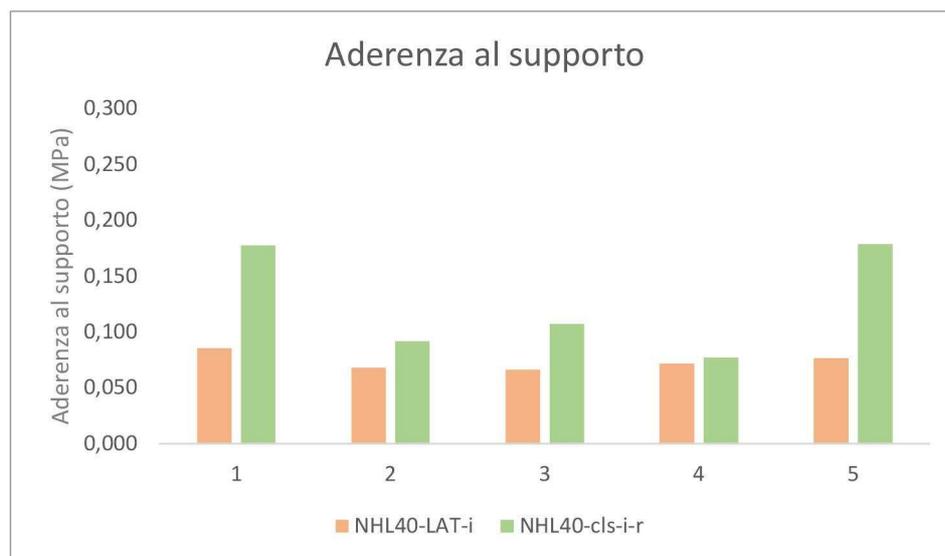


Figura 126. Aderenza al supporto, miscela NHL40, sono riportati i valori per ogni provino di ogni campione.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

NHL30. Sulla scorta di quanto verificatosi per le altre miscele, per NHL30 è parso utile procedere alla preparazione di un solo campione, specificamente su laterizio immerso in acqua. Anche in questo caso, al termine della stagionatura non erano visibili fessurazioni macroscopiche (Figura 127) e la prova, pertanto, è stata eseguita sortendo i risultati riportati nel grafico in Figura 128.

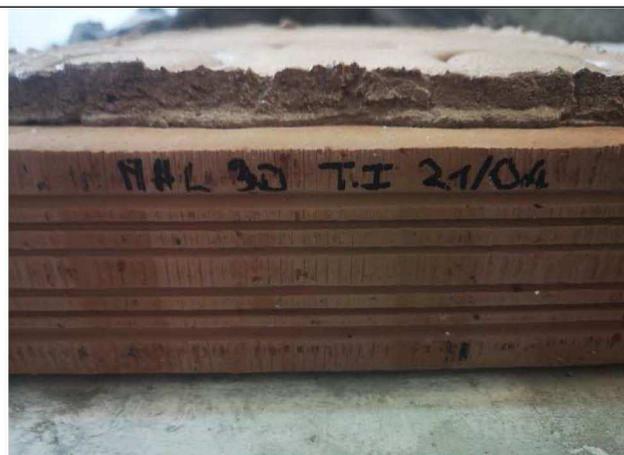
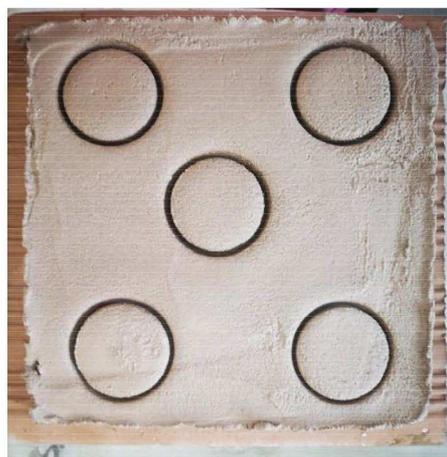


Figura 127. Preparazione dei campioni su laterizio della miscela NHL30 per la prova di aderenza al supporto, da sinistra: vista dall'alto, vista laterale. Fonte: immagine di proprietà dell'autore del testo.

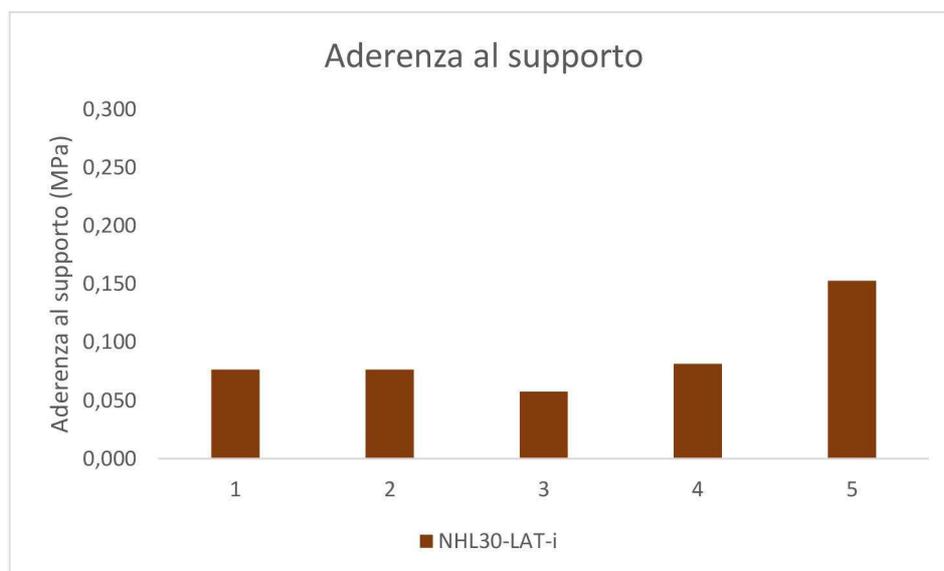


Figura 128. Aderenza al supporto, miscela NHL30, sono riportati i valori per ogni provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Come visibile dalla Figura 129, l'aumento della percentuale di aggregato riciclato ha comportato, a parità di supporto, una riduzione dell'aderenza, già bassa per la miscela NHL20 (0,12 MPa), del 25% e del 42% in NHL30 e NHL40, rispettivamente. La minore adesione è quella esibita, su supporto in Calcestruzzo Aerato Autoclavato solo bagnato e non immerso, dalla malta NHL20 (0,02 MPa) per la quale, su stesso supporto, l'immersione e l'adozione della rete hanno comportato un netto miglioramento della prestazione che si è attestata su 0,18 MPa. Per tutte le miscele si è osservata una ampia variabilità dei valori tra i provini di uno stesso campione ed in alcuni casi diversi meccanismi di rottura. Nel caso del campione NHL20-AAC-i-r, ad esempio, i tre valori più alti dell'aderenza erano associati alla rottura nello spessore della malta, a testimonianza di una maggiore adesione sul substrato.

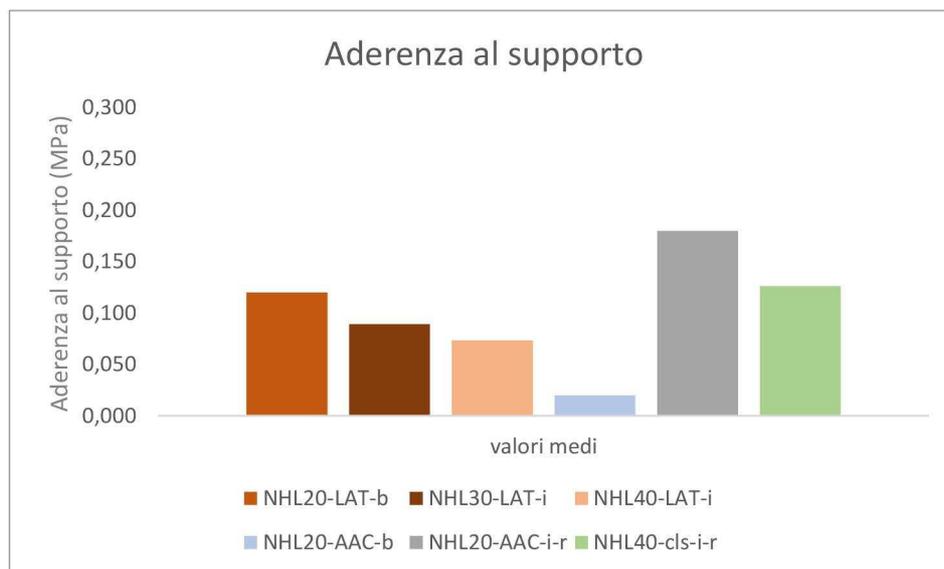


Figura 129. Aderenza al supporto, grafico riassuntivo, sono riportati i valori medi per ogni campione testato.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

In Figura 130 sono riportati i valori di fattore di resistenza al vapore acqueo ottenuti al termine della prova di permeabilità (UNI EN 1015-18:2004). La prova è giunta a conclusione in 20 giorni per le miscele NHL0 e NHL10 e in 16 giorni per le restanti. Il valore medio del flusso di vapore si è attestato - alla stazionarietà - a 1,42 g/giorno, 1,62 g/giorno, 1,90 g/giorno, 1,95 g/giorno e 2,02 g/giorno rispettivamente per NHL0, NHL10, NHL20, NHL30 e NHL40 per uno spessore medio del provino di 1,4 cm e condizioni ambientali di 20°C e 55%U.R. Tutti i fattori di resistenza al vapore sono risultati inferiori a 15, valore normativo che funge da spartiacque tra malte permeabili e non.

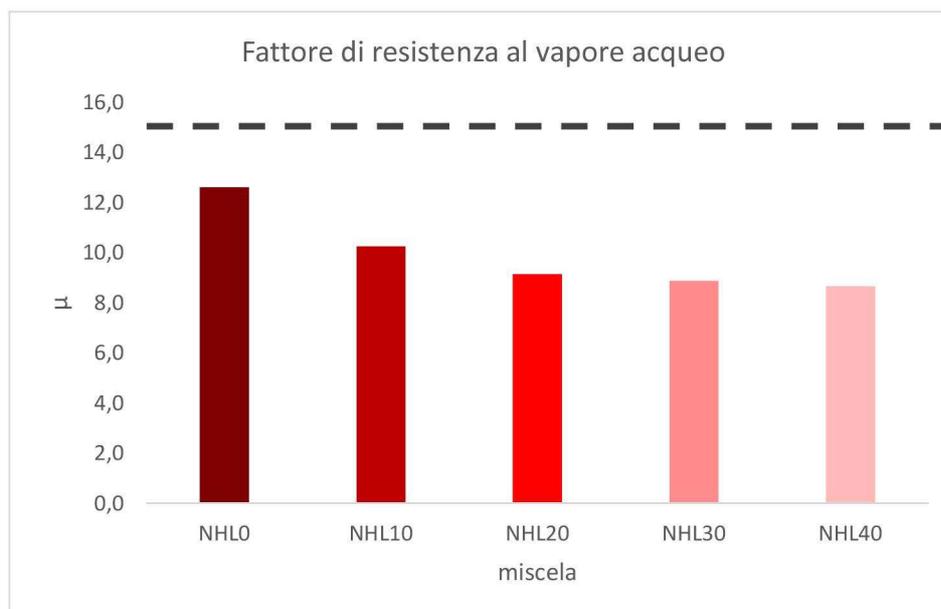


Figura 130. Prova di permeabilità al vapore acqueo, malte INT: valori distinti per miscela e mediati su 3 provini. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

GRUPPO “MUR”. La Figura 131 riporta la massa volumica delle polveri e la massa volumica apparente della malta allo stato fresco, misurate al momento del confezionamento dei provini prismatici. Entrambe le proprietà sono risultate inversamente proporzionali alla percentuale di aggregato riciclato. La variazione tra gli estremi del dominio - miscele C25, e C0 - è stata del 17% e del 14% per la massa volumica delle polveri e la massa volumica apparente della malta allo stato fresco, rispettivamente.

Il monitoraggio nel tempo della massa dei provini ha restituito gli andamenti mostrati nella Figura 132. Nel primo intervallo temporale (tra i tre e i sette giorni dal confezionamento) la riduzione è stata del 2%, 2%, 3%, 4% e 5%, rispettivamente per C0, C10, C15, C20 e C25. La perdita di massa complessiva per ogni miscela, invece, è stata del 3% per C0, del 5% per C10, del 7% per C15 e del 9% per le restanti due formulazioni. Infine, a 28 giorni, il *delta* percentuale della massa di ogni miscela rispetto a quella di riferimento è stata del 9%, 14%, 15% e 20%, per C10, C15, C20 e C25.

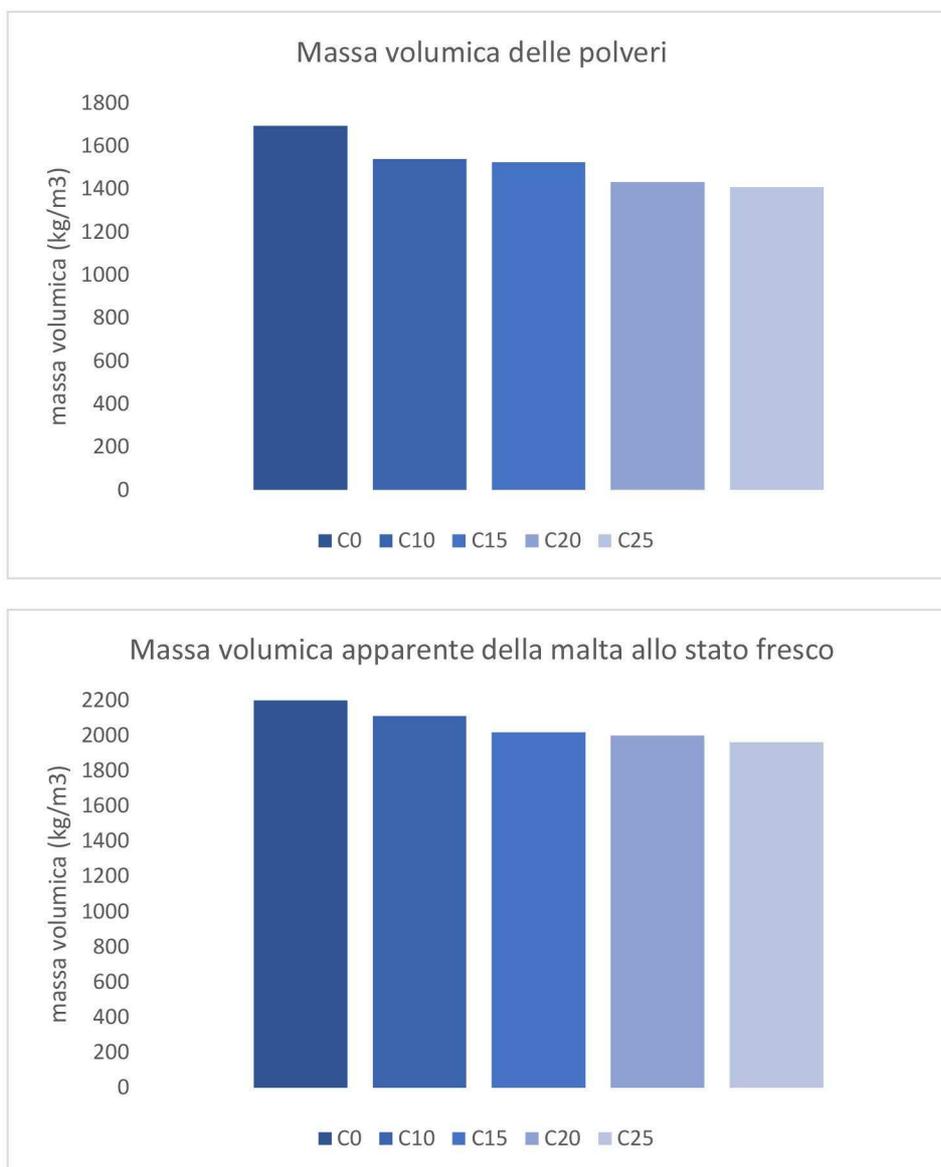


Figura 131. Prove allo stato fresco: massa volumica delle polveri e massa volumica apparente della malta.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

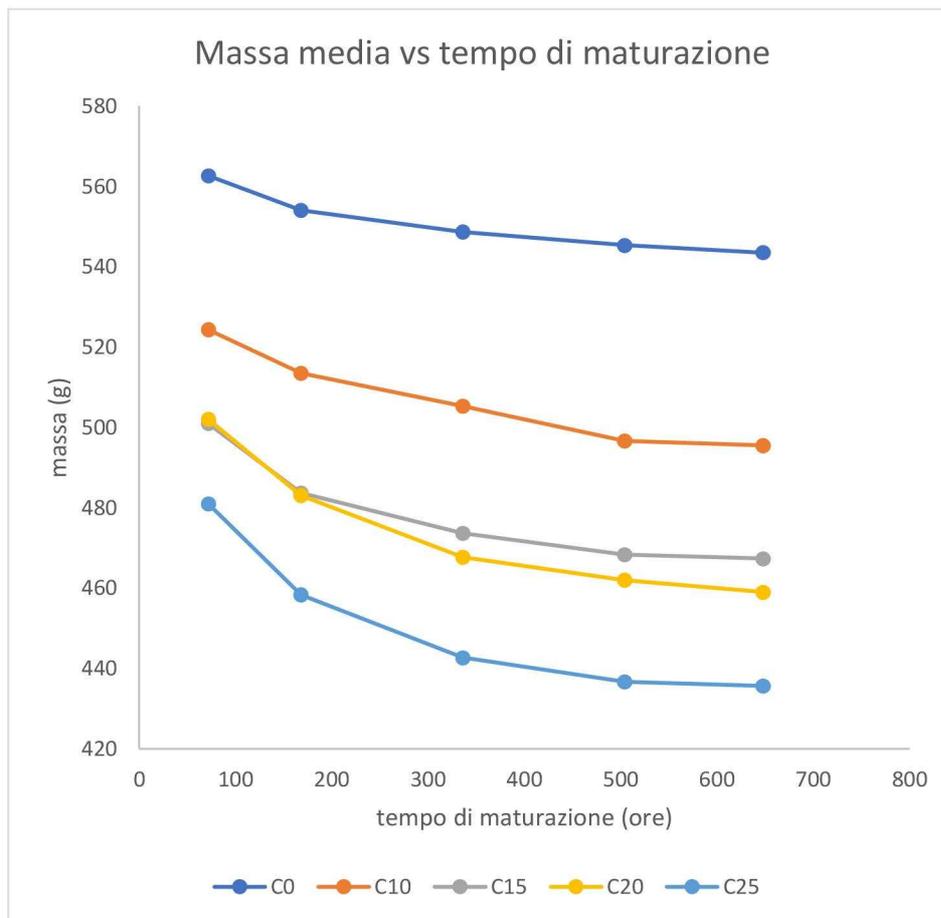


Figura 132. Andamento della massa media dei provini di ogni miscela in funzione del tempo di maturazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

I valori medi della massa volumica apparente asciutta, per ciascuna delle miscele, sono riportati nel grafico a colonne raggruppate della Figura 133. L'aumento del dosaggio di aggregato riciclato ha comportato una riduzione della proprietà, nel passaggio dalla miscela C0 a quella C25, del 20%.

Anche per queste formulazioni la massa volumica apparente è stata diagrammata in funzione delle masse di aggregato riciclato per metro cubo di miscela, ottenendo il grafico riportato nella Figura 134. Si è osservato un *trend* lineare con coefficiente di correlazione di 0,98.

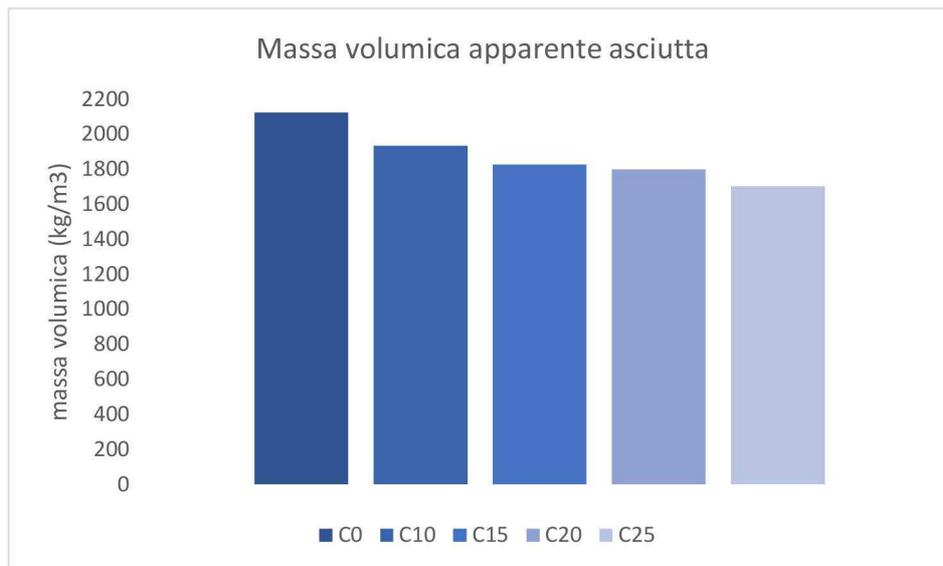


Figura 133. Massa volumica apparente media delle miscele misurata secondo UNI EN 1015-10:2007. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

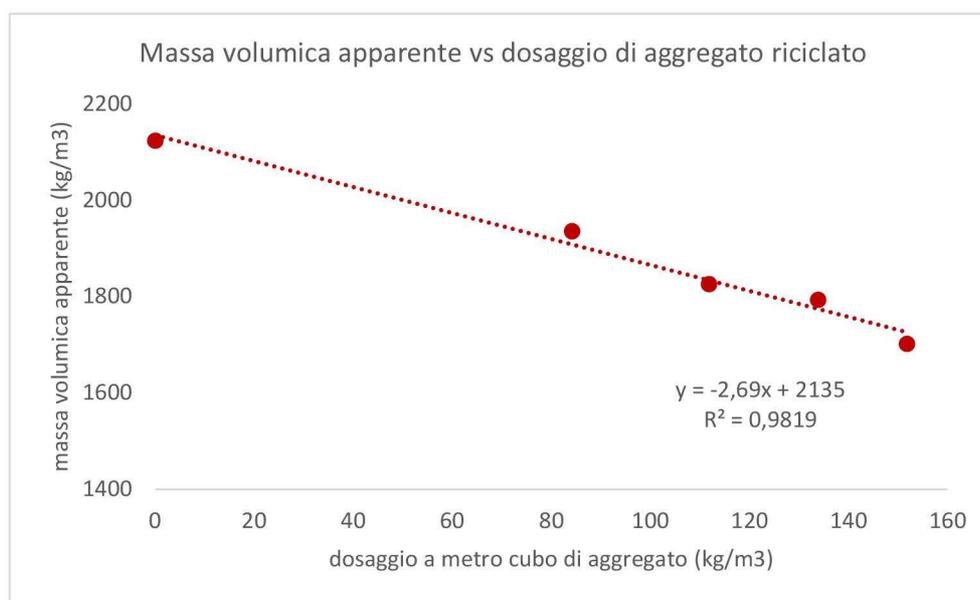


Figura 134. Massa volumica apparente media delle miscele in funzione del dosaggio per metro cubo di aggregato. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Il calcolo del modulo elastico dinamico mediante la prova ad ultrasuoni è stato effettuato considerando un coefficiente di Poisson di 0,30, valore indicato in letteratura per le malte. I risultati sono rappresentati in Figura 135 dove sono indicati i valori medi del modulo elastico e della velocità di trasmissione dell'onda, per ogni terna di provini.

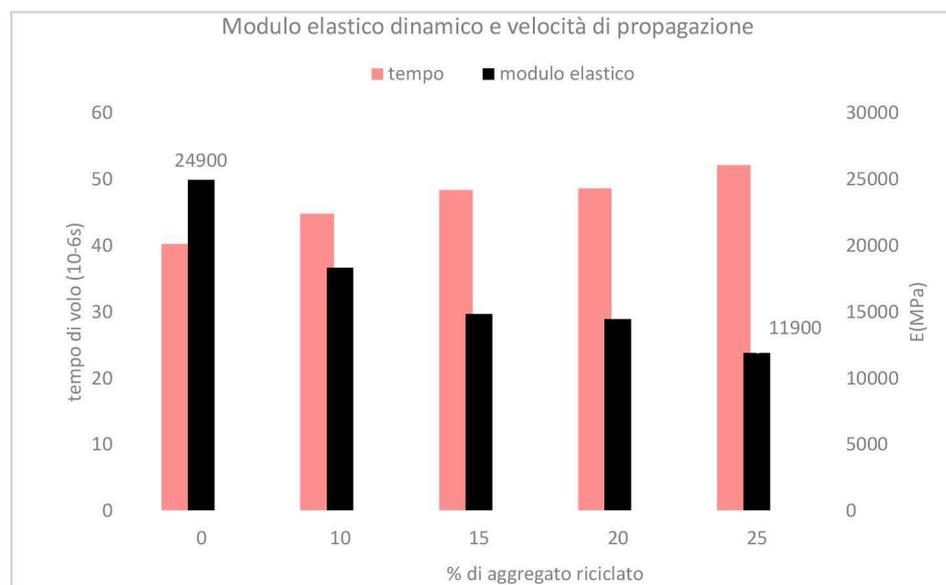


Figura 135. Modulo elastico indiretto mediante prova agli ultrasuoni, malte MUR: valori medi per miscela di modulo elastico e velocità di propagazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

I risultati della prova a rottura per flessione a tre punti e per compressione uniassiale sono distinti per miscela e provino (A, B, C) e riportati in diagrammi a colonne raggruppate mostrati nelle Figura 136 e Figura 137. Tra gli estremi del dominio di analisi - miscele C25 e C0 - all'aumento della massa di aggregato riciclato è corrisposta una riduzione delle resistenze a flessione e compressione medie rispettivamente del 43% e del 36%. Se per C10 le due prestazioni sono variate soltanto del 6% in media, rispetto a C0, il passaggio a C15 ha comportato un decadimento del 30% e del 27%, rispettivamente per flessione e compressione. La relazione analitica tra le prestazioni meccaniche ed il dosaggio di aggregato riciclato per metro cubo di miscela, mostrato in Figura 138.

Per entrambe le prestazioni meccaniche la linea di tendenza esponenziale, se riferita all'intero dominio di analisi, si è attestata ad una correlazione di circa 0,79. Dal calcolo della pendenza dei segmenti di retta congiungenti i singoli punti è emerso, come rappresentato in Figura 139, che nel primo tratto (C0-C10), sia per la flessione che per la compressione, ad un $\Delta_{AAC|0-10}$, ossia alla differenza di dosaggio di AAC tra le due miscele indicate in pedice, sono corrisposti $\Delta_{\sigma|0-10}$, ossia variazioni di resistenza meccanica, molto bassi agli altri tratti.

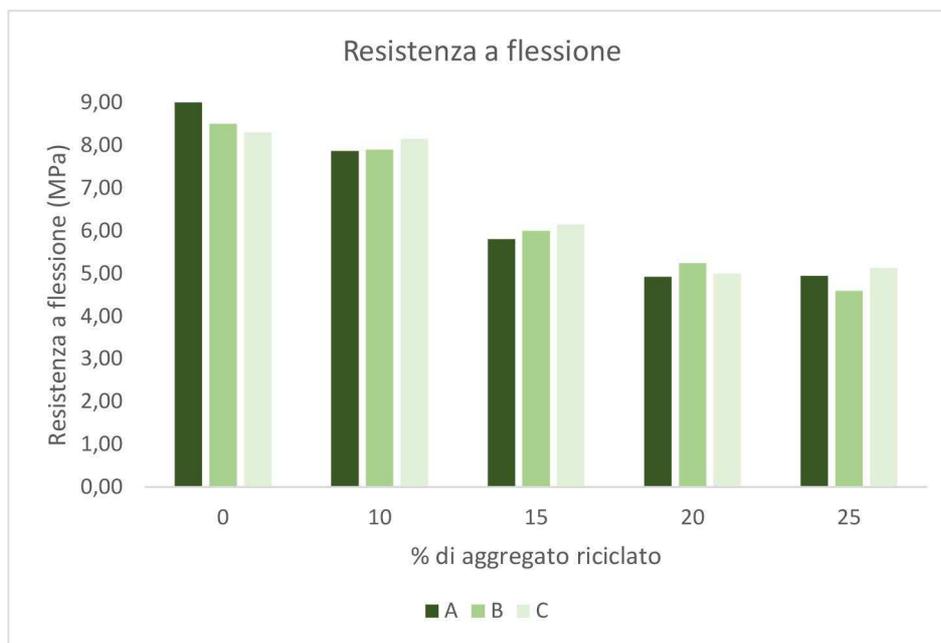


Figura 136. Prove di resistenza a flessione delle malte MUR: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

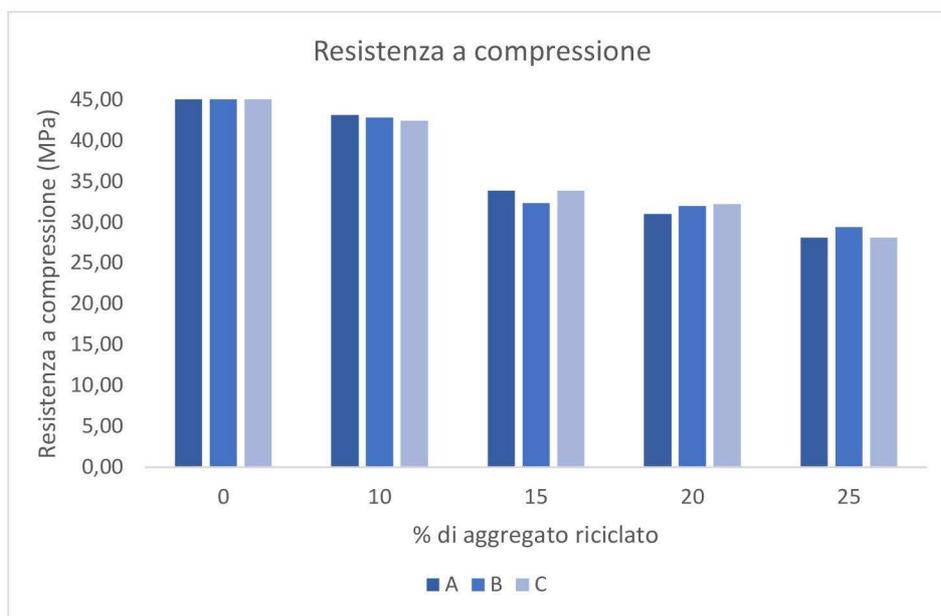


Figura 137. Prove di resistenza a compressione delle malte MUR: valori distinti per miscela e provino. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

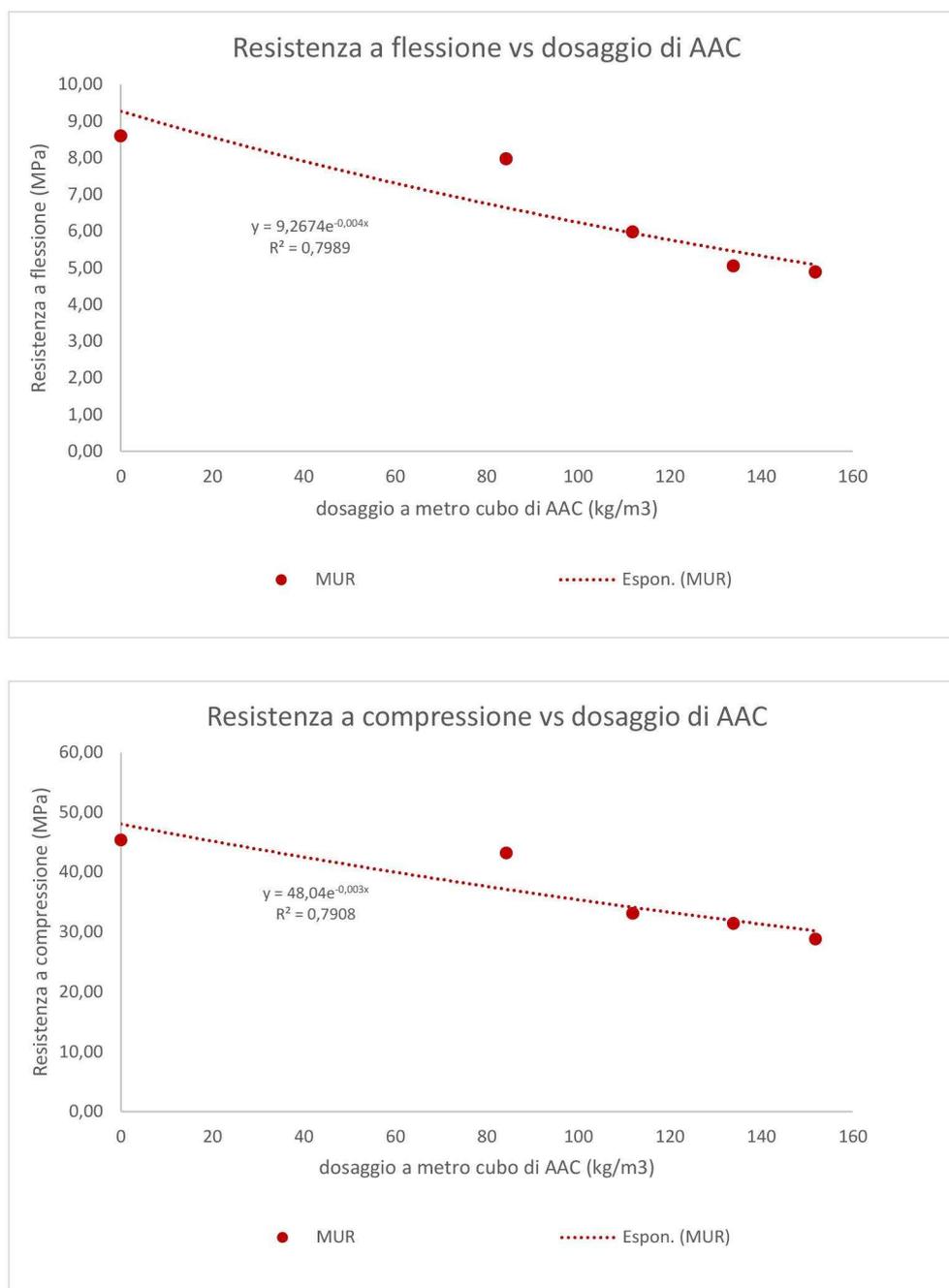


Figura 138. Prove di resistenza a flessione e compressione: grafico che diagramma le resistenze medie in funzione della massa di AAC per metro cubo di malta. In figura si riporta la linea di tendenza con relativi coefficiente di correlazione ed equazione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

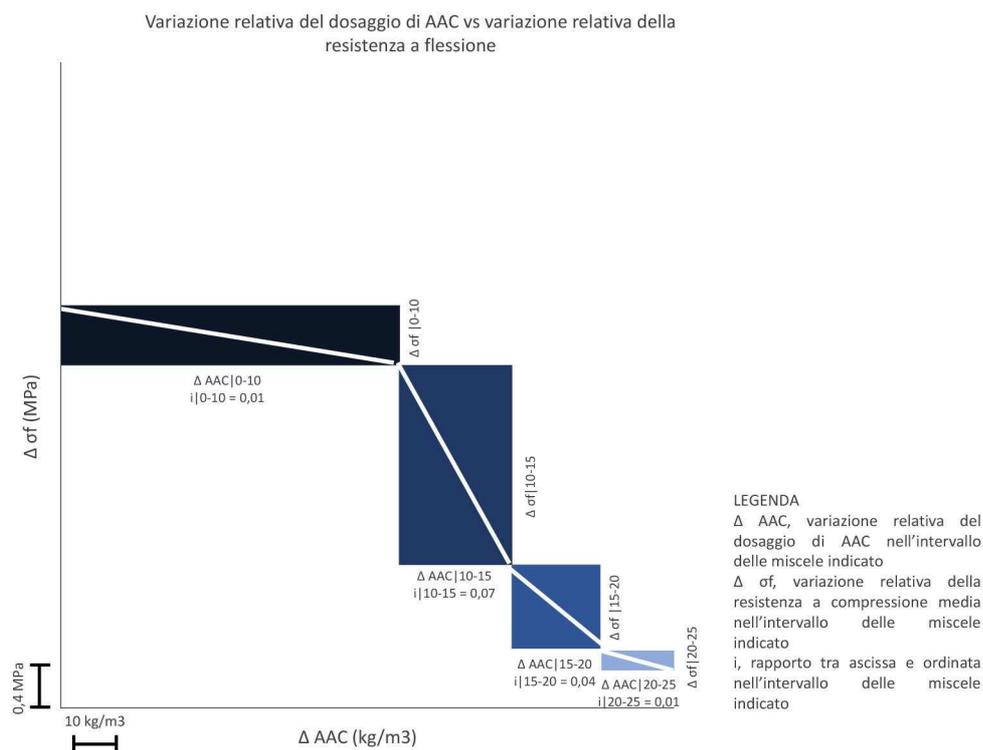
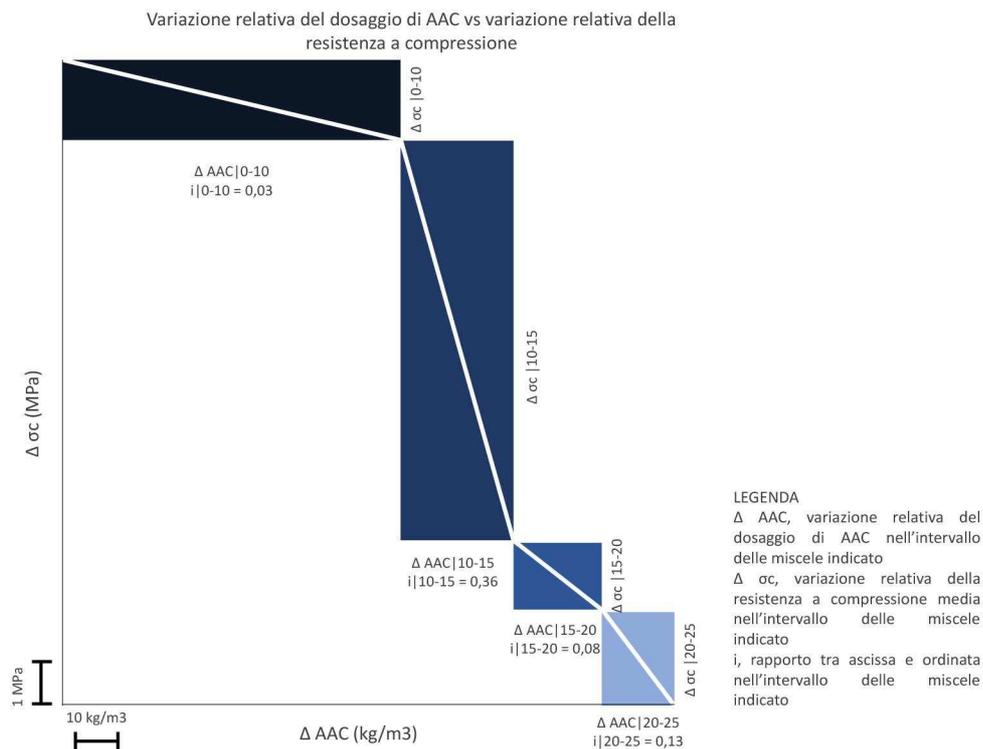


Figura 139. Prove di resistenza a flessione e compressione: grafico che diagramma per ogni intervallo di miscela le variazioni relative del dosaggio di AAC e le variazioni relative delle prestazioni meccaniche medie. Sono riportati i valori della pendenza per ogni tratto (rapporto tra le due variazioni). Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

I risultati dell'analisi Termogravimetrica (TGA) delle miscele C0, C10 e C25 sono mostrati in Figura 140, unitamente alla curva dell'aggregato riciclato. Il grafico riporta con linea continua le curve rappresentative della variazione percentuale della massa, in linea tratteggiata le derivate prime (*Derivative Thermogravimetry - DTG*). I picchi nella *DTG* delle miscele C10 e C25 corrispondenti alla decomposizione del gesso, attorno ai 130°C, sono debolmente visibili se confrontate con la curva dell'aggregato riciclato. Nel tratto centrale del grafico, invece, le *DTG* sono frastagliate e quasi sovrapposte, perché rappresentative della degradazione dei silicati idrati di calcio. Ulteriore picco in C0, C10 e C25 è visibile in prossimità dei 500°C (portlandite) e più accentuato nella miscela al 10% di aggregato riciclato. Infine, un ultimo salto è leggibile per temperature attorno agli 800°C - decomposizione del carbonato di calcio - in tutte e quattro le curve riportate.

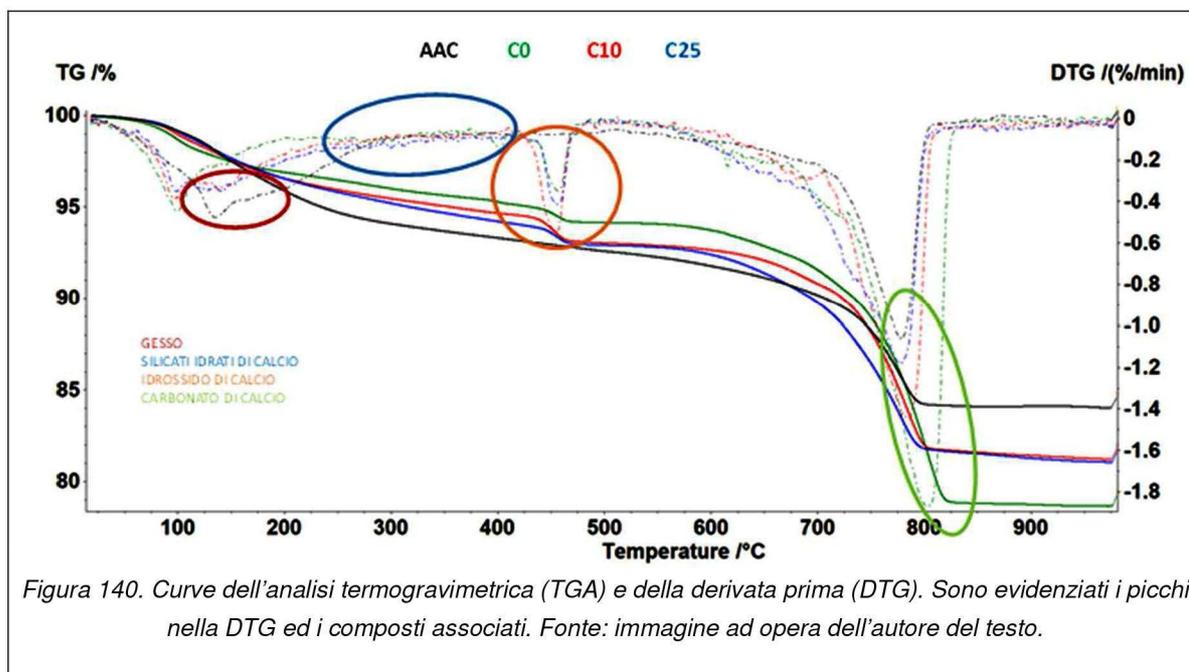


Figura 140. Curve dell'analisi termogravimetrica (TGA) e della derivata prima (DTG). Sono evidenziati i picchi nella DTG ed i composti associati. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

DISCUSSIONI

La fase conclusiva dell'attività sperimentale ha inteso verificare l'idoneità all'impiego delle malte in AAC nelle due categorie normative delle murature e degli intonaci, distinguendone la formulazione e la procedura di caratterizzazione. In particolare, sono state differenziate le variabili di miscela "tipologia e dosaggio di legante" e "percentuale e granulometria dell'inerte" e le prove eseguite sulle malte indurite.

La sostituzione del 10% in massa della sabbia con l'aggregato in AAC ha determinato nelle malte da muratura, confezionate con un cemento 42,5R, una variazione della densità (misurata come descritto nella sezione Materiali e metodi del

sottoparagrafo 5.2)3) del 10% rispetto a quella della miscela C0. I successivi incrementi di dosaggio di aggregato riciclato, invece, sono risultati in un alleggerimento percentuale più contenuto ed infatti la massa volumica asciutta delle miscele C15, C20 e C25 è stata del 14%, 15% e 20% inferiore rispetto a quella di C0. Nelle malte confezionate con calce idraulica naturale, in proporzione, la riduzione percentuale delle densità è stata minore di quella misurata per il cemento, considerato che il 40% di AAC ne ha determinato una variazione del solo 12% rispetto alla miscela NHL0. La lettura della perdita di massa nel periodo di stagionatura ha evidenziato l'effetto della quantità di acqua di impasto sui meccanismi di idratazione e sulla tendenza all'evaporazione. Nelle malte con calce idraulica naturale, infatti, il dosaggio più alto di aggregato riciclato ha richiesto un maggiore rapporto acqua-cemento che si è tradotto in una variazione superiore - rispetto alle miscele cementizie - della massa media dei provini nei primi sette giorni dal confezionamento. In particolare, confrontando le formulazioni analoghe per percentuale di AAC, ossia NHL e C0,10 e 20, la riduzione percentuale di massa nel periodo 3-7 giorni dall'impasto è stata per le prime circa tre volte superiore a quella per le seconde. Questa proporzione si è abbassata a circa due volte e mezzo nella comparazione effettuata al termine della maturazione. Diagrammando il tasso di variazione della massa²⁵ nei diversi intervalli temporali, riportato nel grafico di Figura 141, si può osservare che in generale le miscele con la calce idraulica naturale sono soggette ad una consistente perdita di massa nel breve periodo, diversamente da quelle con il cemento. Indipendentemente dal legante, invece, il fenomeno di riduzione della massa è direttamente proporzionale alla percentuale di aggregato riciclato²⁶. Si può supporre che la circostanza sia dovuta alla maggiore quantità di acqua di impasto richiesta nelle miscele con dosaggio superiore di AAC. I risultati, a tal proposito, sono coerenti con quelli ottenuti da alcuni autori che hanno indagato la relazione tra il tipo di legante, l'acqua di impasto e le variazioni dimensionali dei provini di conglomerati confezionati con leganti idraulici [165,166].

²⁵ Rapporto tra la differenza tra le masse nell'intervallo temporale e la durata dell'intervallo temporale in ore

²⁶ Con eccezione della miscela NHL30 della quale si discuterà nel seguito

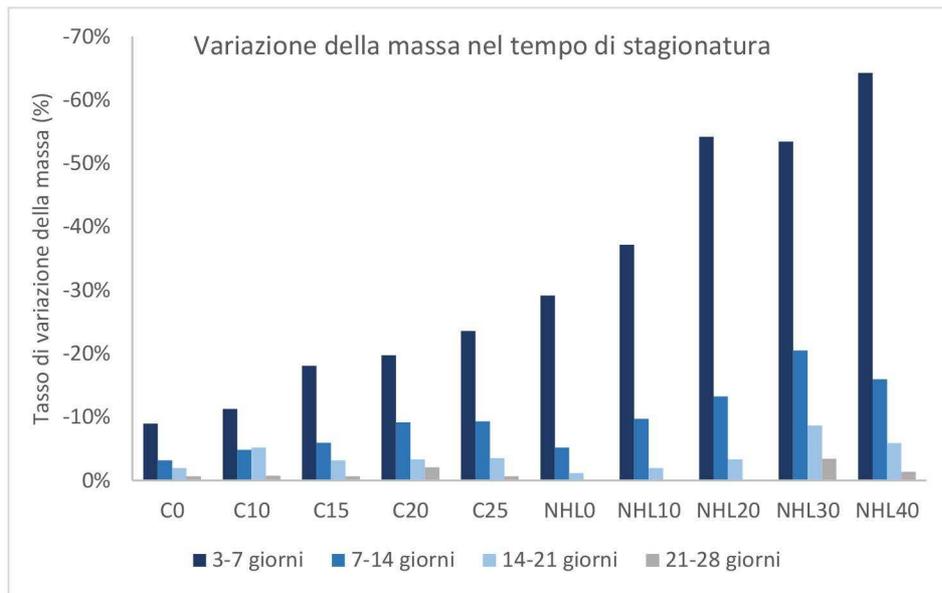


Figura 141. Tasso di variazione della massa nel tempo di stagionatura: il grafico a colonne raggruppate riporta per ogni intervallo di misurazione il relativo tasso di variazione della massa media dei provini. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Per verificare l'ipotesi appena formulata è stata eseguita un'analisi dati estesa all'insieme delle miscele al fine di computare i coefficienti di correlazione tra la variabile di miscela "rapporto acqua-legante", le variazioni di massa negli intervalli 3-7 giorni (1) e 7-28 giorni (2) e la massa volumica apparente (3). La matrice risultante ha evidenziato che il parametro "rapporto acqua-legante" è fortemente correlato sia alle variazioni di massa che alla massa volumica con un R^2 di 0,89 e 0,95 per (1) e (2) e di -0,92 per (3).

In merito alla relazione di proporzionalità diretta tra la massa volumica apparente e le prestazioni meccaniche valgono le stesse considerazioni espone nella sezione delle discussioni dei sottoparagrafi 5.2)1 e 5.2)2, ai quali si rimanda per i riferimenti bibliografici. Per le malte da muratura confezionate in questa fase la misura del modulo elastico dinamico con il metodo agli ultrasuoni ha ampliato la caratterizzazione meccanica risultante dalle prove di resistenza a compressione e flessione. La proporzionalità inversa tra il modulo elastico e la percentuale di aggregato riciclato è coerente con quanto riportato da Boumiz *et al.* [167] e da Xiaoyu *et al.* [168]. Il modulo di elasticità nei conglomerati cementizi è infatti dipendente dalle reazioni di idratazione ed in particolare dalla velocità con la quale nelle prime fasi della stagionatura si formano portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e silicati idrati di calcio (C-S-H) e nelle fasi successive si creano le connessioni tra i grani [167]. Un maggiore rapporto

acqua-cemento implica minori complessità e compattezza della struttura solida e dunque altrettanto minori massa volumica apparente e modulo di elasticità.

Già la sostituzione del 10% di aggregato siliceo con l'AAC ha comportato la riduzione del 27% del modulo elastico, sino al dimezzamento manifestatosi nella miscela al 25%. L'effetto di penalizzazione delle resistenze a flessione e compressione imputabile all'AAC, invece, è stato rilevato a partire dalla miscela C15. I provini al 10% di aggregato riciclato, infatti, hanno ridotto le prestazioni meccaniche soltanto del 6% in media, a fronte di un alleggerimento del 9% rispetto alla miscela C0. Per C15, C20 e C25, invece, la resistenza a compressione è diminuita del 27%, 31% e 36%, pur mantenendosi sopra i 25 MPa. La resistenza a flessione, infine, ha subito un secondo decremento marcato tra la miscela C15 e C20 passando dai 5,98 MPa a 5,06 MPa ed infine a 4,89 MPa per la C25.

Delle malte da intonaco confezionate con calce idraulica naturale sono stati approfonditi gli aspetti inerenti alla lavorabilità. L'aumento dell'acqua di impasto, inizialmente dosata tramite l'equazione dei volumi, necessario a garantire un'appropriata consistenza della malta ha determinato la sproporzione tra i componenti delle miscele che si è tradotta nella mancanza di regolarità nei *trend* delle proprietà fisiche e meccaniche. L'aggregato riciclato, infatti, assorbe acqua e può ridurre la lavorabilità dell'impasto nel breve termine [169,170]. Le malte NHL20 e NHL30 sono state quelle per le quali il contenuto idrico ha subito gli aggiustamenti maggiori ed in effetti le variazioni della massa e della massa volumica apparente sono risultate non allineate a quella di NHL0, NHL10 e NHL40. Quest'ultima, in particolare, pur essendo formulata con una quantità maggiore di aggregato riciclato e di acqua ha esibito una densità superiore sia a quella di NHL20 che a quella di NHL30.

Diversamente dai risultati ottenuti nelle altre formulazioni e nelle altre fasi dell'attività sperimentale, l'aggiunta dell'aggregato riciclato nelle miscele NHL ha sortito un effetto migliorativo delle resistenze a flessione e compressione che sono aumentate nel passaggio da NHL0 a NHL40 del 118% e del 74%, rispettivamente. L'unica eccezione è stata rappresentata dalla miscela NHL20 che ha diminuito le prestazioni meccaniche rispetto a NHL0. I valori della resistenza a compressione sono risultati mediamente inferiori a 2,5 MPa tranne per NHL40. I risultati ottenuti, differenti da quelli riportati in proposito delle malte ai paragrafi 5.2)1 e 5.2)2, sono concordi con quelli rilevati da Stefanidou *et al.* [171] e Dang *et al.* [172] e potrebbero dipendere oltre che dalla diversa quantità di legante per metro cubo, anche dalla granulometria dell'inerte con una maggiore percentuale di frazioni fini. L'aspetto friabile e polveroso dei provini delle miscele NHL20 e NHL30 sottoposti a

compressione ha suggerito che l'idratazione della malta allo stato fresco non è stata sufficiente a garantire un idoneo sviluppo delle proprietà meccaniche. Questa considerazione sarebbe supportata anche da quanto osservato nell'esecuzione della prova di assorbimento per capillarità, atteso che il coefficiente misurato per NHL30 è risultato inferiore anche a quello della miscela NHL0 e ciò ha confermato l'irregolarità nella struttura microscopica della malta.

In aggiunta, le difficoltà operative in sede di preparazione dei campioni ed esecuzione delle prove di aderenza al supporto rendono lecita la supposizione che le malte così confezionate non siano dotate di un'adeguata capacità ritentiva nelle fasi successive all'impasto. Se da un lato l'aggregato riciclato richiede una quantità di acqua molto superiore a quella della sabbia, le sue idratazione e saturazione non avvengono immediatamente. Alcuni autori hanno misurato un tempo di circa dieci giorni necessario alla completa saturazione degli aggregati riciclati di matrice cementizia-ceramica ed una saturazione del 56% dopo un'ora di immersione [173]. Ciò giustificherebbe la perdita quasi totale di lavorabilità delle miscele stese sui supporti più porosi che hanno assorbito l'acqua necessaria all'idratazione dell'AAC, rendendo non operabile la prova di aderenza al supporto. Questa, laddove è stata eseguita ha riportato valori mediamente bassi (inferiori a 0,20 MPa) di aderenza. Altri autori hanno evidenziato che l'impiego di aggregati riciclati porosi sia penalizzante per la capacità adesiva al supporto mentre quelli ceramici sono più performanti poiché garantiscono una maggiore unione tra la matrice e l'inerte che si traduce in una aderenza superiore [174]. I sistemi più performanti sono stati quelli dove il supporto è stato immerso in acqua ed è stata impiegata una rete porta-intonaco, a riprova del fatto che la problematica condizionante l'esito è la regolazione dell'acqua libera [173].

La prova di permeabilità al vapore, infine, coerentemente con la riduzione della densità e l'aumento della porosità ha evidenziato un miglioramento delle prestazioni igrometriche direttamente proporzionale alla percentuale di aggregato riciclato. La miscela al 40% di AAC ha esibito un valore del fattore di resistenza al vapore acqueo del 33% circa inferiore a quello della malta NHL0 e l'andamento è in linea con quanto osservato da altri autori [8,175].

5.3 CONSIDERAZIONI DI SINTESI

L'obiettivo conclusivo di verifica della sussistenza di correlazione tra le variabili di progettazione adoperate nelle diverse campagne di confezionamento, funzionali alla strutturazione di un flusso di *mix design* per le malte ecosostenibili con AAC, oggetto del lavoro di tesi presentato, è stato perseguito mediante una prima attività di uniformazione delle formulazioni delle miscele. Tutti i dosaggi - indipendentemente dai parametri scelti per il loro proporzionamento - sono stati riportati, cioè, in funzione delle frazioni in volume e in massa dei componenti per metro cubo di miscela, così da poter diagrammare le proprietà misurate al variare di fattori omogenei. Per distinguere le miscele confezionate con il cemento (sottoparagrafi 5.2)2 e 5.2)3) si è inserita nella notazione l'informazione "32,5" e "42,5". Per quanto attiene alle malte con calce idraulica naturale, invece, è stata aggiunta alla sigla la lettera "n" per indicare quelle confezionate nell'ultima fase di attività sperimentale. Le miscele con calce idraulica artificiale sono state siglate come "HL". Nelle Figura 142, Figura 143 e Figura 144 sono riportati gli schemi con le indicazioni delle frazioni volumetriche dei componenti legante, sabbia silicea, aggregato riciclato e acqua. È stata eseguita, dunque, un'analisi dati per scrivere la matrice di correlazione tra le variabili di miscela prima menzionate, i dosaggi per metro cubo e la massa volumica apparente, proprietà fisica legata qualitativamente alle prestazioni dei conglomerati. La ricerca della correlazione è stata espletata per individuare nell'intero dominio sperimentale i parametri più influenti sulla densità. L'esito ha mostrato che i dosaggi e le frazioni in volume per i componenti legante, AAC e sabbia sono correlati alla massa volumica apparente mediante un coefficiente medio di 0,93 in valore assoluto. Per l'acqua, invece, soltanto la frazione in massa è ben correlata alla proprietà fisica. Sulla base dei risultati le analisi sono state ripetute scindendo i diversi sottogruppi di confezionamento: malte con cemento (C32,5 e C42,5), malte con calce idraulica (NHL, NHL-n e HL) e malte con calce aerea (L). In questa occasione la massa volumica apparente è stata correlata soltanto al parametro "frazione volumetrica", scelto per praticità di utilizzo e per la maggiore significatività concettuale. I coefficienti computati, mostrati nelle Tabella 19 e Tabella 20, evidenziano che tra le frazioni volumetriche quella riferita al legante è meglio correlata alla massa volumica apparente in ognuno dei sottogruppi: per le malte con la calce idraulica, infatti, i valori di R^2 per la sabbia e l'AAC sono di 0,93 e -0,92 a fronte di 0,98 per il legante.

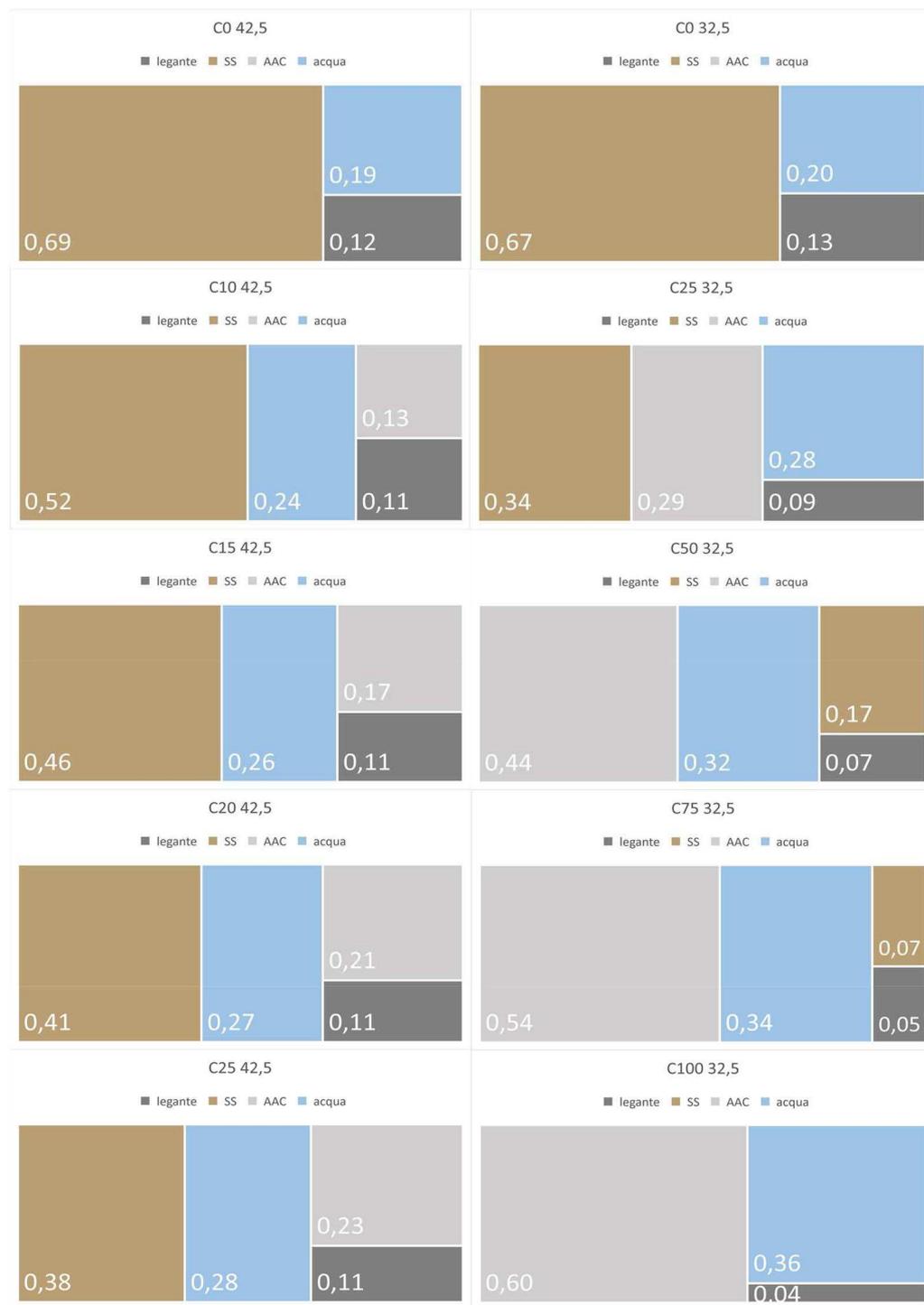


Figura 142. Frazioni volumetriche delle miscele C32,5, C42,5. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

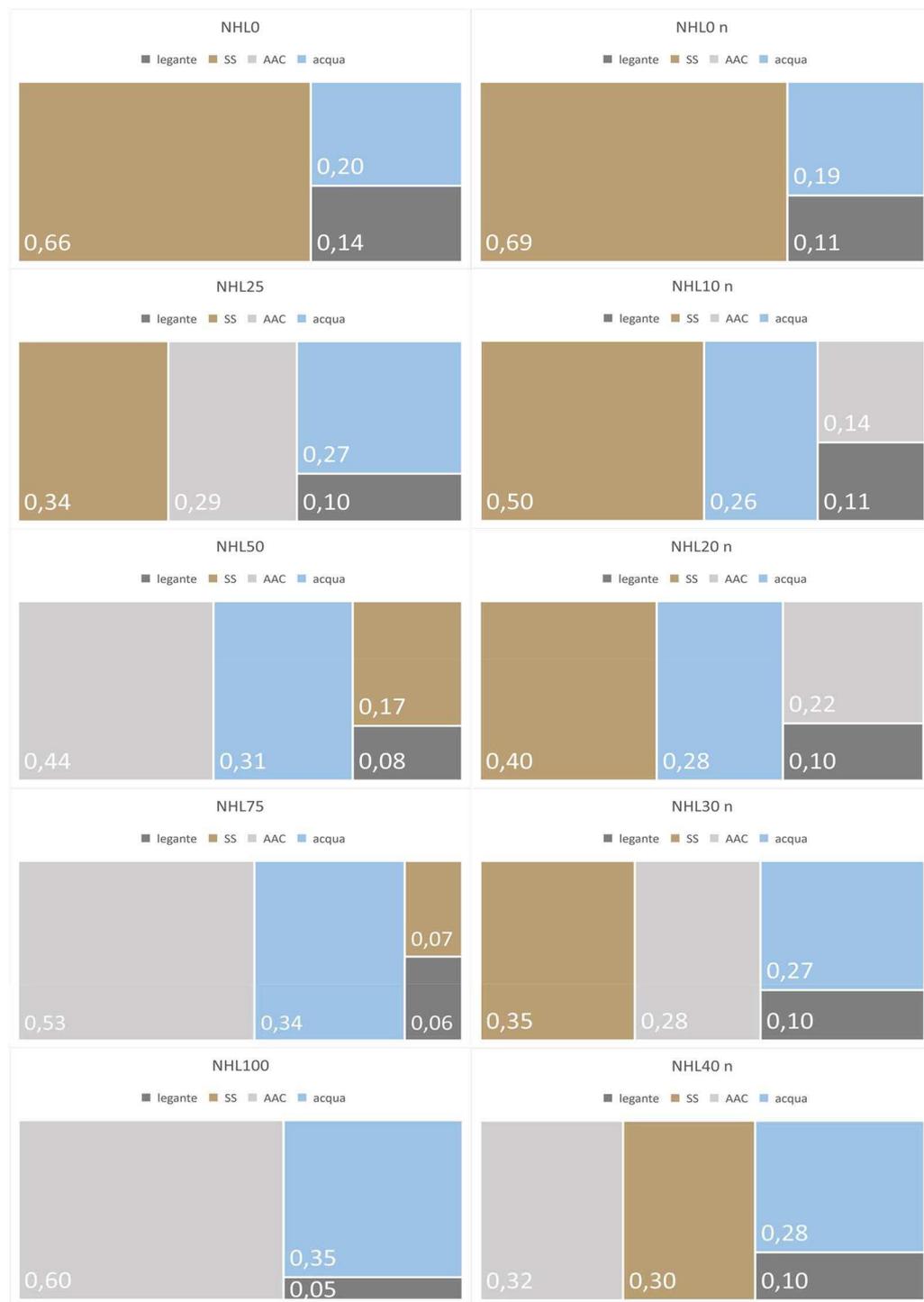


Figura 143. Frazioni volumetriche delle miscele NHL, NHL n. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

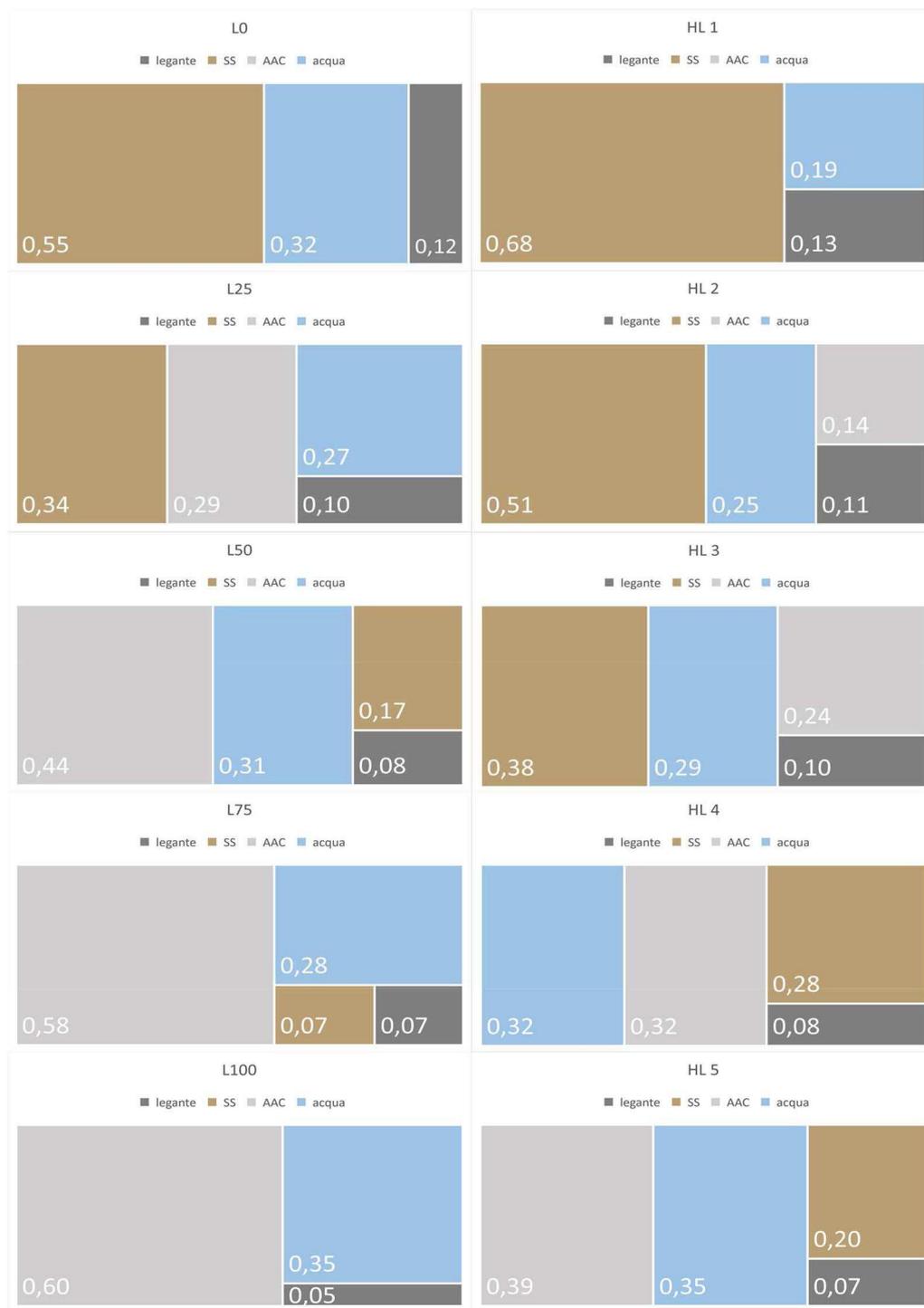


Figura 144. Frazioni volumetriche delle miscele HL, L. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

PARTE III: IL METODO

Tabella 19. Matrice di correlazione massa volumica apparente - frazioni in volume. Da sinistra: insieme delle miscele e miscele con cemento (C32,5 e C42,5)

massa volumica apparente - frazioni in volume						massa volumica apparente - frazioni in volume CEMENTO					
	legante	SS	AAC	acqua	mva		legante	SS	AAC	acqua	mva
legante	1,00					legante	1,00				
SS	0,95	1,00				SS	0,96	1,00			
AAC	-0,96	-0,99	1,00			AAC	-0,98	-1,00	1,00		
acqua	-0,85	-0,90	0,84	1,00		acqua	-0,92	-0,99	0,98	1,00	
mva	0,93	0,93	-0,93	-0,84	1,00	mva	0,98	0,98	-0,99	-0,95	1,00

SS-sabbia silicea; AAC-Calcestruzzo Aerato Autoclavato; mva-massa volumica apparente

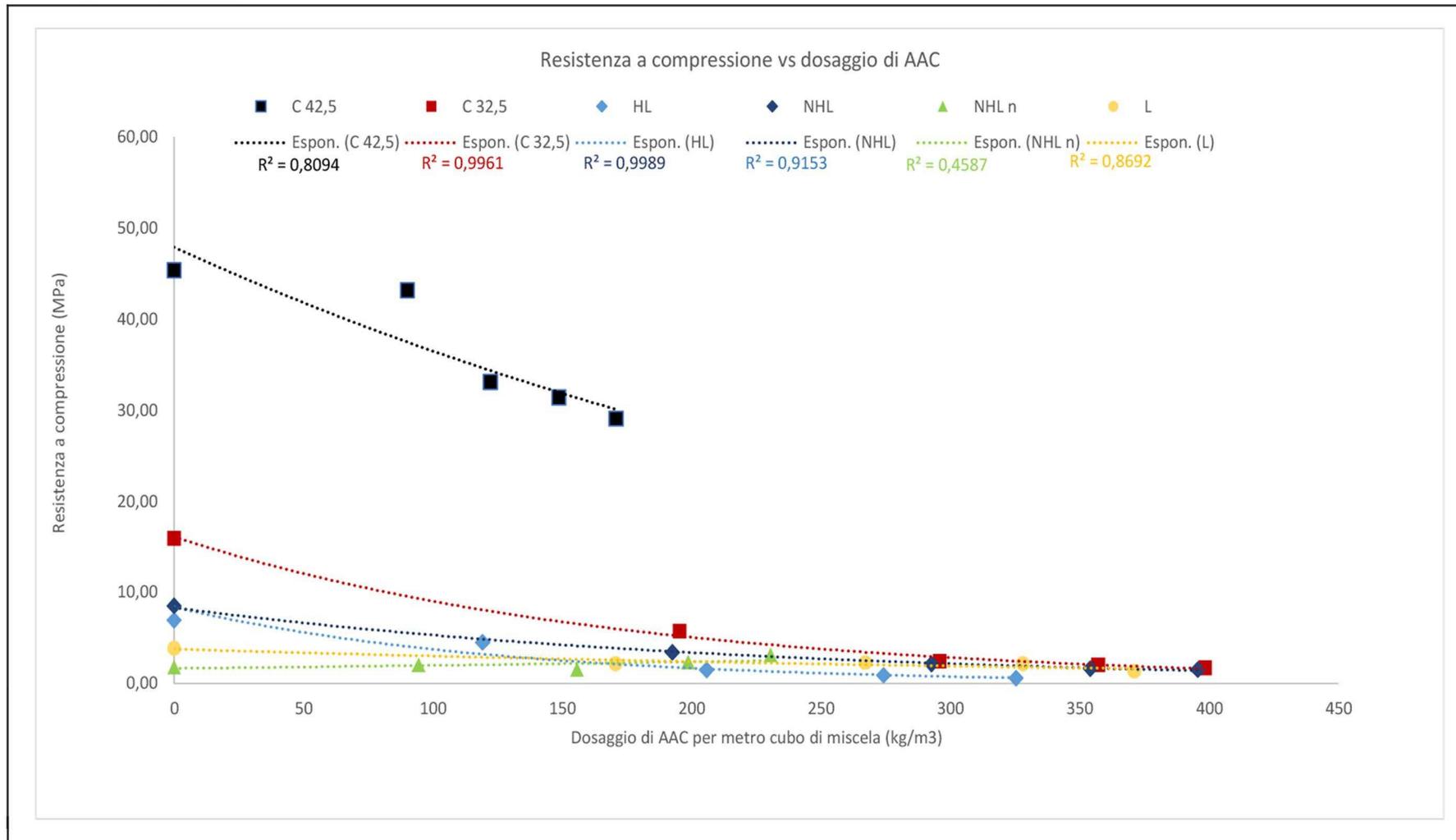
Tabella 20. Matrice di correlazione massa volumica apparente - frazioni in volume. Da sinistra: miscele con calce idraulica (NHL, NHL n, HL) e calce aerea (L)

massa volumica apparente - frazioni in volume NHL, NHL n, HL						massa volumica apparente - frazioni in volume L					
	legante	SS	AAC	acqua	mva		legante	SS	AAC	acqua	mva
legante	1,00					legante	1,00				
SS	0,94	1,00				SS	1,00	1,00			
AAC	-0,94	-1,00	1,00			AAC	-0,98	-0,99	1,00		
acqua	-0,94	-0,96	0,94	1,00		acqua	-0,28	-0,19	0,07	1,00	
mva	0,98	0,93	-0,92	-0,95	1,00	mva	1,00	1,00	-0,99	-0,20	1,00

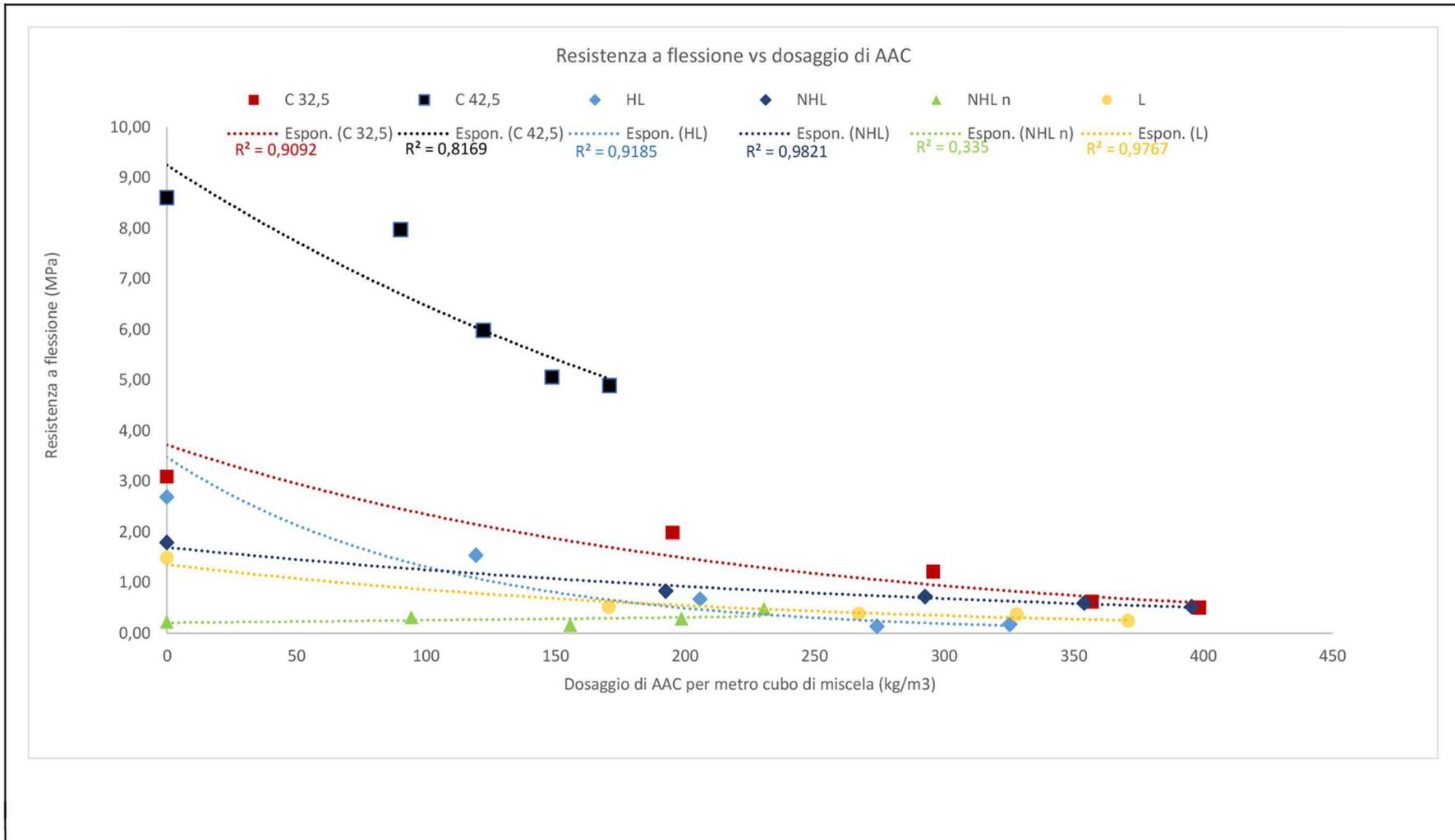
SS-sabbia silicea; AAC-Calcestruzzo Aerato Autoclavato; mva-massa volumica apparente

I diagrammi mostrati in Figura 145 hanno sintetizzato l'andamento delle resistenze a flessione e compressione e della massa volumica apparente in funzione del parametro di interesse per la ricerca in commento, ossia il dosaggio di aggregato riciclato per metro cubo di miscela. Come anticipato nei sottoparagrafi competenti a ciascuna delle fasi dell'attività sperimentale, con eccezione delle malte confezionate con calce idraulica naturale del gruppo "INT", qui indicate con NHL-n e di quelle del gruppo "MUR", i coefficienti di correlazione delle linee di tendenza esponenziali si sono attestati su valori mediamente superiori a 0,91. La massa volumica apparente, invece, è risultata ottimamente correlata per tutte le miscele (per il gruppo "INT" con un R^2 di 0,89 a fronte della media di 0,97 per le altre malte).

Si è proceduto, a questo punto, a computare la matrice di correlazione tra la massa volumica apparente e le prestazioni meccaniche sia per l'intero dominio di analisi che per i diversi sottogruppi. I coefficienti di correlazione sono stati quasi tutti prossimi all'unità fatta eccezione, nuovamente, per le malte NHL-n (R^2 di -0,37 e -0,23 per compressione e flessione, rispettivamente) e per la calce aerea (R^2 di 0,90 e 0,91 per compressione e flessione). Il disallineamento delle malte NHL-n ha influito sulla matrice dell'intero *set*, i cui valori di R^2 sono risultati di 0,67 e 0,69 per compressione e flessione. Escludendo questo gruppo, invece, i coefficienti sono saliti a 0,74 e 0,78. Le matrici ottenute hanno offerto spunti per osservazioni sulla relazione tra le due resistenze, correlate mediante un valore di 0,98, delle quali si riporta la linea di tendenza nel grafico di Figura 146.



(a)



(b)

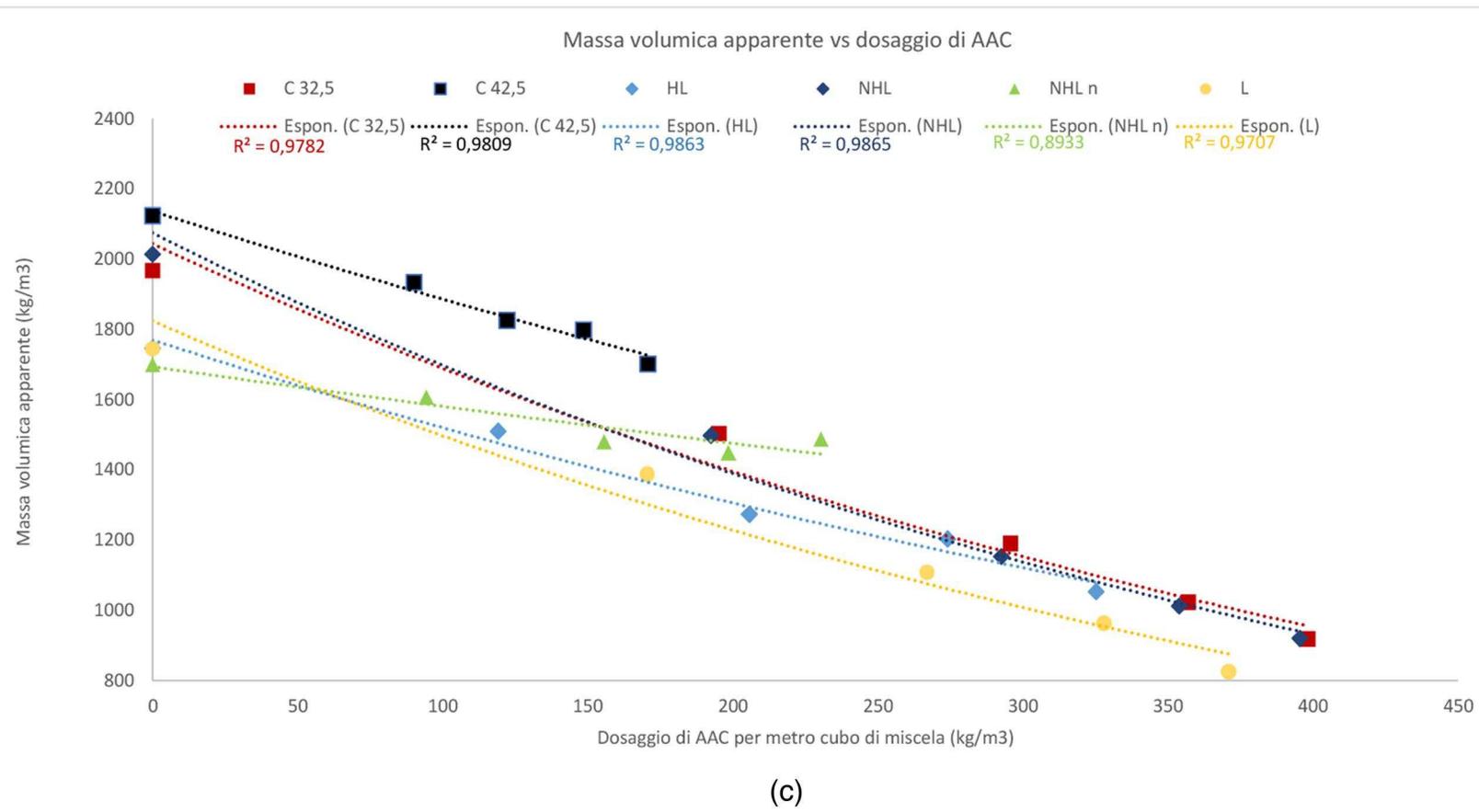


Figura 145. Proprietà meccaniche e fisiche vs dosaggio di aggregato per metro cubo di miscela. In successione: (a), resistenza a compressione, (b), resistenza a flessione, (c), massa volumica apparente. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo

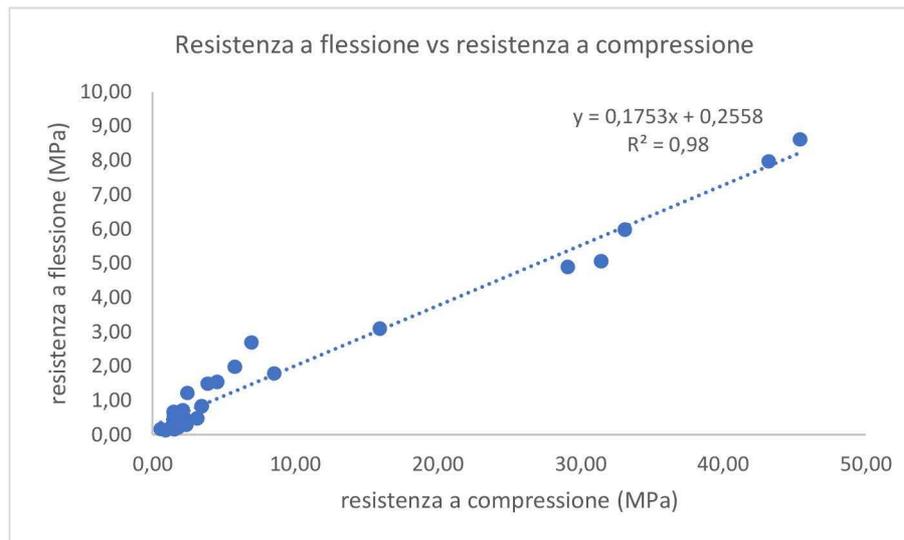


Figura 146. Resistenza a flessione vs resistenza a compressione. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Le indicazioni sulle proporzioni in volume uniformate hanno consentito di confrontare in maniera speditiva le proprietà di miscele analoghe per composizione ed in particolare:

- NHL0, HL1, C0 32,5 e C0 42,5
- HL2 e NHL10 n
- NHL30 n, NHL25, L25 e C25 32,5
- HL4 e NHL40 n
- NHL50, C50 32,5 e HL5
- NHL20 n e C25 42,5

Se le masse volumiche sono confrontabili in ciascuna delle classi, le resistenze meccaniche - come auspicabile - sono maggiormente influenzate dal tipo di legante, come è osservabile in Figura 147, la qual cosa ha suggerito di strutturare dei flussi di *mix design* differenziati in funzione del componente.

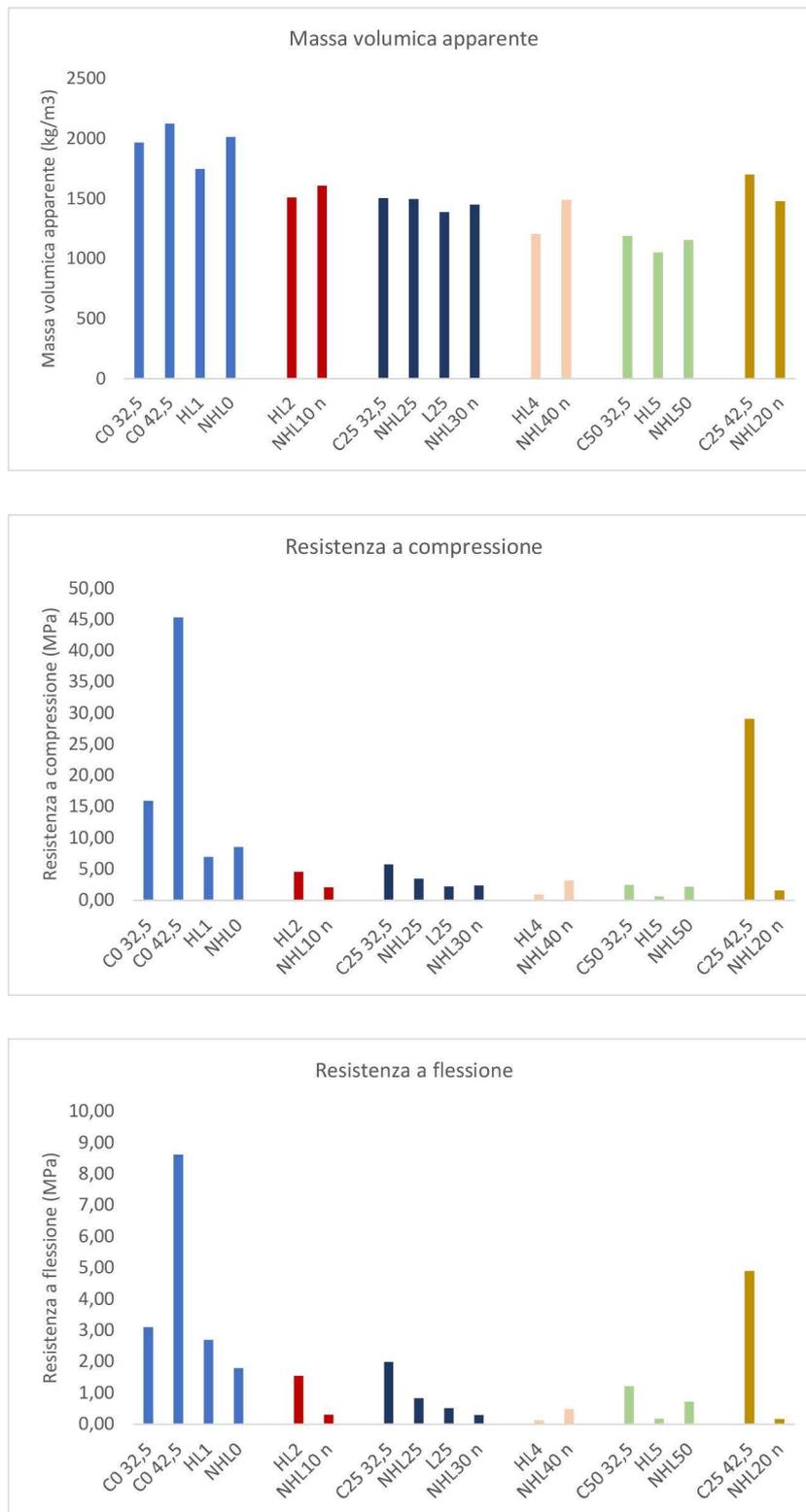


Figura 147. Massa volumica apparente, resistenza a compressione e flessione per gruppi omogenei di malte.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

In virtù delle correlazioni riscontrate, è lecito asserire che noti i dosaggi mediante l'equazione dei volumi sia possibile ricavare le frazioni volumetriche di aggregati e legante. Quest'ultima, legata alla massa volumica apparente, consentirebbe di stimare - con un margine di incertezza - la resistenza a compressione, a sua volta analiticamente connessa alla resistenza a flessione. La sequenza operativa potrebbe organizzarsi nei seguenti livelli:

- 1) stima della massa volumica apparente in funzione della frazione volumetrica del legante
- 2) stima della resistenza a compressione in funzione della massa volumica apparente
- 3) stima della resistenza a flessione in funzione della resistenza a compressione

Si è tentato con i dati a disposizione di individuare delle funzioni di correlazione per 1), 2) e 3), escludendo le miscele non contenenti aggregato riciclato con il proposito di organizzare una struttura matematica specifica per le malte oggetto di interesse della ricerca. Con riferimento specifico alle formulazioni contenenti cemento, è stata trovata una relazione lineare con R^2 di 0,99 per 1), una relazione esponenziale con R^2 di 0,95 per 2) ed infine una relazione lineare con R^2 di 0,98 per 3). Quest'ultima è stata sufficiente ad approssimare le correlazioni per tutte le miscele (cemento e calci). I grafici relativi a 1) e 2) sono riportati in Figura 148.

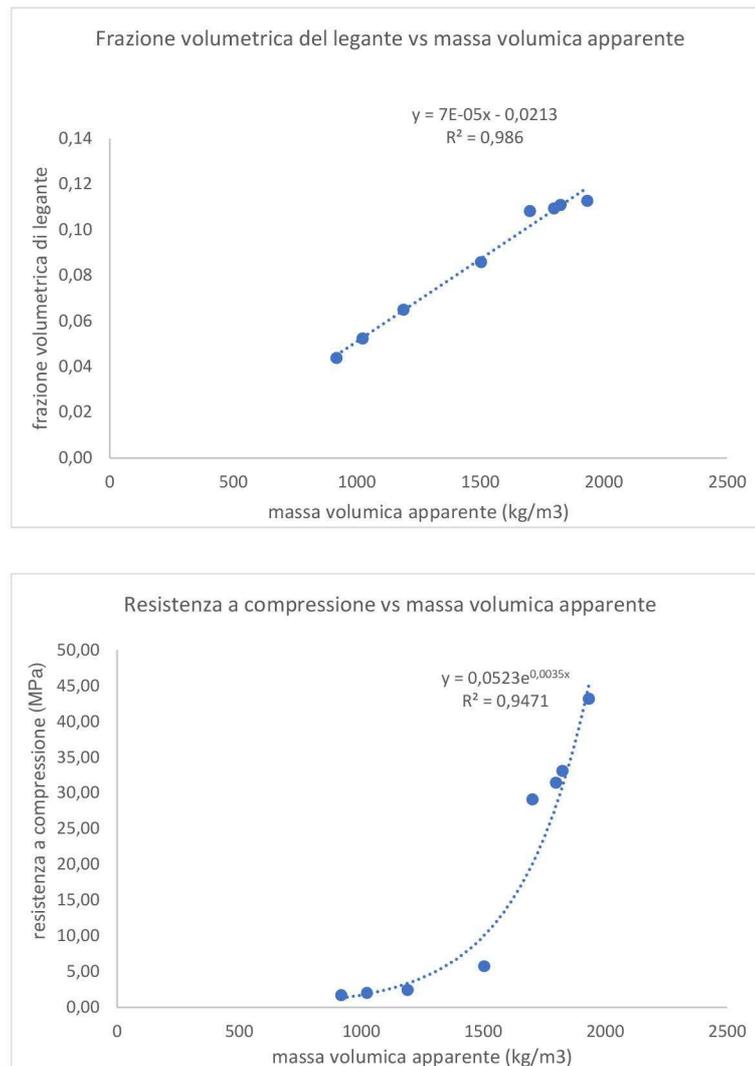


Figura 148. Relazioni per 1) e 2) del flusso di mix design per le miscele con cemento. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Dal gruppo delle malte confezionate con calce idraulica naturale, artificiale ed aerea sono state escluse quelle siglate “NHL-n” per le motivazioni già espone in precedenza. È stata osservata una relazione lineare con R^2 di 0,93 per 1), per 2) invece si è resa necessaria un'ulteriore distinzione tra i leganti idraulici e la calce aerea. Per i primi, sono state trovate relazioni esponenziali con R^2 pari a 0,99 tra la resistenza a compressione e la massa volumica apparente, per la seconda, invece, è stata diagrammata la resistenza a flessione con un coefficiente di 0,91. Si riportano i grafici relativi nella Figura 149.

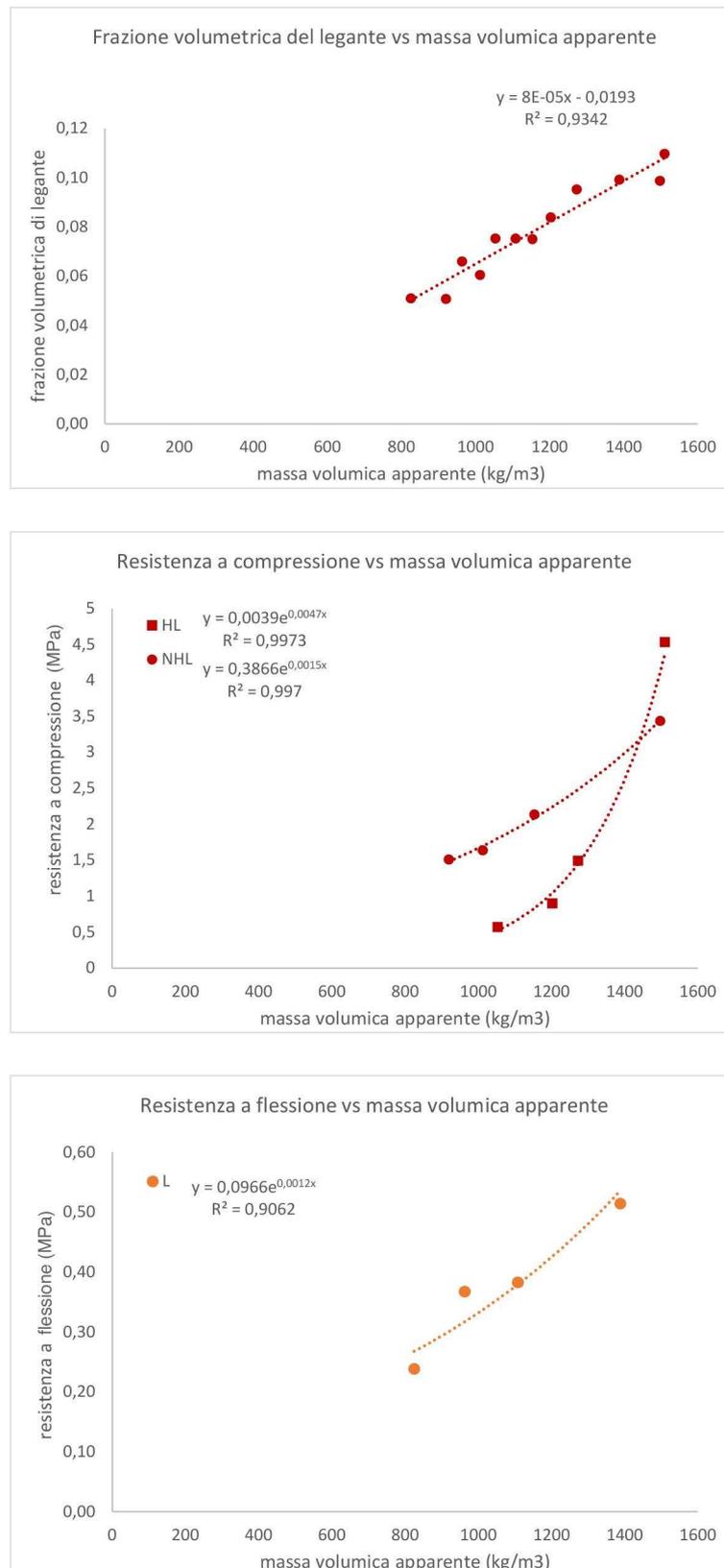
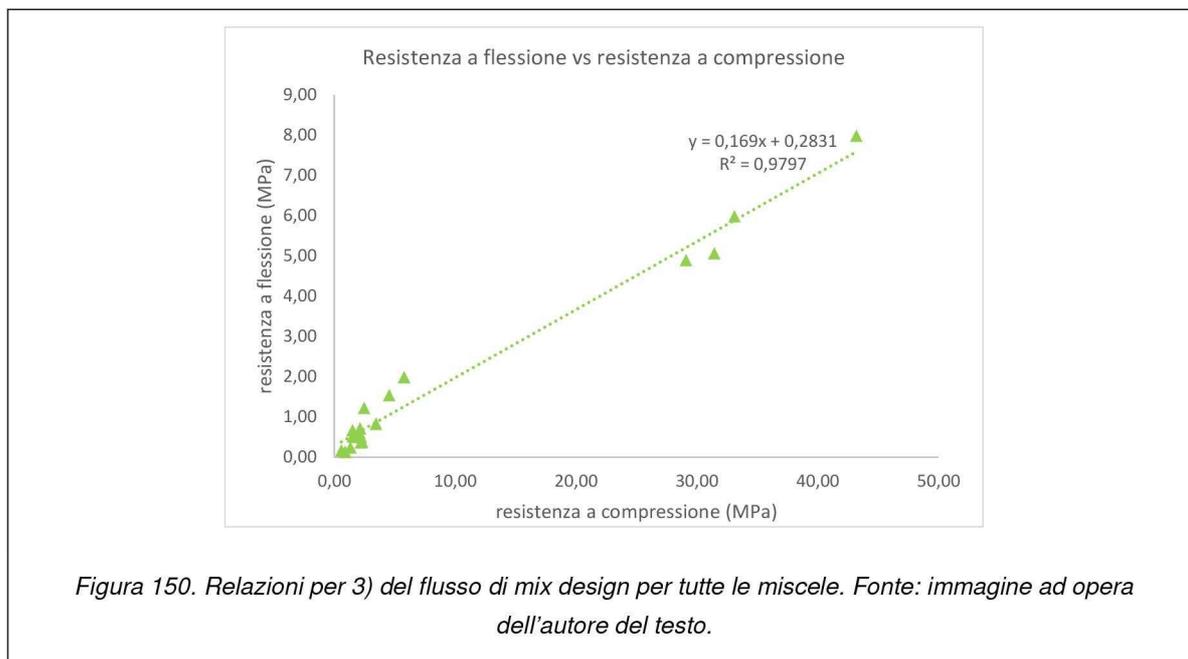
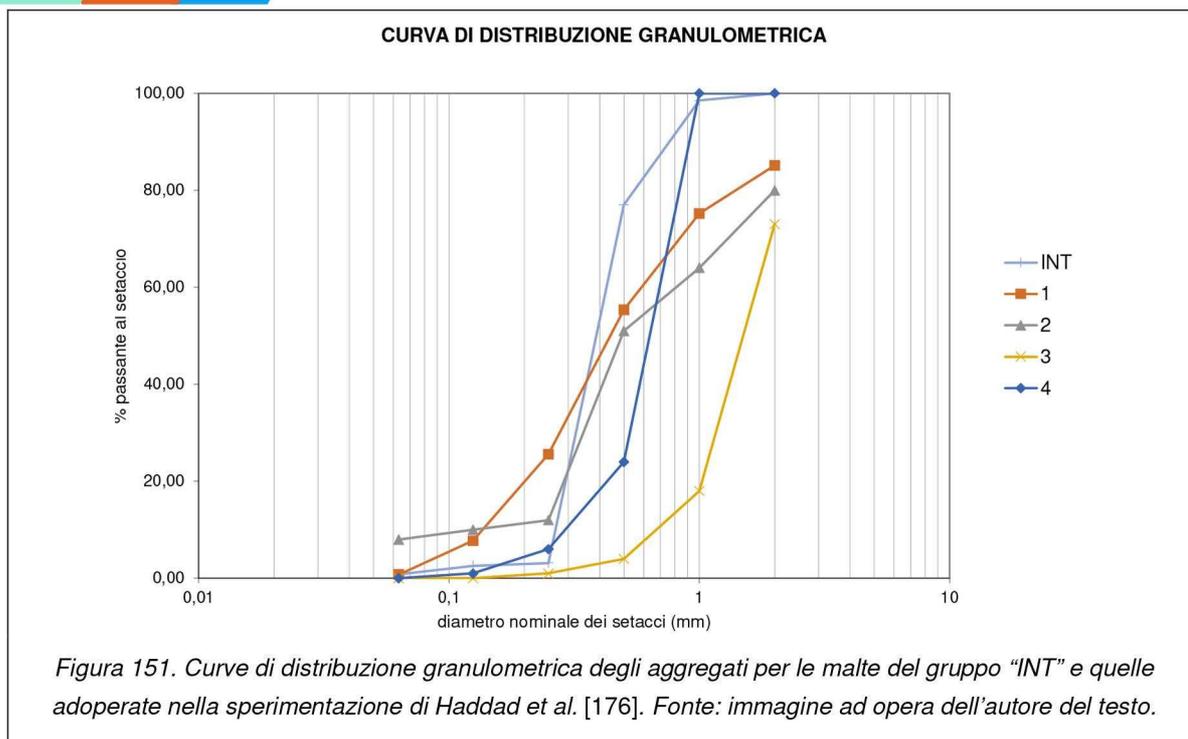


Figura 149. Relazioni per 1) e 2) del flusso di mix design per le miscele con calce. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Infine, si riporta in Figura 150 il diagramma unico, rappresentativo per tutte le miscele, della relazione tra resistenza a flessione e compressione.



Un'ulteriore considerazione è stata formulata in merito alla variabile qualitativa "granulometria dell'inerte" in ragione del fatto che nelle campagne di confezionamento si è ricorso a curve di distribuzione diversificate. Le irregolarità negli andamenti per le malte formulate per l'applicazione da intonaco (INT) hanno spinto ad approfondire l'influenza degli aggregati sulle prestazioni di prodotti per le finiture. A tale proposito, sono state riportate e sovrapposte alle curve degli inerti adoperate quelle formulate da Haddad *et al.* [176] nel merito di un'investigazione sull'assortimento granulometrico ottimale di inerti riciclati e non per malte da rivestimento. Ciò che è emerso è che la curva della sperimentazione del gruppo NHL-n è notevolmente distante e meno uniformemente assortita rispetto alle distribuzioni più performanti individuate dagli autori (1 e 2 nel grafico di Figura 151) e parrebbe avvicinarsi a quella della curva 4, qualificata come la peggiore da Haddad *et al.* Questa circostanza può aver influito sui risultati ottenuti in sede di esecuzione delle prove di resistenza meccanica.



Il flusso di operazioni prima menzionato è stato automatizzato adoperando un foglio di calcolo *Excel* per impostare una bozza di interfaccia grafica per un operatore che intende procedere ad una stima della composizione di miscela rispondente ad una specifica prestazione. Supponendo di essere interessati alle malte da muratura, l'operatore seleziona il tipo di legante, come mostrato in Figura 152, e la classe di resistenza desiderata, come mostrato in Figura 153. A queste opzioni sono affiancate in automatico le densità del legante - da scheda tecnica - e quelle degli aggregati riciclato e naturale.

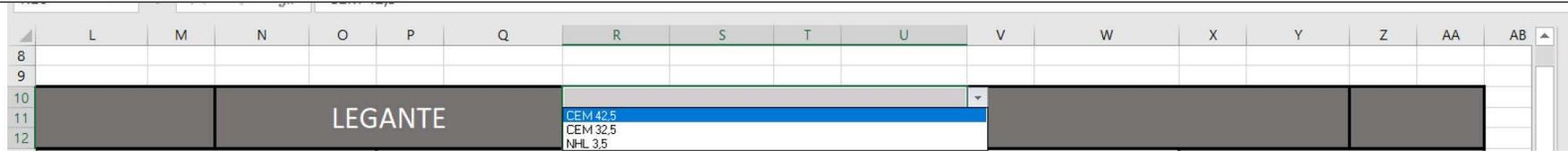


Figura 152. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, selezione del tipo di legante. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

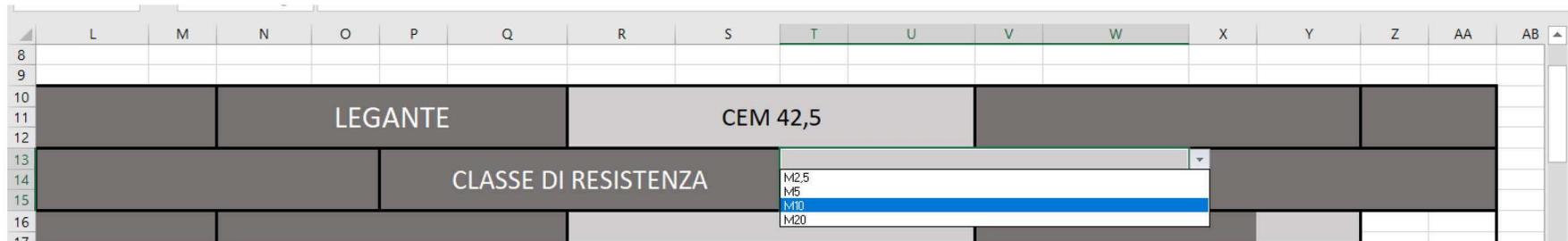


Figura 153. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, selezione della classe di resistenza. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Il *tool*, a questo punto, adoperando le relazioni analitiche riportate in precedenza, restituisce il valore di massa volumica apparente della malta che ottimizza la resistenza a compressione corrispondente alla classe scelta in *input* (Figura 154). La relazione tra massa volumica apparente e frazioni volumetriche dei componenti, poi, consente la computazione delle percentuali in volume di legante, AAC, sabbia e acqua efficace dalle quali - mediante le densità - sono ricavate le rispettive masse per metro cubo. A completare le informazioni, il rapporto in massa aggregato-legante e la percentuale in massa di AAC su aggregato totale (Figura 155).

9							
10		LEGANTE		CEM 42,5			
11							
12		CLASSE DI RESISTENZA		M10			
13							
14		massa volumica apparente (kg/m ³)		1610			
15							
16							
17							
18							

Figura 154. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, calcolo della massa volumica apparente della malta.
Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

9							
10		LEGANTE		CEM 42,5			
11							
12		CLASSE DI RESISTENZA		M10			
13							
14		massa volumica apparente (kg/m ³)		1610		rapporto acqua-legante rapporto aggregati-legante in massa % di AAC in massa su aggregato totale	
15						0,5 4 17,4%	
16							
17							
18							
19	frazione in volume di legante (%)	0,09	frazione in volume di AAC (%)	0,27	frazione in volume di sabbia (%)	0,50	frazione in volume di acqua efficace (%)
20							0,14
21							
22	massa di legante per metro cubo (kg)	277	massa di AAC per metro cubo (kg)	180	massa di sabbia per metro cubo (kg)	853	massa di acqua efficace per metro cubo (kg)
23							140
24							
25							

Figura 155. Stralcio di foglio di calcolo: ipotesi di interfaccia grafica per il flusso di mix design per malte da muratura, restituzione della composizione in massa ed in volume dei componenti. Fonte: immagine ad opera dell'autore del testo.

Si richiamano sinteticamente, a questo punto del testo, i propositi e le finalità del presente lavoro di tesi rispetto ai cui ordini - logico e cronologico - saranno riportate le considerazioni conclusive.

o b i e t t i v o 1

L'obiettivo primario della ricerca presentata è stato quello di verificare l'applicabilità come aggregato di un rifiuto edile originato dallo scarto di produzione dei blocchi in Calcestruzzo Aerato Autoclavato. Ciò in ragione di quanto osservato dall'analisi della letteratura che ha evidenziato come il riutilizzo dei rifiuti provenienti dalle aziende di materiali per le costruzioni sia meno frequente rispetto a quello avente ad oggetto i residui prodotti in cantiere. I primi, tuttavia, sarebbero da preferirsi ai secondi, attesa la possibilità di controllare e mantenere costanti le caratteristiche dei materiali in uscita dai processi industriali. Tale condizione, invece, non è verosimilmente ottenibile per i rifiuti provenienti dalla costruzione e dalla demolizione dei manufatti. In questo caso, infatti, si rendono necessarie operazioni di separazione e classificazione, spesso economicamente dispendiose.

r i s u l t a t i p a r t e I

Le caratterizzazioni fisica e chimico-mineralogica dello scarto in Calcestruzzo Aerato Autoclavato, che hanno occupato la prima fase dell'attività sperimentale, hanno suggerito che il materiale è idoneo all'utilizzo come componente sostitutivo degli aggregati naturali all'interno dei conglomerati. Ciò in ragione delle seguenti motivazioni:

- la minore massa volumica del Calcestruzzo Aerato Autoclavato - sia dei granuli che degli aggregati in mucchio - comporta, a parità di volume dell'aggregato, una minore massa. Tale circostanza rende lecito supporre - ponendosi nell'ottica di un'analisi *LCA*²⁷ - che tutti gli impatti negativi dipendenti dalla massa, primo fra tutti il trasporto dei materiali, sarebbero ridotti. Ciò risulterebbe in benefici economici, ambientali e sociali e quindi in una connotazione di "sostenibilità";
- la derivazione del materiale dallo scarto di un prodotto commercializzato e certificato per le costruzioni ne assicura la non tossicità e l'esclusione di

²⁷ *LCA*, acronimo di *Life Cycle Assessment*, indica le analisi, estese all'intero ciclo di vita dei prodotti, finalizzate alla misurazione degli impatti ambientali

sostanze potenzialmente pericolose che potrebbero, invece, essere presenti nei rifiuti edili da cantiere, si pensi all'amianto o alle fibre artificiali vetrose. L'analisi chimico-mineralogica eseguita sul Calcestruzzo Aerato Autoclavato ne ha mostrato la composizione simile a quella di un calcestruzzo, formulato con meno legante e più inerte, e quindi la sicurezza nell'utilizzo come aggregato;

- il processo produttivo di espansione che conferisce leggerezza e porosità al materiale ne rende facile la trasformazione senza il ricorso a operazioni di frantumazione e macinazione energeticamente dispendiose. Volendo ancora ragionare in termini di *LCA*, la disponibilità di un prodotto di consistenza più friabile rispetto a quella delle rocce o di altri materiali edili più densi e compatti allevierebbe gli impatti delle fasi di produzione dell'aggregato. Si pensi, a tal proposito, alle emissioni sonore, polverose ed al consumo di energia che accompagnano i processi di trasformazione dei materiali litoidi in inerti.

o b i e t t i v o 2

Una volta riconosciuta la potenzialità nell'utilizzo dello scarto in Calcestruzzo Aerato Autoclavato come aggregato, si è proceduto a formulare e poi caratterizzare gli elementi tecnici - le malte - nei quali il prodotto andrebbe adoperato. Il proposito è stato quello di approcciare alla formulazione delle miscele in maniera progettuale, ricalcando il principio del *mix design* dei calcestruzzi e servendosi dell'equazione dei volumi per il proporzionamento dei componenti. La sequenza operativa ha sempre previsto una fase di definizione delle composizioni delle miscele seguita poi dalla loro caratterizzazione fisica, meccanica e chimico-mineralogica. In prima istanza, le malte sono state differenziate mediante una sola variabile di miscela, ossia la percentuale in massa di aggregato riciclato, per poi estendere il dominio di indagine aggiungendo una seconda variabile, vale a dire la tipologia di legante. I dati osservati nella campagna di confezionamento centrale, più corposa, sono confluiti nell'ultimo stadio dell'attività sperimentale dove il criterio normativo di classificazione delle malte è stato adoperato per scindere i parametri di proporzionamento delle miscele e la relativa caratterizzazione. Le due variabili prima menzionate - percentuale di aggregato riciclato e tipologia di legante - e le condizioni al contorno nell'equazione dei volumi sono stati infatti distinti per le malte da muratura e quelle da intonaco. Si è ricorso al cemento e ad una percentuale di aggregato riciclato contenuta al 25% in massa per le prime, alla calce idraulica naturale e ad una percentuale di aggregato riciclato sino al 40% in massa per le seconde. A valle dell'attività di confezionamento

e caratterizzazione delle malte, è lecito ritenere l'aggregato riciclato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato compatibile con i leganti adoperati, sia idraulici - cementi *Portland* di miscela 32,5R e 42,5R, calce idraulica naturale NHL3,5 e calce idraulica artificiale - che aerei (calce aerea dolomitica). Si riporta, sinteticamente, quanto emerso di significativo:

risultati parte 2

- l'aggregato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato sortisce un effetto "idraulicizzante" sulla calce aerea, rilevato in sede di caratterizzazione meccanica e chimico-mineralogica delle miscele, ciò in ragione della composizione dell'inerte riciclato simile al calcestruzzo. Le resistenze a compressione e flessione delle malte con calce aerea, infatti, pur essendo penalizzate dall'incremento della massa di aggregato riciclato a sostituzione della sabbia, hanno subito riduzioni notevolmente più contenute rispetto a quelle misurate per le miscele con i leganti idraulici. Le curve dell'analisi termogravimetrica delle formulazioni L100 e NHL100 con calce aerea e calce idraulica naturale contenenti soltanto aggregato riciclato, peraltro, sono risultate quasi interamente sovrapposte, ciò a conferma della modifica microstrutturale apportata dall'aggiunta del composto cementizio all'interno della matrice aerea;
- nelle malte confezionate con cemento ed alte percentuali di aggregato riciclato le analisi chimico-mineralogiche hanno evidenziato la catalizzazione della formazione di tobermorite alluminosa, definita in letteratura come "il segreto del calcestruzzo romano" in quanto specie chimica di elevate cristallinità e stabilità. L'assenza del composto nelle miscele con calce idraulica è motivata dalla minore o nulla percentuale di alluminio disponibile all'interazione con i silicati di calcio;
- le indagini effettuate con lo scopo di approfondire la reattività del gesso presente all'interno dell'aggregato riciclato lasciano supporre che il composto solfatico non sia libero. Tale circostanza - seppur in via preliminare - può considerarsi un risultato incoraggiante nell'ottica di accertamento della compatibilità ambientale dell'aggregato riciclato che, come illustrato nel paragrafo 3.3, è misurata mediante un *test* di cessione dei solfati, non eseguito nella presente attività di ricerca. Tuttavia, l'assenza nelle *TGA* e *XRD*²⁸ di composti come il trisolfo ed il monosolfo alluminato

²⁸ *TGA*, analisi termogravimetrica; *XRD*, analisi diffrattometrica

di calcio idrato, definiti dalla letteratura come un indice dell'attività chimica del gesso nell'aggregato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato, consentono di ritenere il gesso sufficientemente legato, e quindi non tendente alla cessione;

- la sostituzione dell'inerte naturale con quello in Calcestruzzo Aerato Autoclavato sortisce un effetto migliorativo delle proprietà igrometriche delle malte confezionate con calce idraulica naturale. Il fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo è risultato, infatti, inversamente proporzionale alla percentuale in massa dell'aggregato riciclato, ciò in ragione della sua elevata porosità;
- l'alleggerimento delle miscele, proporzionale alla percentuale di aggregato riciclato, non è sufficiente a garantirne - almeno in via teorica - una prestazione termoisolante tale da valere la classificazione come intonaco termico ai sensi della norma UNI EN 998-1:2016. I valori di conducibilità termica teorica ottenuti applicando il metodo tabellare²⁹, infatti, sono superiori a quelli previsti per gli intonaci termici, anche per le malte con il 100% di aggregato riciclato;
- masse di aggregato riciclato superiori a 250 kg per metro cubo di malta comportano una riduzione della resistenza a compressione delle miscele - idrauliche ed aeree - sino ad attingere valori di circa 3 MPa, indipendentemente dal tipo di legante. L'aggregato in Calcestruzzo Aerato Autoclavato non attiva processi di *fillerizzazione* e reazioni di natura pozzolanica, migliorativi della prestazione meccanica dei conglomerati, che invece la letteratura attribuisce ai prodotti riciclati di matrice ceramica;
- l'elevato coefficiente di assorbimento idrico dell'aggregato riciclato determina l'aumento della quantità di acqua di impasto e conseguentemente del rapporto acqua-legante. Tali addizioni sono necessarie alla saturazione dell'inerte e a scongiurare il rallentamento o l'impedimento delle reazioni di idratazione del legante. In fase di confezionamento delle malte, tuttavia, è stato osservato che la saturazione del materiale riciclato non avviene istantaneamente. Circostanza, questa, supportata dai riferimenti in letteratura che hanno indicato una tempistica di circa un'ora per la saturazione parziale (56%) e di circa dieci giorni per la saturazione totale degli aggregati riciclati. Nella preparazione dei campioni per la prova di aderenza la stesura delle malte sui supporti si è

²⁹ UNI EN 1745:2020

resa difficoltosa e talvolta inoperabile a causa dell'elevata tendenza all'evaporazione dell'acqua di impasto. Questa problematica, inoltre, può aver inciso sui risultati delle prove meccaniche, particolarmente penalizzati, ottenuti per alcune delle miscele. A scopo risolutivo, quindi, si potrebbe ricorrere ad un pretrattamento dell'aggregato riciclato al fine di garantirne la saturazione prima del mescolamento con il legante e l'acqua di impasto. Nell'ottica della produzione di un premiscelato, tuttavia, ciò comporterebbe i confezionamenti separati di aggregato e legante. In alternativa, l'inserimento nella polvere della miscela di un elemento idroritentore come la cellulosa potrebbe essere di supporto alla cessione graduale e regolata dell'acqua.

o b i e t t i v o 3 e r i s u l t a t i p a r t e 3

Il proporzionamento delle miscele mediante l'equazione dei volumi e la raccolta dei risultati delle prove è confluita nel proposito finale di ricerca delle relazioni funzionali tra la formulazione delle malte e le loro proprietà fisiche e meccaniche. Questo è quanto osservato:

- esiste una relazione analitica tra i parametri di dosaggio delle miscele e la loro massa volumica apparente. Le matrici di correlazione hanno evidenziato che per le frazioni in volume dei componenti della miscela, in particolare quella del legante, il coefficiente di determinazione (R^2) è quasi prossimo all'unità. Questo rende possibile la stima della massa volumica apparente di una malta con Calcestruzzo Aerato Autoclavato, pur con un margine di incertezza, a partire dal proporzionamento della sua miscela effettuato tramite l'equazione dei volumi;
- la massa volumica apparente delle malte testate è correlata con un coefficiente R^2 superiore a 0,90 alle resistenze a compressione o flessione - in dipendenza dal tipo di legante - e ciò consente, ancora con un grado di incertezza, di poter preventivare la classe di resistenza del conglomerato e quindi la sua categoria di impiego. Le resistenze a compressione e flessione, in aggiunta, sono correlate linearmente con un coefficiente R^2 di 0,97;
- la possibilità di stimare la massa volumica apparente rende operabile la valutazione preliminare di altre proprietà mediante i metodi tabellari normativi - si pensi alla conducibilità termica e al fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo per le malte da intonaco - ovvero tramite le

relazioni disponibili in letteratura, ad esempio inerenti al modulo elastico, di interesse per le malte da muratura.

limitazioni e sviluppi futuri

Per ciò che concerne le limitazioni dello studio, la costruzione delle curve granulometriche - in particolare per le miscele del gruppo "INT"³⁰ - potrebbe non aver garantito una distribuzione ottimale ed uniforme del materiale in tutti gli intervalli. Caratteristica, questa, auspicata in letteratura per ottenere conglomerati con buone prestazioni meccaniche.

In conclusione, in virtù di quanto appena riportato, le attività di proseguimento del percorso sperimentale potranno occuparsi dell'ottimizzazione della granulometria degli inerti - riciclato e naturale - selezionando alcune tra le formulazioni già testate. Ciò che si ritiene necessario alla luce dell'esperienza condotta, in ogni caso, è la limitazione della frazione volumetrica di aggregato riciclato al 20%, in particolare per le malte da muratura, per scongiurare l'impoverimento delle prestazioni meccaniche ed i rapporti acqua-legante eccessivamente alti. Con riferimento a quest'ultima considerazione, peraltro, è auspicabile la valutazione di condizioni di inserimento dell'aggregato in parziale o totale saturazione. Infine, nella prospettiva di spendibilità dei risultati conseguiti, sarà opportuno implementare analisi di valutazione economica ed ambientale di una soluzione premiscelata contenente l'aggregato riciclato. La stima degli impatti ambientali e dell'investimento economico di un operatore che decide di organizzare un impianto per la produzione della malta siffatta potrà essere utile ad esprimere giudizi sulla effettiva sostenibilità della soluzione prospettata.

³⁰ Notazione introdotta nel sottoparagrafo 5.2)3

1. Visser, W.; Brundtland, G.H. Our Common Future ('The Brundtland Report'): World Commission On Environment And Development. *Top 50 Sustain. Books* **2013**, 52–55, Doi:10.9774/Gleaf.978-1-907643-44-6_12.
2. Berardi, U. Sustainability Assessment In The Construction Sector: Rating Systems And Rated Buildings. *Sustain. Dev.* **2012**, *20*, 411–424, Doi:https://doi.org/10.1002/Sd.532.
3. Hossain, M.U.; Poon, C.S.; Lo, I.M.C.; Cheng, J.C.P. Comparative Environmental Evaluation Of Aggregate Production From Recycled Waste Materials And Virgin Sources By LCA. *Resour. Conserv. Recycl.* **2016**, *109*, 67–77, Doi:10.1016/J.Resconrec.2016.02.009.
4. Cortina, M.G.; Martínez, P.S.; Martínez, F.F. Environmental Improvement In Use Of Fine Fraction Recycled Aggregates As A Raw Material In Masonry Mortar Fabrication. *Open Constr. Build. Technol. J.* **2017**, *11*, 371–380, Doi:10.2174/1874836801711010371.
5. Wahlström, M.; Bergmans, J.; Teittinen, T.; Bachér, J.; Smeets, A.; Paduart, A. Construction And Demolition Waste: Challenges And Opportunities In A Circular Economy; European Environment Agency_European Topic Centre Waste And Materials In A Green Economy. **2020**, 53.
6. Silva, R. V; De Brito, J.; Dhir, R.K. Availability And Processing Of Recycled Aggregates Within The Construction And Demolition Supply Chain: A Review. *J. Clean. Prod.* **2017**, *143*, 598–614, Doi:https://doi.org/10.1016/J.Jclepro.2016.12.070.
7. Silva, R. V; De Brito, J.; Dhir, R.K. Use Of Recycled Aggregates Arising From Construction And Demolition Waste In New Construction Applications. *J. Clean. Prod.* **2019**, *236*, 117629, Doi:https://doi.org/10.1016/J.Jclepro.2019.117629.
8. Roque, S.; Maia Pederneiras, C.; Brazão Farinha, C.; De Brito, J.; Veiga, R. Concrete-Based And Mixed Waste Aggregates In Rendering Mortars. *Mater.* **2020**, *13*.
9. López Ruiz, L.A.; Roca Ramón, X.; Gassó Domingo, S. The Circular Economy In The Construction And Demolition Waste Sector – A Review And An Integrative Model Approach. *J. Clean. Prod.* **2020**, *248*, 119238, Doi:https://doi.org/10.1016/J.Jclepro.2019.119238.
10. Hita, P.R. De; Pérez-Gálvez, F.; Morales-Conde, M.J.; Pedreño-Rojas, M.A. Reuse Of Plastic Waste Of Mixed Polypropylene As Aggregate In Mortars For The Manufacture Of Pieces For Restoring Jack Arch Floors With Timber Beams. *J. Clean. Prod.* **2018**, *198*, 1515–1525, Doi:10.1016/J.Jclepro.2018.07.065.
11. Makri, C.; Hahladakis, J.N.; Gidarakos, E. Use And Assessment Of “E-Plastics” As Recycled Aggregates In Cement Mortar. *J. Hazard. Mater.* **2019**, *379*, 120776.
12. Coppola, B.; Courard, L.; Michel, F.; Incarnato, L.; Di Maio, L. Investigation On The Use Of Foamed Plastic Waste As Natural Aggregates Replacement In Lightweight Mortar. *Compos. Part B Eng.* **2016**, *99*, 75–83, Doi:10.1016/J.Compositesb.2016.05.058.
13. Faraj, R.H.; Hama Ali, H.F.; Sherwani, A.F.H.; Hassan, B.R.; Karim, H. Use Of Recycled Plastic In Self-Compacting Concrete: A Comprehensive Review On Fresh And Mechanical Properties. *J. Build. Eng.* **2020**, *30*, 101283, Doi:https://doi.org/10.1016/J.Job.2020.101283.
14. Li, X.; Ling, T.-C.; Hung Mo, K. Functions And Impacts Of Plastic/Rubber Wastes As Eco-Friendly Aggregate In Concrete. A Review. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *240*, 117869

- 
15. Bai, G.; Zhu, C.; Liu, C.; Liu, B. An Evaluation Of The Recycled Aggregate Characteristics And The Recycled Aggregate Concrete Mechanical Properties. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *240*, 117978, Doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117978>.
 16. Meftteh, H.; Kebaïli, O.; Oucief, H.; Berredjem, L.; Arabi, N. Influence Of Moisture Conditioning Of Recycled Aggregates On The Properties Of Fresh And Hardened Concrete. *J. Clean. Prod.* **2013**, *54*, 282–288, Doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.009>.
 17. Srivastava, A.; Singh, S.K. Utilization Of Alternative Sand For Preparation Of Sustainable Mortar: A Review. *J. Clean. Prod.* **2020**, *253*, 119706, Doi:[10.1016/j.jclepro.2019.119706](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119706).
 18. Nasr, M.S.; Shubbar, A.A.; Abed, Z.A.A.R.; Ibrahim, M.S. Properties Of Eco-Friendly Cement Mortar Contained Recycled Materials From Different Sources. *J. Build. Eng.* **2020**, *31*, 101444, Doi:[10.1016/j.jobe.2020.101444](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101444).
 19. Barbuta, M.; Bucur, R.D.; Cimpeanu, S.M.; Paraschiv, G.; Bucur, D. Wastes In Building Materials Industry. *Agroecology* **2015**, Doi:[10.5772/59933](https://doi.org/10.5772/59933).
 20. Ruggerio, C.A. Sustainability And Sustainable Development: A Review Of Principles And Definitions. *Sci. Total Environ.* **2021**, *786*, 147481, Doi:[10.1016/j.scitotenv.2021.147481](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147481).
 21. Mebratu, D. Sustainability And Sustainable Development: Historical And Conceptual Review. *Environ. Impact Assess. Rev.* **1998**, *18*, 493–520, Doi:[10.1016/S0195-9255\(98\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(98)00019-5).
 22. Mellos, K. Theory Of Eco-Development BT - Perspectives On Ecology: A Critical Essay. In; Mellos, K., Ed.; Palgrave Macmillan UK: London, 1988; Pp. 59–74 ISBN 978-1-349-19598-5.
 23. Spangenberg, J.H. Environmental Space And The Prism Of Sustainability: Frameworks For Indicators Measuring Sustainable Development. *Ecol. Indic.* **2002**, *2*, 295–309, Doi:[10.1016/S1470-160X\(02\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S1470-160X(02)00065-1).
 24. Various Authors. Carbon Dioxide Trend Available Online: <https://data.giss.nasa.gov/>.
 25. Haberl, H.; Fischer-Kowalski, M.; Krausmann, F.; Weisz, H.; Winiwarter, V. Progress Towards Sustainability? What The Conceptual Framework Of Material And Energy Flow Accounting (MEFA) Can Offer. *Land Use Policy* **2004**, *21*, 199–213, Doi:[10.1016/j.landusepol.2003.10.013](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2003.10.013).
 26. Walker, B.; Holling, C.; Carpenter, S.; Kinzig, A. Resilience, Adaptability And Transformability In Social-Ecological Systems. *Ecol. Soc.* **2003**, *9*, Doi:[10.5751/ES-00650-090205](https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205).
 27. Gallopín, G. *Medio Ambiente Y Desarrollo*; 2003; ISBN 9213221819.
 28. Whyte, P.; Lamberton, G. Conceptualising Sustainability Using A Cognitive Mapping Method. *Sustain.* **2020**, *12*, Doi:[10.3390/Su12051977](https://doi.org/10.3390/Su12051977).
 29. Connelly, S. Mapping Sustainable Development As A Contested Concept. *Local Environ.* **2007**, *12*, 259–278, Doi:[10.1080/13549830601183289](https://doi.org/10.1080/13549830601183289).
 30. Moir, S.; Carter, K. Diagrammatic Representations Of Sustainability - A Review And Synthesis. *Assoc. Res. Constr. Manag. ARCOM 2012 - Proc. 28th Annu. Conf.* **2012**, *2*, 1479–1489.
 31. Costanza, R.; Daly, H.E. Capital Natural Development Sustainable. *Soc. Conserv. Biol.* **2011**, *6*, 37–46.
 32. Pearce, D.W.; Atkinson, G.D. Capital Theory And The Measurement Of Sustainable Development: An Indicator Of “Weak” Sustainability. *Ecol. Econ.* **1993**, *8*, 103–108, Doi:[10.1016/0921-8009\(93\)90039-9](https://doi.org/10.1016/0921-8009(93)90039-9).
 33. Hahn, T.; Pinkse, J.; Preuss, L.; Figge, F. Tensions In Corporate Sustainability: Towards An Integrative Framework. *J. Bus. Ethics* **2015**, *127*, 297–316, Doi:[10.1007/S10551-014-2047-5](https://doi.org/10.1007/S10551-014-2047-5).

- 
34. Giddings, B.; Hopwood, B.; O'Brien, G. Environment, Economy And Society: Fitting Them Together Into Sustainable Development. *Sustain. Dev.* **2002**, *10*, 187–196, Doi:https://doi.org/10.1002/Sd.199.
35. Lozano, R. Envisioning Sustainability Three-Dimensionally. *J. Clean. Prod.* **2008**, *16*, 1838–1846, Doi:10.1016/J.JCLEPRO.2008.02.008.
36. Omer, M.A.B.; Noguchi, T. A Conceptual Framework For Understanding The Contribution Of Building Materials In The Achievement Of Sustainable Development Goals (Sdgs). *Sustain. Cities Soc.* **2020**, *52*, 101869, Doi:10.1016/J.SCS.2019.101869.
37. Cole, R.J. Changing Context For Environmental Knowledge. *Build. Res. Inf.* **2004**, *32*, 91–109, Doi:10.1080/0961321042000211396.
38. Berardi, U. Beyond Sustainability Assessment Systems: Upgrading Topics By Enlarging The Scale Of Assessment. *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.* **2011**, *2*, 276–282, Doi:10.5390/SUSB.2011.2.4.276.
39. Conte, E.; Monno, V. Beyond The Buildingcentric Approach: A Vision For An Integrated Evaluation Of Sustainable Buildings. **2012**, *34*, Doi:10.1016/J.EIAR.2011.12.003.
40. Conte, E. The Era Of Sustainability: Promises, Pitfalls And Prospects For Sustainable Buildings And The Built Environment. *Sustain.* **2018**, *10*.
41. Kibert, C. Establishing Principles And A Model For Sustainable Construction. *Ind. Eng.* **1994**, *16*, 3–12.
42. Lowe, R. Addressing The Challenges Of Climate Change For The Built Environment. *Build. Res. Inf.* **2007**, *35*, 343–350, Doi:10.1080/09613210701345873.
43. Berardi, U. Clarifying The New Interpretations Of The Concept Of Sustainable Building. *Sustain. Cities Soc.* **2013**, *8*, 72–78, Doi:10.1016/J.SCS.2013.01.008.
44. Franzoni, E. Materials Selection For Green Buildings: Which Tools For Engineers And Architects? *Procedia Eng.* **2011**, *21*, 883–890, Doi:https://doi.org/10.1016/J.Proeng.2011.11.2090.
45. Aminu Umar, U.; Khamidi, D.M.F.; Tukur, H. Sustainable Building Materials For Green Building Construction, Conservation And Refurbishing. **2012**
46. Steurer, R.; Hametner, M. Objectives And Indicators In Sustainable Development Strategies: Similarities And Variances Across Europe. *Sustain. Dev.* **2013**, *21*, 224–241, Doi:https://doi.org/10.1002/Sd.501.
47. Ding, G.K.C. Sustainable Construction - The Role Of Environmental Assessment Tools. *J. Environ. Manage.* **2008**, *86*, 451-464, Doi:10.1016/J.JENVMAN.2006.12.025.
48. Ali, H.H.; Al Nsairat, S.F. Developing A Green Building Assessment Tool For Developing Countries. Case Of Jordan. *Build. Environ.* **2009**, *44*, 1053–1064.
49. Suzer, O. A Comparative Review Of Environmental Concern Prioritization: LEED Vs Other Major Certification Systems. *J. Environ. Manage.* **2015**, *154*, 266–283, Doi:10.1016/J.JENVMAN.2015.02.029.
50. Khasreen, M.M.; Banfill, P.F.G.; Menzies, G.F. Life-Cycle Assessment And The Environmental Impact Of Buildings: A Review. *Sustainability* **2009**, Doi:10.3390/Su1030674.
51. Castro-Lacouture, D.; Sefair, J.A.; Flórez, L.; Medaglia, A.L. Optimization Model For The Selection Of Materials Using A LEED-Based Green Building Rating System In Colombia. *Build. Environ.* **2009**, *44*, 1162–1170, Doi:https://doi.org/10.1016/J.Buildenv.2008.08.009.

- 
52. Cole, R.; Valdebenito, M. The Importation Of Building Environmental Certification Systems: International Usages Of BREEAM And LEED. *Build. Res. Inf.* **2013**, *41*, Doi:10.1080/09613218.2013.802115.
53. Rhein, S.; Sträter, K.F. Corporate Self-Commitments To Mitigate The Global Plastic Crisis: Recycling Rather Than Reduction And Reuse. *J. Clean. Prod.* **2021**, *296*, Doi:10.1016/J.Jclepro.2021.126571.
54. Pires, A.; Martinho, G. Waste Hierarchy Index For Circular Economy In Waste Management. *Waste Manag.* **2019**, *95*, 298–305, Doi:10.1016/J.WASMAN.2019.06.014.
55. Kadashevich, I.; Schneider, H.-J.; Stoyan, D. Statistical Modeling Of The Geometrical Structure Of The System Of Artificial Air Pores In Autoclaved Aerated Concrete. *Cem. Concr. Res.* **2005**, *35*, 1495–1502, Doi:10.1016/J.Cemconres.2004.10.010.
56. Kim, Y.Y.; Lee, K.M.; Bang, J.W.; Kwon, S.J. Effect Of W/C Ratio On Durability And Porosity In Cement Mortar With Constant Cement Amount. *Adv. Mater. Sci. Eng.* **2014**, *2014*, Doi:10.1155/2014/273460.
57. Arandigoyen, M.; Bernal, J.L.P.; López, M.A.B.; Alvarez, J.I. Lime-Pastes With Different Kneading Water: Pore Structure And Capillary Porosity. *Appl. Surf. Sci.* **2005**, *252*, 1449–1459, Doi:10.1016/J.Apsusc.2005.02.145.
58. Cuenca-Moyano, G.M.; Martín-Pascual, J.; Martín-Morales, M.; Valverde-Palacios, I.; Zamorano, M. Effects Of Water To Cement Ratio, Recycled Fine Aggregate And Air Entraining/Plasticizer Admixture On Masonry Mortar Properties. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *230*, 116929, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.116929.
59. Papayianni, I.; Stefanidou, M. Strength-Porosity Relationships In Lime-Pozzolan Mortars. *Constr. Build. Mater.* **2006**, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2005.02.012.
60. Bessey, G.E. Current Developments Affecting The Design And Use Of Mortars For Building Purposes. *J. Chem. Technol. & Biotechnol.* **1966**, *16*, 313–320.
61. Lollino, G.; Manconi, A.; Guzzetti, F.; Culshaw, M.; Bobrowsky, P.; Luino, F. Engineering Geology For Society And Territory – Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning And Landscape Exploitation. *Eng. Geol. Soc. Territ. - Vol. 5 Urban Geol. Sustain. Plan. Landsc. Exploit.* **2015**, 1–1400, Doi:10.1007/978-3-319-09048-1.
62. Quennoz, A.; Scrivener, K.L. Hydration Of C 3A-Gypsum Systems. *Cem. Concr. Res.* **2012**, *42*, 1032–1041, Doi:10.1016/J.Cemconres.2012.04.005.
63. Le, T.; Le Saout, G.; Garcia-Diaz, E.; Betrancourt, D.; Rémond, S. Hardened Behavior Of Mortar Based On Recycled Aggregate: Influence Of Saturation State At Macro- And Microscopic Scales. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *141*, 479–490, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2017.02.035.
64. Various Authors. *Specification For Mix Proportion Design Of Ordinary Concrete*; Beijing, **2011**.
65. Teychenné, R E Franklin, H.C.E. Design Of Normal Concrete Mixes. *Br* **1997**, *331*, 46.
66. Rao, G.A. Generalization Of Abrams' Law For Cement Mortars. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 495–502, Doi:https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00473-7.
67. Karade, S. Spreadsheet Applications In Building Material Research Studies. **2021**.
68. Blengini, G.; Garbarino, E. Demolizione Selettiva E Riciclaggio Nell'ottica Del Ciclo Di Vita. **2021**.
69. Badino; Blengini, G.; Garbarino, E. Analisi Tecnico-Economico-Ambientale Degli Aggregati Per L'industria Delle Costruzioni In Italia. Parte III: Valutazione Del Contributo Degli Aggregati Riciclati.; **2006**.

- 
70. Arandigoyen, M.; Alvarez, J.I. Pore Structure And Mechanical Properties Of Cement-Lime Mortars. *Cem. Concr. Res.* **2007**, *37*, 767–775, Doi:10.1016/J.Cemconres.2007.02.023.
71. Silva, B.A.; Ferreira Pinto, A.P.; Gomes, A. Natural Hydraulic Lime Versus Cement For Blended Lime Mortars For Restoration Works. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *94*, 346–360, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2015.06.058.
72. Pavlíková, M.; Zemanová, L.; Záleská, M.; Pokorný, J.; Lojka, M.; Jankovský, O.; Pavlík, Z. Ternary Blended Binder For Production Of A Novel Type Of Lightweight Repair Mortar. *Materials (Basel)*. **2019**, *12*, 1–15, Doi:10.3390/Ma12060996.
73. Loeb, A. Thermal Conductivity: VIII, A Theory Of Thermal Conductivity Of Porous Materials. *J. Am. Ceram. Soc.* **1954**, *37*, 96–99, Doi:Https://Doi.Org/10.1111/J.1551-2916.1954.Tb20107.X.
74. Collishaw, P.G.; Evans, J.R.G. An Assessment Of Expressions For The Apparent Thermal Conductivity Of Cellular Materials. *J. Mater. Sci.* **1994**, *29*, 486–498, Doi:10.1007/BF01162512.
75. Schmidt, R. Ceramic Materials Research Trends: Impedance Spectroscopy Of Electroceramics. *Novascience Publ.* **2007**.
76. Fleig, J.; Maier, J. A Finite Element Study On The Grain Boundary Impedance Of Different Microstructures. *J. Electrochem. Soc.* **1998**, *145*, 2081–2089, Doi:10.1149/1.1838600.
77. Gomes, M.G.; Flores-Colen, I.; Manga, L.M.; Soares, A.; De Brito, J. The Influence Of Moisture Content On The Thermal Conductivity Of External Thermal Mortars. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *135*, 279–286, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2016.12.166.
78. Salonvaara, M.; Karagiozis, A.; Holm, A. Stochastic Building Envelope Modeling: The Influence Of Material Properties.; **1995**.
79. Kim, K.-H.; Jeon, S.-E.; Kim, J.-K.; Yang, S. An Experimental Study On Thermal Conductivity Of Concrete. *Cem. Concr. Res.* **2003**, *33*, 363–371, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/S0008-8846(02)00965-1.
80. Mendes, J.C.; Barreto, R.R.; De Paula, A.C.B.; Elói, F.P. Da F.; Brigolini, G.J.; Peixoto, R.A.F. On The Relationship Between Morphology And Thermal Conductivity Of Cement-Based Composites. *Cem. Concr. Compos.* **2019**, *104*, 103365, Doi:10.1016/J.Cemconcomp.2019.103365.
81. Li, L.; Liu, W.; You, Q.; Chen, M.; Zeng, Q.; Zhou, C.; Zhang, M. Relationships Between Microstructure And Transport Properties In Mortar Containing Recycled Ceramic Powder. *J. Clean. Prod.* **2020**, *263*, 121384, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/J.Jclepro.2020.121384.
82. Mosquera, M.J.; Silva, B.; Prieto, B.; Ruiz-Herrera, E. Addition Of Cement To Lime-Based Mortars: Effect On Pore Structure And Vapor Transport. *Cem. Concr. Res.* **2006**, *36*, 1635–1642, Doi:10.1016/J.Cemconres.2004.10.041.
83. Banhart, J. Manufacture, Characterisation And Application Of Cellular Metals And Metal Foams. *Prog. Mater. Sci.* **2001**, *46*, 559–632, Doi:10.1016/S0079-6425(00)00002-5.
84. Iannace, S.; Verdolotti, L. La Storia Dei Materiali Cellulari Nell'ingegneria. **2015**, 195–203.
85. Chica, L.; Alzate, A. Cellular Concrete Review: New Trends For Application In Construction. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *200*, 637–647, Doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.136.
86. Ramamurthy, K.; Kunhanandan Nambiar, E.K.; Indu Siva Ranjani, G. A Classification Of Studies On Properties Of Foam Concrete. *Cem. Concr. Compos.* **2009**, *31*, 388–396, Doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.04.006.

- 
87. RILEM *Autoclaved Aerated Concrete – Properties, Testing And Design*; Aroni, S., De Groot, G., Robinson, M., Svanholm, G., Wittman, F., Eds.; E & FN SPON: Londra, 1993;
88. Schober, G. Porosity In Autoclaved Aerated Concrete (AAC): A Review On Pore Structure, Types Of Porosity, Measurement Methods And Effects Of Porosity On Properties. *Cem. Wapno, Bet.* **2011**, 351–359.
88. Zhu, J.; Zhang, R.; Zhang, Y.; He, F. The Fractal Characteristics Of Pore Size Distribution In Cement-Based Materials And Its Effect On Gas Permeability. *Sci. Rep.* 2019, 9, Doi:10.1038/S41598-019-53828-5.
89. Schober, G. The Most Important Aspects Of Microstructure Influencing Strength Of AAC. *Autoclaved Aerated Concr. Innov. Dev. - Proc. 4th Int. Conf. Autoclaved Aerated Concr.* **2005**, 145–153.
90. Bohner, E.; Ödeen, K. Durability Of Autoclaved Aerated Concrete. *Durab. Build. Mater. Components* **8** **1999**, 101–117.
91. Müllauer, W.; Beddoe, R.E.; Heinz, D. Sulfate Attack Expansion Mechanisms. *Cem. Concr. Res.* **2013**, 52, 208–215, Doi:https://Doi.Org/10.1016/J.Cemconres.2013.07.005.
92. Bergmans, J.; Nielsen, P.; Snellings, R.; Broos, K. Recycling Of Autoclaved Aerated Concrete In Floor Screeds: Sulfate Leaching Reduction By Ettringite Formation. *Constr. Build. Mater.* **2016**, 111, 9–14, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2016.02.075.
93. Fenyvesi, O.; Jankus, B. Opportunities In Recycling AAC Waste As Aggregate For Lightweight Concrete. *Epa. - J. Silic. Based Compos. Mater.* **2015**, 67, 66–70, Doi:10.14382/Epitoanyag-Jsbcm.2015.11.
94. Silva, R. V.; De Brito, J.; Dhir, R.K. Performance Of Cementitious Renderings And Masonry Mortars Containing Recycled Aggregates From Construction And Demolition Wastes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, 105, 400–415, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2015.12.171.
95. Chen, W.; Jin, R.; Xu, Y.; Wanatowski, D.; Li, B.; Yan, L.; Pan, Z.; Yang, Y. Adopting Recycled Aggregates As Sustainable Construction Materials: A Review Of The Scientific Literature. *Constr. Build. Mater.* **2019**, 218, 483–496, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.05.130.
96. Meek, A.H.; Elchalakani, M.; Beckett, C.T.S.; Grant, T. Alternative Stabilised Rammed Earth Materials Incorporating Recycled Waste And Industrial By-Products: Life Cycle Assessment. *Constr. Build. Mater.* **2021**, 267, 120997, Doi:https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2020.120997.
97. Gálvez-Martos, J.L.; Styles, D.; Schoenberger, H.; Zeschmar-Lahl, B. Construction And Demolition Waste Best Management Practice In Europe. *Resour. Conserv. Recycl.* **2018**, 136, 166–178, Doi:10.1016/J.Resconrec.2018.04.016.
98. Almeshal, I.; Tayeh, B.A.; Alyousef, R.; Alabduljabbar, H.; Mustafa Mohamed, A.; Alaskar, A. Use Of Recycled Plastic As Fine Aggregate In Cementitious Composites: A Review. *Constr. Build. Mater.* **2020**, 253, 119146, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2020.119146.
99. Dong, Q.; Wang, G.; Chen, X.; Tan, J.; Gu, X. Recycling Of Steel Slag Aggregate In Portland Cement Concrete: An Overview. *J. Clean. Prod.* **2021**, 282.
100. Saikia, N.; De Brito, J. Use Of Plastic Waste As Aggregate In Cement Mortar And Concrete Preparation: A Review. *Constr. Build. Mater.* **2012**, 34, 385–401.
101. Corinaldesi, V.; Giuggiolini, M.; Moriconi, G. Use Of Rubble From Building Demolition In Mortars. *Waste Manag.* **2002**, 22, 893–899.
102. Li, L.G.; Huang, Z.H.; Tan, Y.P.; Kwan, A.K.H.; Liu, F. Use Of Marble Dust As Paste Replacement For Recycling Waste And Improving Durability And Dimensional Stability Of Mortar. *Constr. Build. Mater.* **2018**, 166, 423–432, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2018.01.154.

- 
103. Raini, I.; Jabrane, R.; Mesrar, L.; Akdim, M. Evaluation Of Mortar Properties By Combining Concrete And Brick Wastes As Fine Aggregate. *Case Stud. Constr. Mater.* **2020**, *13*, E00434, Doi:10.1016/J.Cscm.2020.E00434.
104. Le, H.-B.; Bui, Q.-B. Recycled Aggregate Concretes – A State-Of-The-Art From The Microstructure To The Structural Performance. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *257*, 119522, Doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119522.
105. Xuan, D.X.; Schlangen, E.; Molenaar, A.A.A.; Houben, L.J.M. Influence Of Quality And Variation Of Recycled Masonry Aggregates On Failure Behavior Of Cement Treated Demolition Waste. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *71*, 521-527, Doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.079.
106. Debbarma, S.; Ransinchung R.N., G.D.; Singh, S.; Sahdeo, S.K. Utilization Of Industrial And Agricultural Wastes For Productions Of Sustainable Roller Compacted Concrete Pavement Mixes Containing Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *152*, 104504, Doi:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104504.
107. Harrison, E.; Berenjian, A.; Seifan, M. Recycling Of Waste Glass As Aggregate In Cement-Based Materials. *Environ. Sci. Ecotechnology* **2020**, *4*.
108. Moher, D.; Liberati, A.; Tetzlaff, J.; Altman, D.G. Preferred Reporting Items For Systematic Reviews And Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *BMJ* **2009**, *339*, 332–336, Doi:10.1136/Bmj.B2535.
109. Jiménez, J.R.; Ayuso, J.; López, M.; Fernández, J.M.; De Brito, J. Use Of Fine Recycled Aggregates From Ceramic Waste In Masonry Mortar Manufacturing. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 679-690, Doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.036.
110. Afroughsabet, V.; Biolzi, L.; Ozbakkaloglu, T. Influence Of Double Hooked-End Steel Fibers And Slag On Mechanical And Durability Properties Of High Performance Recycled Aggregate Concrete. *Compos. Struct.* **2017**, *181*, 273-284.
111. Meesala, C. Properties Of Recycled Aggregate And Recycled Aggregate Concrete: Effect Of Parent Concrete. *Asian J. Civ. Eng.* **2018**, *19*, Doi:10.1007/S42107-018-0011-X.
112. Kou, S.C.; Poon, C.S. Effect Of The Quality Of Parent Concrete On The Properties Of High Performance Recycled Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *77*, 501-508, Doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.035.
113. Zhang, J.; Shi, C.; Li, Y.; Pan, X.; Poon, C.S.; Xie, Z. Influence Of Carbonated Recycled Concrete Aggregate On Properties Of Cement Mortar. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *98*, 1-7, Doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.087.
114. Li, L.G.; Wang, Y.M.; Tan, Y.P.; Kwan, A.K.H. Filler Technology Of Adding Granite Dust To Reduce Cement Content And Increase Strength Of Mortar. *Powder Technol.* **2019**, *342*, 388-396, Doi:10.1016/j.powtec.2018.09.084.
115. Haach, V.G.; Vasconcelos, G.; Lourenço, P.B. Influence Of Aggregates Grading And Water/Cement Ratio In Workability And Hardened Properties Of Mortars. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 2980-2987, Doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011.
116. Jesus, S.; Maia, C.; Brazão Farinha, C.; De Brito, J.; Veiga, R. Rendering Mortars With Incorporation Of Very Fine Aggregates From Construction And Demolition Waste. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *229*, 116844, Doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116844.
117. Silva, S.; Evangelista, L.; De Brito, J. Durability And Shrinkage Performance Of Concrete Made With Coarse Multi-Recycled Concrete Aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *121645*, Doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121645.

- 
118. Lanzón, M.; Cnudde, V.; De Kock, T.; Dewanckele, J. Microstructural Examination And Potential Application Of Rendering Mortars Made Of Tire Rubber And Expanded Polystyrene Wastes. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *94*, 817-825, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2015.07.086.
119. Del Río Merino, M.; Santa Cruz Astorqui, J.; Villoria Sáez, P.; Santos Jiménez, R.; González Cortina, M. Eco Plaster Mortars With Addition Of Waste For High Hardness Coatings. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *158*, 649-656, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2017.10.037.
120. Thomas, C.; Setién, J.; Polanco, J.A.; Alaejos, P.; Sánchez De Juan, M. Durability Of Recycled Aggregate Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *40*, 1054-1065.
121. Olorunsogo, F.T.; Padayachee, N. Performance Of Recycled Aggregate Concrete Monitored By Durability Indexes. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 179-185, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/S0008-8846(01)00653-6.
122. Beltrán, M.; Agrela, F.; Barbudo, A.; Ayuso, J.; Ramírez, A. Mechanical And Durability Properties Of Concretes Manufactured With Biomass Bottom Ash And Recycled Coarse Aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *72*, 231–238, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2014.09.019.
123. Vidales, A.; Piña, C.; Del Río Merino, M.; Sánchez, E.; Viñas, C. Analysis Of The Feasibility Of The Use Of CDW As A Low-Environmental-Impact Aggregate In Conglomerates. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *178* (2018), Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2018.05.011.
124. Cuenca-Moyano, G.M.; Zanni, S.; Bonoli, A.; Valverde-Palacios, I. Development Of The Life Cycle Inventory Of Masonry Mortar Made Of Natural And Recycled Aggregates. *J. Clean. Prod.* **2017**, *140*, 1272–1286, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/J.Jclepro.2016.10.029.
125. Muñoz-Ruiperez, C.; Rodríguez, A.; Gutiérrez-González, S.; Calderón, V. Lightweight Masonry Mortars Made With Expanded Clay And Recycled Aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *118*, 139–145, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2016.05.065.
126. Lu, G.; Fan, Z.; Sun, Z.; Liu, P.; Leng, Z.; Wang, D.; Oeser, M. Improving The Polishing Resistance Of Cement Mortar By Using Recycled Ceramic. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *158*, 104796, Doi:10.1016/J.Resconrec.2020.104796.
127. Saiz Martínez, P.; González Cortina, M.; Fernández Martínez, F.; Rodríguez Sánchez, A. Comparative Study Of Three Types Of Fine Recycled Aggregates From Construction And Demolition Waste (CDW), And Their Use In Masonry Mortar Fabrication. *J. Clean. Prod.* **2016**, *118*, 162–169, Doi:10.1016/J.Jclepro.2016.01.059.
128. Santha Kumar, G. Influence Of Fluidity On Mechanical And Permeation Performances Of Recycled Aggregate Mortar. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *213*, 404-412.
129. Shi, C.; Wu, Z.; Cao, Z.; Ling, T.C.; Zheng, J. Performance Of Mortar Prepared With Recycled Concrete Aggregate Enhanced By CO₂ And Pozzolan Slurry. *Cem. Concr. Compos.* **2018**, *86*, 130-138, Doi:10.1016/J.Cemconcomp.2017.10.013.
130. Li, L.; Zhan, B.J.; Lu, J.; Poon, C.S. Systematic Evaluation Of The Effect Of Replacing River Sand By Different Particle Size Ranges Of Fine Recycled Concrete Aggregates (FRCA) In Cement Mortars. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *209*, 147-155, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.03.044.
131. Gonçalves, T.; Silva, R. V.; De Brito, J.; Fernández, J.M.; Esquinas, A.R. Mechanical And Durability Performance Of Mortars With Fine Recycled Concrete Aggregates And Reactive Magnesium Oxide As Partial Cement Replacement. *Cem. Concr. Compos.* **2020**, *105*, 1–10, Doi:10.1016/J.Cemconcomp.2019.103420.
132. Li, Z.; Liu, J.; Xiao, J.; Zhong, P. Internal Curing Effect Of Saturated Recycled Fine Aggregates In Early-Age Mortar. *Cem. Concr. Compos.* **2020**, *108*, 103444.

- 
133. Angelin, A.F.; Lintz, R.C.C.; Gachet-Barbosa, L.A.; Osório, W.R. The Effects Of Porosity On Mechanical Behavior And Water Absorption Of An Environmentally Friendly Cement Mortar With Recycled Rubber. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *151*, 534-545.
134. Gheni, A.A.; Alghazali, H.H.; Elgawady, M.A.; Myers, J.J.; Feys, D. Durability Properties Of Cleaner Cement Mortar With By-Products Of Tire Recycling. *J. Clean. Prod.* **2019**, *213*, 1135-1146, Doi:10.1016/J.Jclepro.2018.12.260.
135. Boukour, S.; Benmalek, M.L. Performance Evaluation Of A Resinous Cement Mortar Modified With Crushed Clay Brick And Tire Rubber Aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *120*, 473-481, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2016.05.119.
136. Koksall, F.; Mutluay, E.; Gencel, O. Characteristics Of Isolation Mortars Produced With Expanded Vermiculite And Waste Expanded Polystyrene. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *236*, 117789, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.117789.
137. Xu, F.; Peng, C.; Zhu, J.; Chen, J. Design And Evaluation Of Polyester Fiber And SBR Latex Compound-Modified Perlite Mortar With Rubber Powder. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *127*, 751-761, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2016.10.060.
138. Corinaldesi, V.; Mazzoli, A.; Siddique, R. Characterization Of Lightweight Mortars Containing Wood Processing By-Products Waste. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *123*, 281-289, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2016.07.011.
139. Li, L.; Liu, W.; You, Q.; Chen, M.; Zeng, Q.; Zhou, C.; Zhang, M. Relationships Between Microstructure And Transport Properties In Mortar Containing Recycled Ceramic Powder. *J. Clean. Prod.* **2020**, *263*, Doi:10.1016/J.Jclepro.2020.121384.
140. Contrafatto, L.; Lazzaro Danzuso, C.; Gazzo, S.; Greco, L. Physical, Mechanical And Thermal Properties Of Lightweight Insulating Mortar With Recycled Etna Volcanic Aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *240*, 117917, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.117917.
141. Liu, Q.; Singh, A.; Xiao, J.; Li, B.; Tam, V.W. Workability And Mechanical Properties Of Mortar Containing Recycled Sand From Aerated Concrete Blocks And Sintered Clay Bricks. *Resour. Conserv. Recycl.* **2020**, *157*, 104728, Doi:10.1016/J.Resconrec.2020.104728.
142. Hanžič, H.; Mautinger, A.; Jurič, B.; Oliveira, L. Water Retention Capability Of Mortars Made Of Recycled Aggregate. In Proceedings Of The SB08 World Sustainable Building Conference; 2008; Pp. 615–621.
143. Nicolella, M.; Scognamillo, C.; Vitale, F. Valutazione Comparativa Delle Prestazioni Meccaniche Di Malte Confezionate Con Inerti Da Riciclo. In Proceedings Of The Colloquiate 2020; Cascone, S.M., Margani, G., Sapienza, V., Eds.; Edicom Edizioni, 2020; Pp. 742–756.
144. Nicolella, M. Durability Of Thermal Plasters Made With Recycled Materials. *Concrete* **2018**, *326*, 45.1-45.12.
145. Martínez, I.; Etxebarria, M.; Pavón, E.; Díaz, N. A Comparative Analysis Of The Properties Of Recycled And Natural Aggregate In Masonry Mortars. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *49*, 384–392, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2013.08.049.
146. Senhadji, Y.; Siad, H.; Escadeillas, G.; Benosman, A.S.; Chihaoui, R.; Mouli, M.; Lachemi, M. Physical, Mechanical And Thermal Properties Of Lightweight Composite Mortars Containing Recycled Polyvinyl Chloride. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *195*, 198–207, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2018.11.070.
147. Corinaldesi, V.; Moriconi, G. Behaviour Of Cementitious Mortars Containing Different Kinds Of Recycled Aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 289–294, Doi:https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2007.12.006.

- 
148. Soares, A.; Julio, M.; Flores-Colen, I.; Ilharco, L.; De Brito, J.; Gaspar Martinho, J. Water-Resistance Of Mortars With Lightweight Aggregates. *Key Eng. Mater.* **2015**, *634*, 46–53, Doi:10.4028/Www.Scientific.Net/KEM.634.46.
149. Roque, S.; Maia Pederneiras, C.; Farinha, C.B.; De Brito, J.; Veiga, R. Concrete-Based And Mixed Waste Aggregates In Rendering Mortars. **2020**.
150. Nepomuceno, M.C.S.; Pereira-De-Oliveira, L.A.; Pereira, S.F. Mix Design Of Structural Lightweight Self-Compacting Concrete Incorporating Coarse Lightweight Expanded Clay Aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *166*, 373–385, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2018.01.161.
151. Nepomuceno, M.C.S.; Isidoro, R.A.S.; Catarino, J.P.G. Mechanical Performance Evaluation Of Concrete Made With Recycled Ceramic Coarse Aggregates From Industrial Brick Waste. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *165*, 284–294, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2018.01.052.
152. Torres, M.L.; García-Ruiz, P.A. Lightweight Pozzolanic Materials Used In Mortars: Evaluation Of Their Influence On Density, Mechanical Strength And Water Absorption. *Cem. Concr. Compos.* **2009**, *31*, 114–119, Doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2008.11.003.
153. Juan-Valdés, A.; Rodríguez-Robles, D.; García-González, J.; Sánchez De Rojas Gómez, M.I.; Ignacio Guerra-Romero, M.; De Belie, N.; Morán-Del Pozo, J.M. Mechanical And Microstructural Properties Of Recycled Concretes Mixed With Ceramic Recycled Cement And Secondary Recycled Aggregates. A Viable Option For Future Concrete. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *270*, 121455, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2020.121455.
154. López-Alonso, M.; Martínez-Echevarria, M.J.; Garach, L.; Galán, A.; Ordoñez, J.; Agrela, F. Feasible Use Of Recycled Alumina Combined With Recycled Aggregates In Road Construction. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *195*, 249–257, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2018.11.084.
155. Arandigoyen, M.; Alvarez, J.I. Blended Pastes Of Cement And Lime: Pore Structure And Capillary Porosity. *Appl. Surf. Sci.* **2006**, *252*, 8077–8085, Doi:10.1016/J.Apsusc.2005.10.019.
156. Ambroise, J.; Péra, J. Immobilization Of Calcium Sulfate Contained In Demolition Waste. *J. Hazard. Mater.* **2008**, *151*, 840–846, Doi:10.1016/J.Jhazmat.2007.11.076.
157. Mosquera, M.J.; Benítez, D.; Perry, S.H. Pore Structure In Mortars Applied On Restoration: Effect On Properties Relevant To Decay Of Granite Buildings. *Cem. Concr. Res.* **2002**, *32*, 1883–1888, Doi:10.1016/S0008-8846(02)00887-6.
158. Ferreira, R.L.S.; Anjos, M.A.S.; Ledesma, E.F.; Pereira, J.E.S.; Nóbrega, A.K.C. Evaluation Of The Physical-Mechanical Properties Of Cement-Lime Based Masonry Mortars Produced With Mixed Recycled Aggregates. *Mater. Constr.* **2020**, *70*, Doi:10.3989/Mc.2020.02819.
159. Matias, G.; Torres, I.; Rei, F.; Gomes, F. Analysis Of The Functional Performance Of Different Mortars With Incorporated Residues. *J. Build. Eng.* **2020**, *29*, 101150, Doi:10.1016/J.Jobe.2019.101150.
160. Maruyama, I.; Rymeš, J.; Aili, A.; Sawada, S.; Kontani, O.; Ueda, S.; Shimamoto, R. Long-Term Use Of Modern Portland Cement Concrete: The Impact Of Al-Tobermorite Formation. *Mater. Des.* **2021**, *198*, 109297, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/J.Matdes.2020.109297.
161. Lan, H.; Zhang, Y.; Cheng, M.; Li, Y.; Jing, Z. An Intelligent Humidity Regulation Material Hydrothermally Synthesized From Ceramic Waste. *J. Build. Eng.* **2021**, *40*, 102336, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/J.Jobe.2021.102336.
162. Ferreira, R.L.S.; Anjos, M.A.S.; Nóbrega, A.K.C.; Pereira, J.E.S.; Ledesma, E.F. The Role Of Powder Content Of The Recycled Aggregates Of CDW In The Behaviour Of Rendering Mortars. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *208*, 601–612, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/J.Conbuildmat.2019.03.058.

- 
163. Saiz-Martínez, P.; González-Cortina, M.; Fernández-Martínez, F. Characterization And Influence Of Fine Recycled Aggregates On Masonry Mortars Properties. *Mater. Constr.* **2015**, *65*, 1–10, Doi:10.3989/Mc.2015.06014.
164. Oliveira, R.; De Brito, J.; Veiga, R. Reduction Of The Cement Content In Rendering Mortars With Fine Glass Aggregates. *J. Clean. Prod.* **2015**, *95*, 75–88, Doi:10.1016/J.Jclepro.2015.02.049.
165. Fusade, L.; Viles, H.A.; Wood, C.; Burns, C. The Effect Of Wood Ash On The Properties And Durability Of Lime Mortar For Repointing Damp Historic Buildings. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *212*, 500–513, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2019.03.326.
166. Walker, R.; Pavia, S. Influence Of The Type Of Binder On The Properties Of Lime-Hemp Concrete. In Proceedings Of The 2nd International Conference On Construction And Building Research; 2012.
167. Boumiz, A.; Vernet, C.; Tenoudji, F.C. Mechanical Properties Of Cement Pastes And Mortars At Early Ages: Evolution With Time And Degree Of Hydration. *Adv. Cem. Based Mater.* **1996**, *3*, 94–106, Doi:Https://Doi.Org/10.1016/S1065-7355(96)90042-5.
168. Xiaoyu, G.; Yingfang, F.; Haiyang, L. The Compressive Behavior Of Cement Mortar With The Addition Of Nano Metakaolin. *Nanomater. Nanotechnol.* **2018**, *8*, 1847980418755599, Doi:10.1177/1847980418755599.
169. Yang, J.; Du, Q.; Bao, Y. Concrete With Recycled Concrete Aggregate And Crushed Clay Bricks. *Constr. Build. Mater.* **2011**, *25*, 1935-1945.
170. Ikponmwo, E.; Ehikhuenmen, S. The Effect Of Ceramic Waste As Coarse Aggregate On Strength Properties Of Concrete. *Niger. J. Technol.* **2017**, *36*, 691–696, Doi:10.4314/Njt.V36i3.5.
171. Stefanidou, M.; Anastasiou, E.; Georgiadis Filikas, K. Recycled Sand In Lime-Based Mortars. *Waste Manag.* **2014**, *34*, Doi:10.1016/J.Wasman.2014.09.005.
172. Dang, J.; Zhao, J.; Hu, W.; Du, Z.; Gao, D. Properties Of Mortar With Waste Clay Bricks As Fine Aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *166*, 898-907.
173. García-González, J.; Rodríguez-Robles, D.; Juan-Valdés, A.; Morán-Del Pozo, J.M.; Guerra-Romero, M.I. Pre-Saturation Technique Of The Recycled Aggregates: Solution To The Water Absorption Drawback In The Recycled Concrete Manufacture. *Mater. (Basel, Switzerland)* **2014**, *7*, 6224–6236, Doi:10.3390/Ma7096224.
174. De Oliveira Andrade, J.J.; Possan, E.; Squiavon, J.Z.; Ortolan, T.L.P. Evaluation Of Mechanical Properties And Carbonation Of Mortars Produced With Construction And Demolition Waste. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *161*, 70–83, Doi:10.1016/J.Conbuildmat.2017.11.089.
175. Corinaldesi, V.; Moriconi, G. Behaviour Of Cementitious Mortars Containing Different Kinds Of Recycled Aggregate. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 289-294.
176. Haddad, L.D. De O.; Neves, R.R.; Oliveira, P.V. De; Santos, W.J. Dos; Carvalho Junior, A.N. De Influence Of Particle Shape And Size Distribution On Coating Mortar Properties. *J. Mater. Res. Technol.* **2020**, *9*, 9299–9314, Doi:10.1016/J.Jmrt.2020.06.068.