Scuola universitaria professionale
della Svizzera italiana
SUPSI

SCARTI DI CAVA PER LA PRODUZIONE DI CONGLOMERATI SOSTENIBILI E TECNOLOGICAMENTE INNOVATIVI

Una tecnologia per la produzione di manufatti ad alto valore aggiunto mediante *stampa digitale 3D*

RAPPORTO INTERNO FINALE

Ricercatori – Filippo Luca Schenker (DACD-IST), Victor Blazquez (DEASS), Samuel Antonietti (DACD-IMC), Stefano Zerbi (DACD-IMC), Luigi Coppola (DACD-IMC), Chiara Bernardi (DEASS), Marco Lurati (DACD-LCV), Maurizio Pozzoni (DACD-IST), Federico Corboud (DEASS), Domenico Ferrari (DEASS), Christian Ambrosi (DACD-IST)

Riassunto

In questo studio sono state valute le condizioni tecniche ed economiche per lo sviluppo sostenibile nel settore dell'edilizia ticinese degli scarti di cava locali attraverso il loro utilizzo in conglomerati tradizionali come calcestruzzi e malte cementizie ma anche in conglomerati innovativi per stampe 3D. La caratterizzazione del materiale e le analisi sui conglomerati tradizionali hanno messo alla luce che, tagliati con almeno 30% di aggregato alluvionale, gli aggregati di scarto di cava possono essere usati nella maggior parte degli impieghi edili. Un conglomerato cementizio con 100% di aggregato di scarto di cava ticinese ha delle limitazioni nella durabilità e nella lavorabilità. I conglomerati innovativi sempre ottenuti dalla frantumazione di scarto di cava sono stati sperimentati su 3 tipologie di stampa (2 in collaborazione con l'ETHZ): (i) *a estrusione di malta cementizia* - la tecnica con più potenziale di assorbire grossi volumi di scarto che però, per il momento, necessita di un investimento di capitale e di risorse umane che per un'impresa edile con un mercato locale è poco sostenibile; (ii) *a reazione di geopolimeri* - una tecnica agli albori con ancora grandi incertezze sul materiale e sul suo sviluppo industriale (performance della stampante e costi di produzione), nonostante ciò si intravvede una potenziale opportunità di business nell'ambito della produzioni di elementi di facciata altamente personalizzati; (iii) *del cassero con polimeri plastici rPLA e getto della malta cementizia* – la tecnica può essere implementata per la produzione ripetuta di piccoli elementi (<1m) dagli attori del settore con un investimento minimo, ma l'utilizzo di resine plastiche rende la tecnica poco ecologica.

Dalla mappatura della filiera dello scarto e dall'analisi economica si è evinto che (i) l'attuale non utilizzo di aggregati di scarto di cava nell'edilizia ticinese è dovuto alla forte concorrenza economica degli aggregati italiani e non a problemi di qualità del materiale; (ii) l'attuale filiera può fornire aggregati di cava per conglomerati cementizi innovativi sfruttando un canale esistente dei frantumatori; (iii) gli attori che più approfitterebbero dallo sviluppo di queste tecniche 3D sono i cavisti e i costruttori di prefabbricati. Per i primi il prodotto stampato rimane nel mercato della pietra naturale ed è una rivalorizzazione di qualcosa che attualmente è un costo. Per i secondi, il prodotto potrebbe essere utilizzato per personalizzare interni ed esterni di edifici costruiti con elementi prefabbricati, diventando in questo modo più competitivi.

INDICE

Riassunto 2
1. Introduzione 5
1.1. Panoramica delle stampe 3D nel mondo dell'edilizia 5
1.2. Sfide scientifiche interdisciplinari 6
1.3. Impatto sulla società 7
2. Approccio metodologico 7
3. Studi di dettaglio della caratterizzazione del materiale di scarto 9
3.1. Caratterizzazione mineralogica 10
3.1.1. Metodo 10
3.1.2. Risultati 11
Cava E. Pollini – Campione EP 11
Cava Bettazza – Campione MB 11
Cava Pollini (Cevio)– Campione PG 12
Cava Ongaro – Campione ONG 12
Cava Bignasca – Campione BIG 12
Cava Legiuna – Campione LEG 13
Cava Polti – Campione PO 13
3.1.1. Valutazione complessiva sul contenuto mineralogico degli gneiss 13
3.2. Distribuzione granulometrica 14
3.2.1. Metodo 14
3.2.2. Risultati 14
3.2.1. Valutazione finale sulle curve granulometriche degli scarti di cava di gneiss 15
3.3. Prove d'assorbimento di acqua nell'aggregato 15
3.3.1. Metodo 15
3.3.2. Risultati 15
3.3.3. Valutazione finale sulle prove d'assorbimento 16
3.4. Reattività potenziale agli alcali (test microbar) 16
3.4.1. Metodo 16
3.4.2. Risultati 16
3.4.3. Valutazione finale reattività potenziale agli alcali 17
4. Produzione di calcestruzzi e di geopolimeri 17
4.1. Malte cementizie e calcestruzzi tradizionali 17
4.1.1 Metodo 17
4.1.2 Risultati 18
4.1.3. Valutazioni finale sulle malte cementizie e calcestruzzi 19
4.2.Stampa 3D a estrusione di malte cementizie 20
4.2.1. Materiali e metodi 21
4.2.2. Valutazioni finali sulla tecnica a estrusione di malte cementizie 21
4.3. Stampa 3D a reazione di geopolimeri 21

4.3.1. Materiali e metodi 22
4.3.2. Risultati 23
4.3.3. Valutazioni finale sulla tecnica di stampa a geopolimero 27
4.4. Stampa 3D del cassero con polimero plastico rPLA e getto della malta cementizia 27
4.4.1. Materiali 28
4.4.2. Metodi e Risultati 29
4.4.3. Valutazioni finale sulla tecnica di stampa a polimero plastico rPLA e getto della malta cementizia 30
5. Impiego delle stampe 3D nell'ambiente costruito: valutazione strutturale-architettonica 31
5.1 Calcestruzzi e pietre artificiali 31
5.2 Calcestruzzo e stampa 3D 32
5.3 Possibili impieghi nell'edilizia 33
6. Incontri e discussioni con i stakeholder 34
7. Panoramica sulla filiera dell'utilizzo degli scarti di cava 35
8. Valutazione economica: filiera di lavoro, keyplayer, etc. 39
9. Discussioni e valutazioni generali dello studio derivanti dell'approccio condiviso 40
10. Conclusioni e possibili scenari di sviluppo del progetto 42
Referenze bibliografiche 43

1. Introduzione

Lo studio nasce dall'esigenza di incentivare lo sviluppo sostenibile delle materie prime e l'economia circolare attorno agli scarti di cava di gneiss locali (sotto forma di aggregati) nella quale le aziende dei settori lapideo e delle costruzioni possano operare intelligentemente con tecnologie innovative e rispettando l'ambiente. I fondi di questa ricerca derivano dai finanziamenti interni alla ricerca SUPSI 2019 ottenuti attraverso un bando di concorso competitivo.

Negli ultimi anni nell'industria del calcestruzzo ticinese si è constatato una diminuzione, o il totale abbandono, dell'impiego di aggregati locali derivati da scarti di cava. Tale diminuzione è da attribuire a un calo dei prezzi degli aggregati provenienti dall'Italia (vedi Cap. 8) e a qualche criticità tecniche nell'impiego di questi aggregati di scarto (vedi Cap. 3). Legato a questi aspetti, nel mondo dell'edilizia ticinese esiste la convinzione che gli scarti di cava ticinesi generano aggregati di pessima qualità (sia dal punto di vista meccanico sia di durabilità). Per sfatare questo luogo comune, in questo studio ci sono voluti quasi otto mesi di analisi per dimostrare che in realtà il materiale è buono, non eccellente, ma comunque capace di produrre calcestruzzi idonei per la maggior parte degli impieghi nell'edilizia. Quindi, oltre che a rivalutare le caratteristiche dei calcestruzzi tradizionali prodotti con tali aggregati, l'obbiettivo principale di questo progetto era di sviluppare dei conglomerati innovativi (malte cementizie e geopolimeri) atti alla stampa 3D per elementi architettonici ad alto valore aggiunto. I risultati e il sapere generati in questo progetto sono stati trasferiti in maniera diretta ai vari attori aziendali durante lo svolgimento del progetto e continueranno anche a fine progetto.

1.1. Panoramica delle stampe 3D nel mondo dell'edilizia

Nell'edilizia la tecnologia delle stampanti 3D si sta sviluppando rapidamente prefiggendosi di rivoluzionare il settore della costruzione attraverso la creazione di elementi architettonici non standardizzati da modelli digitali. Sebbene le stampanti sembrano mature per l'impiego industriale, il loro utilizzo e sviluppo si è affermato solo in alcuni sedi di ricerca (vedi cobod.com; xtree.eu; cybe.eu; dbt.arch.ethz.ch; themobbot.com). Il motivo per cui questa tecnologia fatica a prendere piede nel settore risiede molto probabilmente alle forti incertezze sia tecnica legata ai nuovi materiali sia economica legata alla dimensione del mercato del prodotto, come pure all'elevato know-how interdisciplinare da acquisire. In questo contesto, la fattibilità tecnica che proporremo in questo studio deve servire da rampa di lancio per un'industria edile specializzata nel produrre elementi architettonici con queste tecniche innovative.
Da un punto di vista della robotica esistono principalmente 3 tecniche di stampa (de Laubier et al. 2017): a estrusione di materiale (material extrusion), ad adesione di materiale (powder bonding) e a produzione additiva con Wire + Arc (Wire Arc additive manufactory). Ad oggi, l'industria della costruzione ha adottato 6 applicazioni principali per la stampa 3D: edifici, ponti, casseri, elementi architettonici non strutturali, modelli architettonici a scala ridotta e design d'interni. In questo studio, per la parte di sperimentazione di stampanti 3D, abbiamo testato e valutato l'impiego di aggregati di scarto di cava con 3 tecniche di stampa:

Figura 1 Tre tecniche di stampa 3D esplorati in questo progetto: 1) stampa 3D a estrusione di malte cementizie (fused deposition modelling), 2) stampa a reazione del geopolimero (powder bed binder jetting) e 3) stampa del cassero con polimero plastico o silicone e getto di silicone.

- ***Stampa a estrusione di malte cementizie*** **(Fig. 1a)**
  L'elemento architettonico viene stampato attraverso l'emissione di malte cementizie premiscelate da una testina di stampa posizionata alle estremità di un braccio meccanico robotizzato e connessa a un sistema di pompaggio. Questa tecnica è stata testata al Politecnico federale di Zurigo (ETHZ).

- ***Stampa a reazione di geopolimeri (*****Fig. 1b*****)***
  L'elemento architettonico risulta dalla solidificazione di un legante che si forma dalla reazione di metacaolino, che viene mischiato agli aggregati, con una soluzione liquida di silicato di potassio. In questa tecnica la stampante deposita prima uno strato di aggregato mischiato al metacaolino e poi inietta la soluzione basica all'interno dello strato attraverso la testina del braccio meccanico. La reazione con il metacaolino che genera il legante solido, chiamato geopolimero, avviene nel volume dello strato penetrato dal silicato di potassio. Dopo un primo passaggio, la stampante deposita un secondo strato di aggregati e metacaolino, a cui segue di nuovo l'iniezione del legante. L'unione dei volumi reattivi creano l'elemento 3D. L'aggregato con metacaolino non reattivo verrà asportato alla fine della stampa e riutilizzato. Questa tecnica è stata concepita e sviluppata dal Politecnico federale di Zurigo (ETHZ).

- ***Stampa del cassero con polimero plastico rPLA e getto della malta cementizia (*****Fig. 1c*****)***
  L'elemento architettonico risulta dal getto "tradizionale" di una malta cementizia in un cassero stampato con una stampante 3D a polimeri plastici. Questa tecnica è stata sviluppata e testata in SUPSI nel corso di questo progetto.

1.2. Sfide scientifiche interdisciplinari

Problemi tecnologici legati al materiale
La malta cementizia per stampanti 3D deve possedere proprietà reologiche, elasto-meccaniche e di durabilità, come, ad esempio, il rapporto tra viscosità e massa volumica dell'impasto allo stato fresco, diverse da quelle richieste per i tradizionali conglomerati cementizi. Di fatto, durante la posa a strati delle stampanti 3D l'impasto deve reggere il peso degli strati applicati successivamente per mantenere la forma dell'elemento architettonico. Queste proprietà debbono essere conseguite mantenendo la resistenza meccanica e riducendo al minimo l'impatto ambientale attraverso la riduzione nella produzione di calcestruzzo di materie prime naturali non rinnovabili.
Inoltre in questo studio, abbiamo sperimentato la stampa 3D con geopolimeri. In questa tecnica di stampa sperimentale le criticità risiedono nei processi chimici e nei tempi di reazione tra un reagente solido mischiato agli aggregati e uno liquido depositato negli aggregati con un braccio meccanico.
Questo studio ha cercato di dare soluzioni a questi problemi (di proprietà reologiche, elasto-meccaniche e di durabilità) per creare un conglomerato innovativo e performante per stampanti 3D con materiale di scarto locale. Inoltre, sono stati considerati aspetti estetici, di stabilità e di durabilità del materiale.

Problemi aziendali, territoriali ed ecologici
Il settore lapideo è fondamentale per l'occupazione e l'economia valligiana ticinese; nel 2011 si contavano 35-40 imprese del settore con 300 persone impiegate. In un recente studio DACD-DEASS (2018) nel comparto estrattivo nei comuni di Maggia e Cevio si è potuto calcolare che il volume di pietra naturale ancora estraibile può garantire l'attività delle cave in Vallemaggia per oltre 30 anni. Ciò nonostante il settore lapideo è in crisi. Tra le varie cause, ci sono i costi di gestione degli scarti che gravano fortemente sulla gestione aziendale. Esiste quindi una forte esigenza da parte degli imprenditori di una soluzione alternativa all'utilizzo di questi importanti volumi di scarto. Lo scarto genera poi dei problemi di spazio in quanto, a livello cantonale, è entrata in vigore la scheda "V8 – Cave" del piano direttore che chiede più protezione della natura e ridefinizione delle aree lavorative e del piano del traffico. Gli scarti di cava rientrano pure nelle tematiche della scheda "V6 – Approvvigionamento di materiali inerti" e della scheda "V7 – Discariche" del Piano direttore cantonale; da qui l'interesse della Sezione dello Sviluppo Territoriale (SST) cantonale (lettera

di raccomandazione al proposal). Quindi, lo sviluppo del materiale prevede il riutilizzo in una modalità ad alto valore aggiunto dello scarto da estrazione che per le aziende del settore lapideo ha un alto costo di gestione.

Problematica scientifica-economica
L'esplorazione di opportunità di business legate ad avanzamenti di carattere tecnologico è particolarmente insidiosa poiché molteplici elementi di incertezza si sovrappongono tra loro: l'incertezza tecnica e tecnologica si sovrappone alle incertezze relative alla dimensione commerciale ed economica dell'innovazione.
L'ordine logico con il quale districare tale groviglio è tutt'altro che chiaro: esplorare dapprima le questioni tecnologiche senza nessuna consapevolezza della dimensione economica, senza escludere dunque nessuna possibile direzione? Esplorare prima le opportunità in termini di business senza nessuna consapevolezza dei limiti che le attuali conoscenze tecniche pongono? La scelta di un'opzione rispetto all'altra non è neutra e priva di conseguenze e non tutte le direzioni possono essere convenientemente e contemporaneamente esplorate. La "paralisi da analisi" rappresenta uno dei maggiori ostacoli all'innovazione e all'iniziativa imprenditoriale.
Il progetto in oggetto è stato un caso di studio per sviluppare un metodo pragmatico per l'esplorazione di opportunità di business caratterizzate da una rilevante incertezza tecnica e tecnologica.

1.3. Impatto sulla società

Il progetto è ancorato nel territorio in una regione periferica e ha un potenziale innovativo e commerciale. I risultati e l'innovazione tecnologica di questo progetto sono stati e verranno condivisi con i principali *stakeholder* del settore e con i partner territoriali. L'eventuale rilancio tecnologico associato (computer design, nuovi materiali e nuove tecniche di costruzione 3D) può creare nuove figure professionali. Inoltre, il progetto sostiene l'utilizzo intelligente dell'ambiente e incentiva lo sviluppo sostenibile delle materie prime e l'economia circolare.
Dai dati forniti nel rapporto Cave DACD-DEASS (2018) nel comparto estrattivo nei comuni di Maggia e Cevio si stima che i volumi di scarto possono potenzialmente costituire da 1/5 a un 1/6 del fabbisogno cantonale annuo di aggregati per calcestruzzo. Se si aggiungono pure gli scarti di altri comparti estrattivi del Canton Ticino e del Moesano (di cui non conosciamo le stime) i volumi di aggregati potenzialmente generabili potranno aumentare in maniera considerevole. Quindi, un'eventuale industria basata sul riciclo degli scarti di cave in Ticino potrebbe contribuire in maniera sostanziale al fabbisogno di aggregati per l'edilizia e ridurrebbe in maniera drastica l'impatto ambientale del settore della costruzione.

2. Approccio metodologico

Lo studio interdisciplinare condotto segue un approccio di analisi di tipo empirico attraverso l'analisi di conglomerati cementizi tradizionali e innovativi, stabili, esteticamente interessanti e *environmentally friendly* partendo da scarti di cava per incentivare un'industria legata al riciclo di materie prime. Questo studio è suddiviso in 3 parti esecutive (Fig. 2) che tra di loro hanno dei nodi di incontro. I dettagli sui metodi utilizzati si trovano nei rispettivi capitoli.

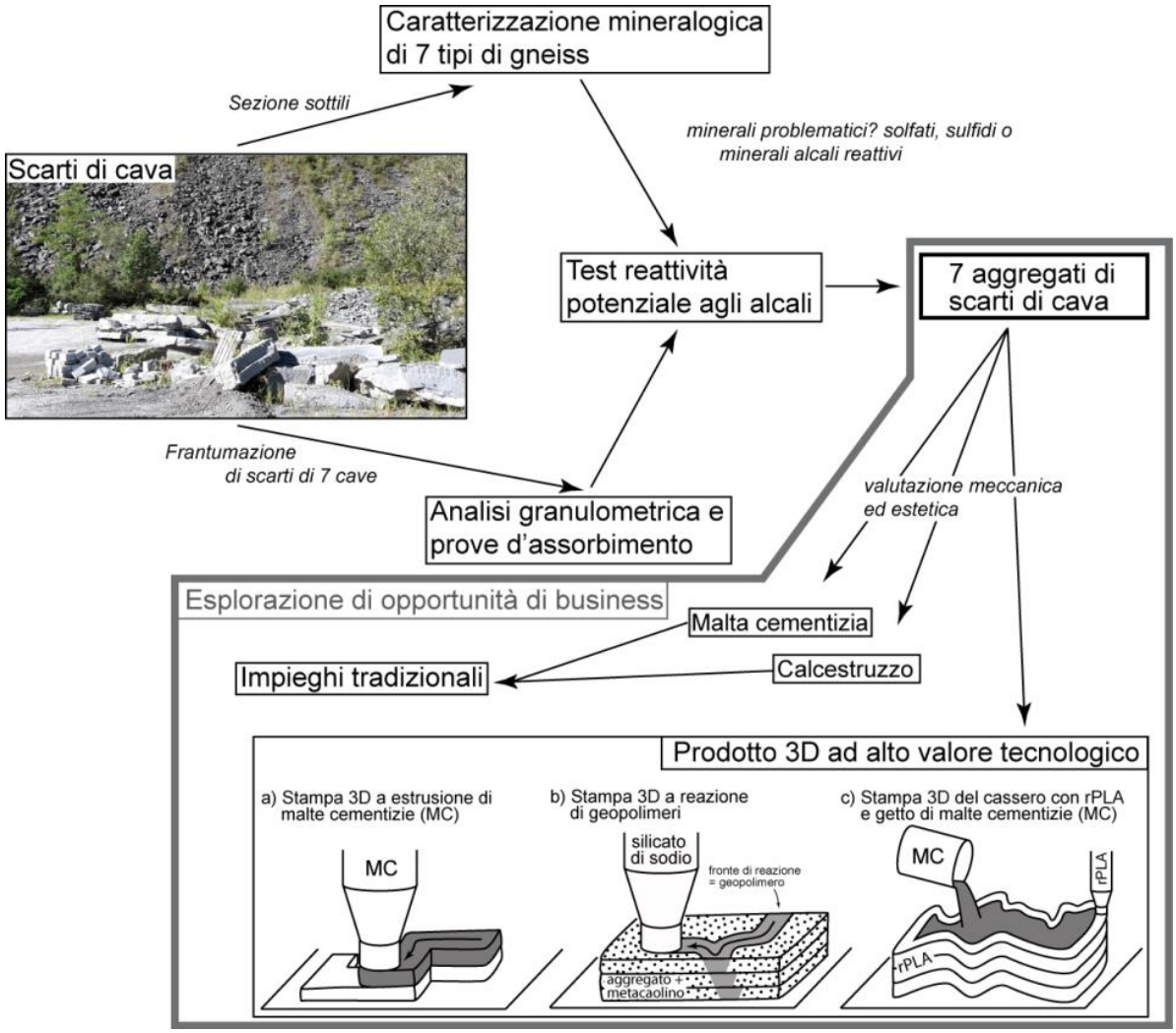

Figura 2 Flusso di lavoro delle indagini di questo progetto

1. *Caratterizzazione del materiale* per accertare l'idoneità degli aggregati:
(a) campionatura degli scarti in più comparti d'estrazione (Ticino e Moesano) secondo i differenti tipi di gneiss. In tutto sono stati campionato 7 tipi di gneiss da altrettante cave; (b) studio petrografico di dettaglio (sezioni sottili) dei diversi tipi di gneiss e dei minerali nelle fratture per caratterizzare i vari tipi di scarto. Particolare attenzione è stata data alla presenza di minerali alcali-reattivi, di solfati e di solfuri; (c) frantumazione di 7 tipi di gneiss e studio granulometrico; (e) prove di potenziale reazione agli alcali (microbar test).

2. *Produzione di calcestruzzi* tradizionali, malte cementizie e sviluppo di materiale per stampe di prototipi in 3D. La parte dei test con la stampe 3D è stata condotta in collaborazione con il Politecnico federale di Zurigo e con il FabLab SUPSI.

3. *Mappatura della filiera* di produzione di scarti di cava:
(a) interviste con gli attori del settore (cavisti, produttori di aggregati e produttori di calcestruzzo); (b) identificazione dei nodi cruciali; (c) costi del prodotto lungo la filiera; (d) analisi economica.

3. Studi di dettaglio della caratterizzazione del materiale di scarto

Per lo studio degli aggregati di scarto di cava sono state selezionate 7 cave in Ticino e nel Moesano (Fig. 3). Sono stati campionati scarti di elaborazione della pietra naturale di dimensione tra i 40 e 5 cm. Il campione PO era invece un frantumato di scarti di cava di 32-16 mm. I criteri di scelta si sono basati sulla tipologia di materiale estratto, ovvero secondo la tipologia di gneiss. Le cave considerate in questo studio sono la cava E. Pollini in Val Onsernone (EP), la cava Bettazza in Vallemaggia (MB), la cava Pollini in Vallemaggia (PG), la Cava Ongaro “Bodio Nero” in Riviera (ONG), la cava Bignasca in Riviera (BIG), la cava Legiuna in Valle di Blenio (LEG) e la cava Polti in Val Calanca (PO).

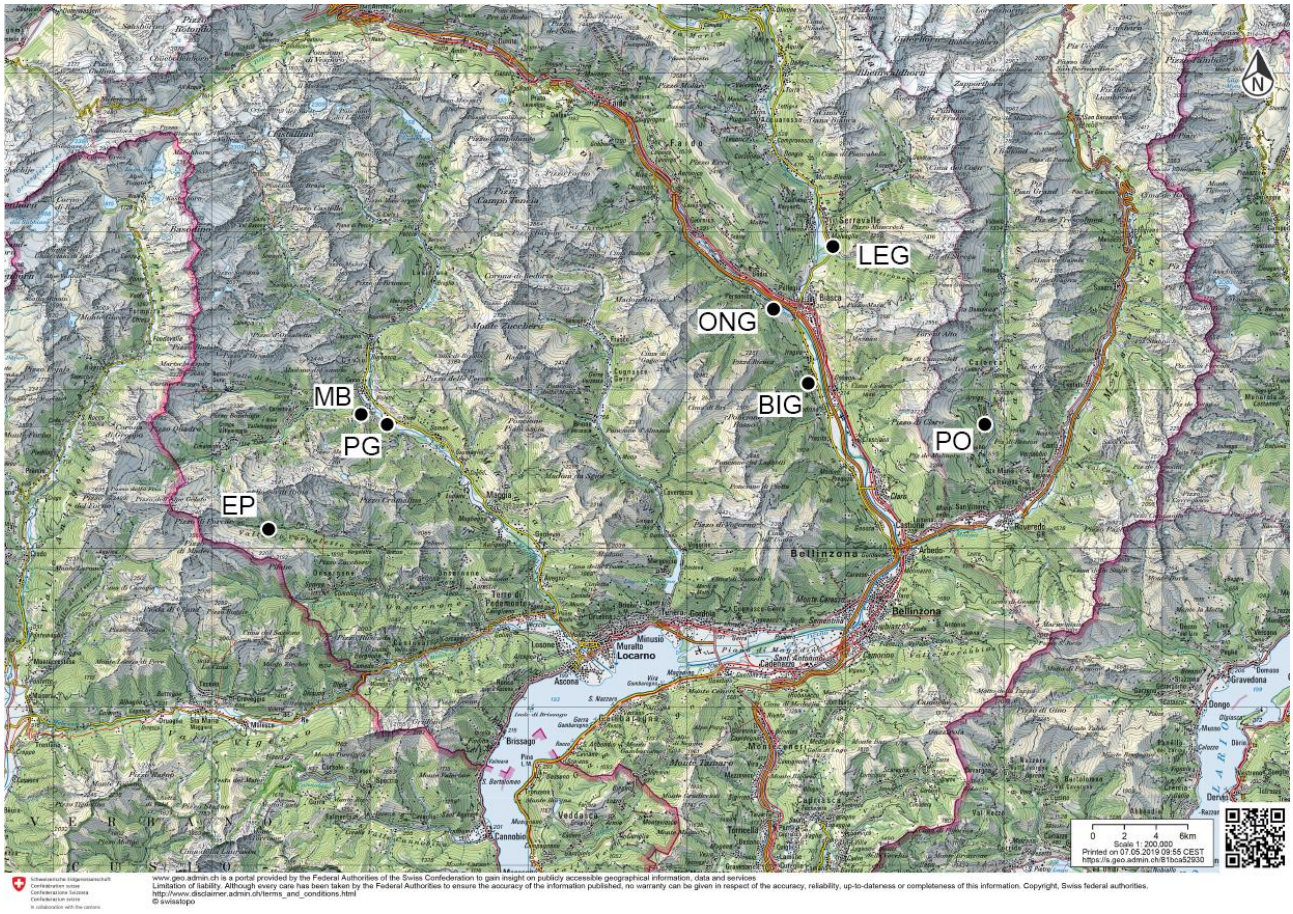

Figura 3 Provenienza degli scarti di cava analizzati in questo studio; EP: cava E. Pollini, MB: cava Bettazza, PG: cava Pollini, ONG: Cava Ongaro “Bodio Nero”, BIG: la cava Bignasca, LEG: cava Legiuna e PO: cava Polti.

3.1. Caratterizzazione mineralogica

3.1.1. Metodo

La località delle cave campionate sono indicate nella Fig. 3. Lo studio mineralogico e tessiturale degli gneiss e degli aggregati derivati da essi è stato eseguito attraverso l'osservazione al microscopio ottico delle sezioni sottili ottenute da blocchi di scarto di cava. La scelta del blocco di scarto e del taglio è stata effettuata con lo scopo di individuare solfati, solfuri e minerali alcali reattivi che potenzialmente possono generare la reazione alcali-aggregati (RAA); reazione che deteriora la durabilità dei calcestruzzi (vedi Cap. 3.4). Le fratture chiamate dai cavisti «verditt» che generano scarti durante la lavorazione della pietra naturale sono state anch'esse analizzate con particolare riguardo visto che potrebbero contenere solfati e minerali alcali reattivi.

Figura 4 Scarti di cava campionati. Si blocchi e lastre scartati dalla lavorazione della pietra naturale

Per ogni materiale di scarto è stato elencato il contenuto mineralogico in percentuali volumetriche (v.%), la dimensione dei minerali in millimetri (mm), una breve descrizione del minerale (solo quando ritenuta necessaria ai fini di questo studio) e la descrizione della tessitura. Le abbreviazioni dei minerali rinvenuti in questo studio possono essere contemplate nella Tav 1.

Tavola 1 Abbreviazioni di minerali

abbreviazioni di minerali			
all	allanite	**mu**	muscovite
anf	anfibolo	**pl**	plagioclasio
ap	apatite	**qz**	quarzo
bt	biotite	**tourm**	tormalina
chl	clorite	**tt**	titanite
ep	epidoto	**zeo**	zeolite
ksp	feldspato di potassio	**zo**	zoisite
ilm	ilmente	**zr**	zircone

3.1.2. Risultati

Cava E. Pollini – Campione EP

campione	EP	Cava E. Pollini - "Onsernone"	
mineralogia			
	v. %	*dimensione (mm)*	*descrizione*
qz	35	0.1-20	estinzione ondulata, inclusioni di fluidi
ksp	2	0.5	
pl	45	0.5	spesso saussurizzato
mu	-	-	
bt	3	0.5	
chl	10	0.5	pseudomorfo dopo bt
zo	5	0.25	forma spesso aggregati lungo vene o in zone periferiche alle vene
zr	±	0.1	
tt	±	0.25	
tourm	?	0.25	
tessitura			
Roccia a grana medio-fine con tessitura equigranulare e pp. grano-lepidoblastica. La foliazione, definita da lamine di chl/bt e da qz, pl allungati, è tagliata da vene a ep/zo, chl e tt. La chl è crescuta a scapito della bt.			
nome	gneiss a clorite minuto		

Cava Bettazza – Campione MB

campione	MB	Cava Bettazza - "Boschetto Scuro"	
mineralogia			
	v. %	*dimensione (mm)*	*descrizione*
qz	30	0.2-3	estinzione ondulata, inclusioni di fluidi
ksp	10	0.2-1	
pl	40	0.2-1	
mu	-	-	
bt	15	0.05-0.5	
chl	2	0.05-0.5	
zo	1	0.2	
zr	±	0.15	
tt	2	0.05-2	
ilm	±	0.25	
ap	±	0.5	
tessitura			
Roccia a grana media-fine con tessitura equigranulare e grano-lepidoblastica. La foliazione è definita da lamine di bt e da qz, pl, ksp allungati.			
nome	gneiss mesocratico minuto		

Cava Pollini (Cevio)– Campione PG

campione	PG	Cava Pollini Cevio	
mineralogia			
	v. %	*dimensione (mm)*	*descrizione*
qz	40	0.1-1.5	estinzione ondulata che evolve in subgrani
ksp	±	0.1	
pl	31	1-1.5	
mu	-	-	
bt	20	0.1-1.5	
chl	±	0.3	
zo/all	5	0.5-1.5	
zr	-	-	
tt	2	0.5	
opaco	1	0.2	
anf	-	-	
ap	1	0.2	
tessitura			
Roccia a grana media con tessitura gneissica equigranulare e grano-lepidoblastica. La foliazione è definita da lamine bt e da qz e pl allungati.			
nome	gneiss mesocratico		

Cava Ongaro – Campione ONG

campione	ONG	Ongaro - "Bodio nero"	
mineralogia			
	v. %	*dimensione (mm)*	*descrizione*
qz	25	0.1-2	estinzione ondulata che localmente evolve in una tessitura equigranulare formata da subgrani
ksp	5	0.5-1.2	
pl	43	0.5-1.2	geminazione polisintetica
mu	-	-	
bt	10	0.1-1	
chl	1	0.1	
zo/all	1	0.1	
zr	±	0.15	
tt	5	0.5-1	
ilm	-	-	
anf	10	0.5-6	di colore verde
ap	-	-	
tessitura			
Roccia a grana media e con tessitura gneissica inequigranulare e grano-lepidoblastica. La foliazione è definita da lamine di biotite e da qz, pl, ksp e anf allungati.			
nome	gneiss mesocratico ad anfibolo e titanite		

Cava Bignasca – Campione BIG

campione	BIG	Cava Bignasca - "Iragna"	
mineralogia			
	v. %	*dimensione (mm)*	*descrizione*
qz	40	0.2-1.5	estinzione ondulare, inclusioni di fluidi
ksp	20	0.1-1	con geminazione polisintetica
pl	30	0.1-1	lamelle antipertitiche, localmente sericizzato
mu	5	0.1-3	
bt	5	0.1-1.5	
chl	±	0.1	
tessitura			
Roccia a grana medio-fine con con tessitura grano-lepidoblastica e inequigranulare; grani di qz di dimensioni doppie rispetto ai minerali della matrice. Foliazione definita da mu, bt e da aggereati allungati di qz, pl e ksp.			
nome	gneiss minuto a due miche		

Cava Legiuna – Campione LEG

campione	LEG	Cava Legiuna	
mineralogia			
	v. %	*dimensione (mm)*	*descrizione*
qz	30	0.1-20	estinzione ondulata, inclusioni di fluidi, spesso forma aggregati allungati di ca. 300 mm
ksp	35	10-50	include minerali di zr, zo e mu, i grossi blasti di ksp sono tagliati da una rete di vene con aggregati di qz e pl
pl	13	0.25-0.5	lamelle antipertitiche, localmente sericizzato
mu	±	0.01	
bt	20	2-20	
chl	2	2-20	spesso la chl sostituisce la bt
zo	±	0.01	inclusione in ksp
zr	±	0.01	inclusione in ksp
tessitura			
Roccia a grana grossolana. Tessitura occhiadina con blasti formati da aggregati di ksp, qz, pl. Matrice grano-lepidoblastica equigranulare. Granuli di bt e di qz allungati formano la tessitura che ruota attorno ai blasti di feldspato.			
nome	gneiss occhiadino mesocratico		

Cava Polti – *Campione PO*

campione	PO	Cava Polti	
mineralogia			
	v. %	*dimensione (mm)*	*descrizione*
qz	20	0.01-20	estinzione ondulata, inclusioni di fluidi
ksp	25	0.1-10	
pl	33	0.1-20	
mu	-	-	
bt	15	0.1-50	
chl	±	1	
zo	5	0.1	con pl e bt formano nidi di aggregati di ca. 10 mm
zr	±	0.2	
tt	1	0.3	
ilm	1	0.25	
zeo	±		
ap	±	0.25	
tessitura			
Roccia a grana medio-fine con tessitura inequigranulare e grano-lepidoblastica. La foliazione è definita da lamine di biotite e qz, pl, ksp e aggregati di zoisite allungati. Localmente sono presenti mirmectiti. Ai bordi delle vene con zoisite/epidoto e forse zeo si denota un fronte di reazione di ca 1 cm, con la trasformazione di bt in chl e di pl in sericite e forse zeolite.			
nome	gneiss mesocratico		

3.1.1. Valutazione complessiva sul contenuto mineralogico degli gneiss

Nel Sopraceneri vengono estratti soprattutto ortogneiss (“orto” sta per “origine magmatica”) con contenuti mineralogici e tessiture che possono variare anche in maniera considerevole. La maggior parte di queste gneiss erano originariamente dei granitoidi che successivamente, durante l’orogenesi Alpina, subirono una deformazione e un metamorfismo. La deformazione ha riorientato preferenzialmente i minerali magmatici e metamorfici formando dei piani, che oggi formano la tessitura chiamata scistosità. La scistosità è quasi sempre parallela ai contatti tra i differenti tipi di roccia e cade a sud-sudest con una pendenza tra 0 e 30 °.

La deformazione duttile e il metamorfismo hanno anche inciso sulla forma dei cristalli e sulla struttura cristallina dei minerali stessi che spesso contengono imperfezioni e difetti cristallini. Quando da queste rocce si frantumano degli aggregati per calcestruzzi o malte cementizie, le forme dei minerali e alcuni difetti cristallini devono essere considerati perché essi possono incidere sulla meccanica e sulla durabilità del conglomerato cementizio. Di fatto, si è constatato che i minerali nella roccia formano delle forme allungate o appiattite (forme tendenzialmente oblate) e che spesso queste forme si ritrovano nel materiale frantumato.

Dall’analisi mineralogica è risultato che in tutti gli gneiss il quarzo ha un’estinzione ondulare (dovuta a un difetto cristallino) che può generare la reazione alcali-aggregati (RAA) a contatto con il cemento. Quindi tutti gli aggregati hanno una potenziale reattività agli alcali. Per quantificare la reattività potenziale agli alcali sono stati eseguiti i test microbar all’Istituto materiali e costruzioni in SUPSI (vedi Cap. 3.4). Le fratture («verditt») sono riempite principalmente da clorite ed epidoto. Non contengono quindi solfati, solfuri o minerali alcali reattivi che potrebbero incidere sulla qualità di malte cementizie o di calcestruzzi.

3.2. Distribuzione granulometrica

3.2.1. Metodo

Figura 5: Frantoio mobile su cingoli Rubble Master RM 100 2.0 dell'azienda Marco Fabiano con cui sono stati macinati gli scarti di cava.

I blocchi e le lastre degli scarti lavorazione (Fig. 4) sono stati frantumati e setacciati con una granulometria <32 mm a Cresciamo con un frantoio mobile Rubble master 100 2.0. Le analisi granulometriche, secondo le norme UNI EN 933-1, sono state eseguite dall'Istituto materiali e costruzioni in SUPSI.

3.2.2. Risultati

La distribuzione granulometrica degli aggregati frantumati rientra nei parametri della norma GA85 (misto granulare 0-32, Fig. 6). Solo la prova PO è fuori norma. Questo risultato è da attribuire al fatto che lo scarto era già un frantumato 16-32 mm e che il frantoio era tarato per dimensioni di blocchi più grandi di 32 mm. Non si tratta quindi di un problema del materiale ma un errore di elaborazione. È probabile che, a pari trattamento, la curva granulometrica di PO sia simile a quella di EP.

Tavola 2 Aggregato passante (%) per i setacci con maglie di diverse dimensioni

setaccio [mm]	Passante [%]						
	EP	MB	PG	BIG	LEG	ONG	PO
0.063	0.7	0.5	1.4	0.8	0.5	0.1	0.0
0.125	2.2	0.8	2.5	1.8	0.7	0.5	0.2
0.25	6.6	1.9	5.4	5.6	2.3	0.9	0.3
0.5	13.3	3.7	9.9	12.0	5.2	2.1	0.3
1	21.4	6.7	15.6	19.8	10.1	5.2	0.3
2	31.5	12.5	23.3	30.1	18.6	10.1	0.4
4	44.3	22.5	33.4	43.6	30.7	20.1	0.4
8	60.1	38.4	47.8	60.7	48.2	37.6	0.8
16	79.6	58.5	71.4	80.4	70.6	64.1	16.4
31.5	93.9	81.3	94.1	95.5	91.9	90.4	91.4
63	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
90	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

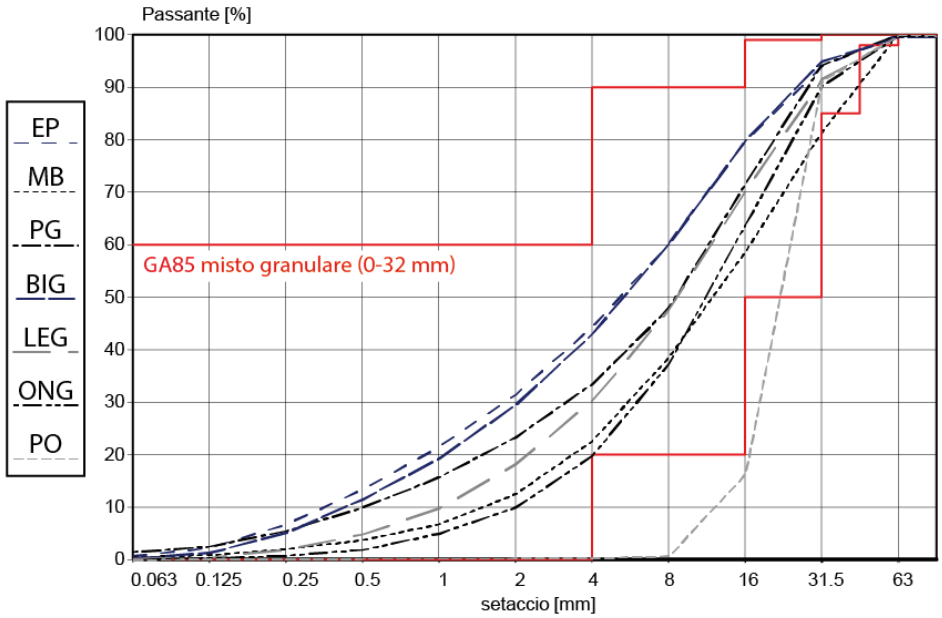

Figura 6 Curve granulometriche degli scarti di cava di differenti gneiss

3.2.1. Valutazione finale sulle curve granulometriche degli scarti di cava di gneiss

La distribuzione granulometrica degli aggregati frantumati è idonea per la produzione di calcestruzzi o di malte cementizie e plotta nei parametri della norma GA85 (misto granulare 0-32, Fig. 6). Esistono comunque delle differenze tra le granulometrie derivanti da gneiss di diversa mineralogia e tessitura. Per esempio un aggregato < 2 mm dei campioni EP e BIG costituisce il 30 % del volume frantumato totale mentre un aggregato < 2 mm dei campioni ONG e MB costituisce solo il 10 % del volume frantumato totale. Il frantumato di quest'ultimi produce però quantitativi minimi di fine < 0.125. Queste caratteristiche devono essere considerate quando si utilizza il materiale per le stampe 3D poiché esse influiscono sui parametri di stampa (vedi Cap. 4.3).

3.3. Prove d'assorbimento di acqua nell'aggregato

Le prove di assorbimento di acqua per capillarità misurano il grado di assorbimento dell'acqua degli aggregati. Il quantitativo di acqua assorbita dall'aggregato dev'essere considerata nella preparazione della ricetta del conglomerato cementizio affinché la consistenza della malta venga mantenuta nel tempo. L'assorbimento dell'acqua è anche un indicatore per la porosità dell'aggregato che può avere un effetto sul deterioramento del calcestruzzo.

3.3.1. Metodo

Le analisi sono state eseguite in SUPSI dall'Istituto materiali e costruzioni accreditato per le analisi secondo la norma EN1097-6 con il metodo al cestello a rete per aggregati con granuli compresi tra 4 e 31.5 mm e con il metodo pignometrico per aggregati con granuli compresi tra 0.063 e 4 mm.

3.3.2. Risultati

Nei campioni analizzati le percentuali di massa di acqua assorbita rispetto alla massa dell'aggregato essiccato in stufa (WA_{24}) variano da 0.30 a 0.43. I valori più elevati si sono misurati nel campione PG mentre quelli più bassi di 0.30-0.33 nel campione LEG. Quest'ultimo valore leggermente al di sotto della media degli altri campioni è da ricondurre alla presenza di cristalli di feldspato (35 v.%) di dimensioni che raggiungono i 5 cm la cui struttura cristallina non permette l'assorbimento dell'acqua anche dopo la frantumazione.

Tavola 3 Prove d'assorbimento di acqua (%) per gli aggregati con le frazioni < 0.4 mm e 4-31.5 mm.

		BIG		EP		LEG		MB		ONG		PG	
		<4 mm	4/31.5	<4 mm	4/31.5	<4 mm	4/31.5	<4 mm	4/31.5	<4 mm	4/31.5	<4 mm	4/31.5
Assorbimento (WA_{24})	(%)	0.4	0.38	0.37	0.37	0.30	0.33	0.38	0.38	0.4	0.36	0.41	0.43

3.3.3. Valutazione finale sulle prove d'assorbimento

I valori ottenuti sono inferiori ai tipici valori degli gneiss che si aggirano tra 0.6 e 1.3 %.

3.4. Reattività potenziale agli alcali (test microbar)

La reazione alcali-aggregato (RAA) è un'alterazione chimica del conglomerato cementizio che forma un silicato alcalino gelatinoso che espande il conglomerato cementizio fratturandolo dopo circa 10 anni. Esistono molteplici studi sulla reazione scoperta negli anni '50 (vedi p. es. in Bundesamt für Strassen, 2006; Jensen, 1993). Si tratta di una reazione tra gli alcali (sodio e potassio) nel cemento e la silice (p. es. vetro vulcanico) o un silicato (p. es. quarzo) negli aggregati. In alcuni casi la reazione si sviluppa pure tra gli alcali e gli aggregati di rocce dolomitiche. La ragione che rende gli gneiss ticinesi potenzialmente alcali reattivi è la presenza di quarzo ondulato che in ambienti alcalini può essere reattivo lungo le imperfezioni cristalline. Inoltre, nella pratica si è constatato che aggregati frantumati tendono a mostrare una reattività più alta rispetto agli aggregati dello stesso materiale non frantumato (cemsuisse, 2005). La reazione è efficiente solo in conglomerati cementizi frequentemente umidi dove l'acqua può trasportare gli ioni Na^+, K^+ e OH^- nei difetti cristallini del quarzo o nelle silice amorfa. Quindi, la reattività agli alcali non costituisce un problema in calcestruzzi o malte cementizie di strutture asciutte all'interno di edifici.

3.4.1. Metodo

Le analisi sono state eseguite in SUPSI dall'Istituto materiali e costruzioni accreditato per le analisi secondo la norma NF P18-454 e NF P18-456 (microbar test). Sono stati scelti 3 campioni rappresentativi. Il Campione BIG rappresenta gli gneiss della Riviera che dal punto di vista mineralogico sono piuttosto omogenei. Il campione EP della Valle Onsernone è simile da un punto di vista mineralogico al campione PO della Val Calanca. Il campione MB rappresenta gli gneiss della Valle Maggia anche se in realtà dal punto di vista mineralogico sono molto disomogenei.

3.4.2. Risultati

Sui tre campioni selezionati, le analisi fatte su tre rapporti Cemento/Aggregato (C/A), hanno dato valori di dilatazione compresi tra 0.033 e 0.073 %, decisamente al di sotto del limite della norma FD P 18-542 di 0.11 % che definisce il limite superiore per cui un aggregato può essere impiegato in un prodotto con miscele cementizie senza prendere ulteriori accorgimenti come per esempio evitando il contatto diretto si acqua. Per tanto, il test microbar definisce gli aggregati dei campioni **BIG, EP, MB** come **non reattivi** (Tav. 4).

Tavola 4: Risultati del test microbar in cui quantifica la dilatazione della malta cementizia sotto l'effetto di agenti esterni secondo la norma FD P 18-452. Un aggregato viene ritenuto alcali reattivo al punto da causare problemi di stabilità in conglomerati cementizi se supera una dilatazione del 0.11 %.

	Rapporto Cemento/Aggregato (C/A)		
	2	5	10
	BIG		
Dilatazione [%]	0.073	0.051	0.049
Limite secondo FD P 18-542: <0.11%	NR - Non Reattivo		
	EP		
Dilatazione [%]	0.070	0.060	0.033
Limite secondo FD P 18-542: <0.11%	NR - Non Reattivo		
	MB		
Dilatazione [%]	0.059	0.048	0.044
Limite secondo FD P 18-542: <0.11%	NR - Non Reattivo		

3.4.3. Valutazione finale reattività potenziale agli alcali

Nelle interviste con gli attori di settore ci siamo spesso confrontati con la diffusa opinione che gli scarti di cava ticinesi generano aggregati di pessima qualità (sia dal punto di vista meccanico, sia di durabilità). La caratterizzazione mineralogica ha identificato in tutti gli gneiss quarzo con un'estinzione ondulosa che potenzialmente può rendere l'aggregato alcali reattivo, limitando in maniera importante l'uso di questi aggregati per opere esterne soggette a un'intensa umidità. Inoltre, il catasto del Bundesamt für Strassen (2006) dei danni a strutture in calcestruzzo generati dalla RAA mostra che in Ticino gli aggregati utilizzati sono localmente alcali reattivi. La riluttanza di alcuni produttori di calcestruzzo a utilizzare aggregati di cava nasce anche da questi dati. Un'attenta analisi della distribuzione dei danni dovuti al RAA mostra però che essi sono quasi assenti attorno alle zone estrattive (Valle Maggia, Val Onsernone e Riviera) dove è probabile che ci sia stato un utilizzo estensivo di materiale di cava ma si concentrano piuttosto nel Sottoceneri e in Mesolcina. Da questa distribuzione si evince che gli gneiss non generano danni alle strutture cementizie. Di fatto, i risultati del microbar test confermano questa deduzione visto che gli aggregati dei campioni rappresentativi **BIG, EP, MB** hanno una reattività al RAA inferiore di quasi un ordine di magnitudo al limite che definisce l'aggregato alcali reattivo. Nonostante il test microbar dovrebbe essere esteso su tutto il territorio a più tipologie di gneiss per avere una maggiore validità regionale, questi dati mostrano che non esiste nessun elemento tangibile della pessima qualità degli aggregati di scarti di cava di gneiss.

4. Produzione di calcestruzzi e di geopolimeri

4.1. Malte cementizie e calcestruzzi tradizionali

Le proprietà meccaniche di conglomerati cementizi di scarti di cava di gneiss sono state investigate con la produzione di un calcestruzzo con una granulometria <32 mm e una malta con una granulometria < 2 mm. La produzione di quest'ultima era già una prima indagine per caratterizzare la reologia della malta adatta all'estrusione di una stampante 3D e per avere delle indicazioni sulla buildability (ovvero rapporto reologia/resistenza meccanica).

4.1.1 Metodo

Le miscele in questa fase sono state ottimizzate modificando il rapporto tra acqua e percentuale di additivo fluidificante. La reologia si è controllata con la sformatura della malta dal tronco cono (Fig. 7). Quando la consistenza della malta sembrava qualitativamente idonea alla stampa 3D (ovvero quando mostrava un'alta resistenza al collasso del tronco cono, cfr. Fig. 7a e 7b) si sono confezionati i provini prismatici 40x40x160 mm con lo scopo di andare a eseguire i test per la caratterizzazione meccanica (flessione trazione e compressione). I test meccanici sono stati eseguiti in SUPSI dall'Istituto materiali e costruzioni accreditato per le analisi secondo la norma la norma SIA 262/1.

Lo studio comparato delle proprietà reologiche e della resistenza meccanica permette di dare una prima valutazione indicativa della buildability della miscela ideata con aggregati di scarto di cava (ovvero il rapporto tra reologia durante la posa e resistenza meccanica a secco che nella stampante ad estrusione di malte cementizie gioca un ruolo fondamentale).

Inoltre, dall'archivio dell'Istituto materiali e costruzioni abbiamo rianalizzato i risultati di test meccanici, di durabilità e di resistenza al gelo su calcestruzzi con differenti mix di aggregati ticinesi eseguiti per ditte private che rimangono anonime. Su questi calcestruzzi sono stati eseguiti le prove di durabilità previste nella norma SN EN 206 (tabella NA.6). In particolare sono stati eseguiti le prove di resistenza alla carbonatazione accelerata, del comportamento ai cicli di gelo e disgelo in presenza di sali disgelanti, della permeabilità all'acqua e della resistenza ai cloruri secondo i metodi in accordo alla norma SIA 262/1:2013. Questi dati di archivio servono a estendere la valutazione dell'impiego di conglomerati cementizi con scarti di cava locali anche nell'edilizia tradizionale dove il consumo di questa materia prima è fondamentale in un contesto di economia circolare sostenibile a livello cantonale.

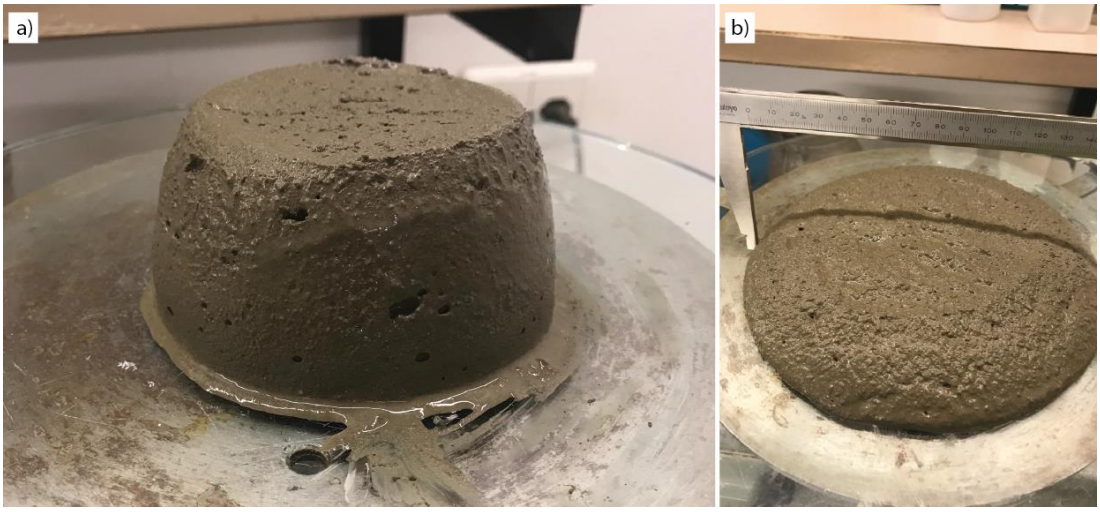

Figura 7 Test reologici con il metodo del tronco cono su malte cementizie con l'aggregato BIG. (a) Malta con un'alta resistenza al taglio. (b) Malta con una bassa resistenza al taglio.

4.1.2 Risultati

Gli esperimenti per tentativi sulle miscele atte a ottenere reologie che potrebbe essere applicate per la stampa 3D hanno portato a uno sviluppo di una miscela che contiene 450 g di cemento, 260 g di acqua, 1350 g di aggregato BIG 0-2 mm e 1 % additivo fluidificante. La Fig. 7 mostra un tronco cono di questa malta che indica che la miscela fresca resiste al flusso. Le resistenze meccaniche di questa malta sono rappresentate nella Fig. 8, campione MA BIG.

In fase di lavorazione il campione CA BIG ha avuto problemi di lavorabilità. La lavorazione della miscela con una pala necessitava di molta forza da parte dell'operaio.

Nel calcestruzzo prodotto con l'aggregato BIG (CA BIG, Fig. 8) la resistenza alla compressione raggiunse 25.7 N/mm^2 dopo 2 giorni, 36.0 N/mm^2 dopo 7 giorni e 43.3 N/mm^2 dopo 28 giorni. Nella malta cementizia prodotta con l'aggregato BIG (MA BIC, Fig. 8) la resistenza alla compressione raggiunse 9.2 N/mm^2 dopo 2 giorni, 23.8 N/mm^2 dopo 7 giorni e 31.6 N/mm^2 dopo 39 giorni. In entrambi i casi i valori rientrano nella classe di resistenza alla compressione C30/37 necessaria per avere un calcestruzzo di qualità tipo C.

I risultati anonimizzati dei test meccanici di calcestruzzi con 100% di aggregato ticinese mostrano risultati simili a quelli riprodotti in questo studio, con la differenza che la resistenza meccanica dopo 2 giorni è di soli 15 N/mm^2, invece di 26 N/mm^2 del nostro studio (cfr. CA tipo B e CA BIG, Fig. 8). Sugli stessi calcestruzzi (CA tipo B, Fig. 8) i test sulla durabilità mostrano un coefficiente di carbonatazione di ca. 6 mm/sqrt(a); valore che si colloca fuori dal limite che classifica i calcestruzzi di tipo C con una durata di servizio 50 anni (XC4, (SN EN 206-1/NE:2013)).

I risultati anonimizzati dei test meccanici di calcestruzzi con 66% di aggregato ticinese mostrano (CA Tipo C, Fig. 8) 27.9 N/mm^2 dopo 2 giorni, 49.4 N/mm^2 dopo 7 giorni e 56.7 N/mm^2 dopo 28 giorni e nei test sulla

durabilità mostrano dei valori che rientrano nel campo dei calcestruzzi di tipo C (XC4, (SN EN 206-1/NE:2013)).

I risultati anonimizzati dei test meccanici di calcestruzzi con 33% di aggregato ticinese mostrano (CA Tipo G, Fig. 8) 35.1 N/mm^2 dopo 2 giorni, 54.1 N/mm^2 dopo 7 giorni e 63.0 N/mm^2 dopo 28 giorni. Inoltre, i test di resistenza al gelo di questi calcestruzzi sono di 20 g/mm^2; valori molto alti che si collocano nella qualità di calcestruzzo di tipo G (SN EN 206-1/NE:2013).

4.1.3. Valutazioni finale sulle malte cementizie e calcestruzzi

Secondo la norma SN EN 206-1/NE:2013 i calcestruzzi tradizionali con 100% di aggregati locali rientrano nei criteri della qualità tipo C per quanto riguarda le proprietà meccaniche e nella qualità tipo B per quanto riguarda la durabilità. Inoltre, le difficoltà di lavorazione riscontrate possono essere una criticità nell'impiego in cantiere. Ciò nonostante è sufficiente tagliare l'aggregato con ca. 30 % di aggregato alluvionale che le proprietà del calcestruzzo rientrano in tutti i parametri di qualità nel tipo C. Il calcestruzzo di tipo C è il calcestruzzo maggiormente impiegato nell'edilizia. Con 66% di aggregato alluvionale e con 33% di quello ticinese si ottiene un calcestruzzo con un'alta qualità sotto tutti i punti di vista (tipo G).

Dunque, gli aggregati di scarti di cava possono essere impiegati per il calcestruzzo tradizionale. Quello costituito da 100 % di aggregato ticinese ha delle limitazioni di durabilità, mentre quello composto da aggregati locali tagliati a aggregati alluvionali (spesso alloctoni) è idoneo per la maggior parte degli impieghi nell'edilizia. Attualmente, però questo tipo di inerte non viene utilizzato anche se un'eventuale industria basata sul riciclo degli scarti di cave in Ticino potrebbe contribuire in maniera sostanziale nel fabbisogno di inerti e ridurrebbe in maniera drastica l'impatto ambientale del settore della costruzione senza intaccare la qualità e la durabilità di edifici e di strutture.

Gli esperimenti preliminari sugli impasti mostrano che la reologia degli impasti freschi con gli aggregati di cava potrebbe favorire la posa del materiale durante la stampa 3D. La resistenza al flusso della miscela allo stato fresco permette di mantenere la forma dell'estruso senza solidificare, di modo che l'impasto possa reagire con lo strato depositato successivamente creando coesione tra gli strati.

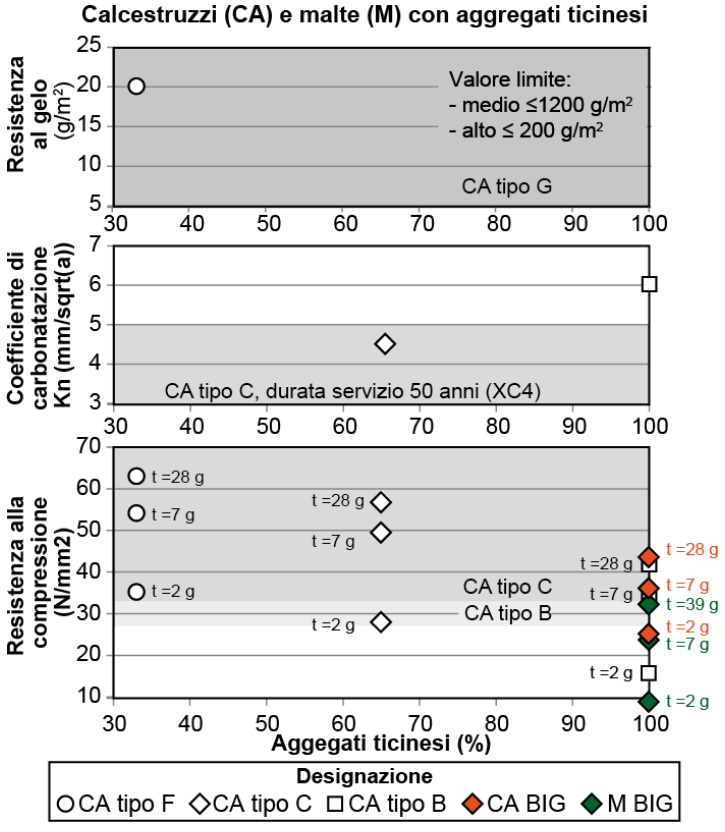

Figura 8 Risultati meccanici, di durabilità e di resistenza al gelo di malte cementizie e di calcestruzzi prodotti con aggregati ticinesi.

4.2.Stampa 3D a estrusione di malte cementizie

Il principio di questa tecnica si basa sull'estrusione di malte cementizie premiscelate da una testina di stampa posizionata alle estremità di un braccio meccanico robotizzato e connessa a un sistema di pompaggio. La tecnica con cui abbiamo previsto di testare l'idoneità degli aggregati di cava è stata sviluppata dal Politecnico federale di Zurigo (ETHZ). Ad oggi, non sono ancora stati eseguiti i test di stampa con gli aggregati di scarto di cava; le cause sono da ricondurre ai ritardi accumulati negli accertamenti sulla potenziale alcali reattività degli aggregati e in parte ai ritardi dei partner.

In questo studio abbiamo ipotizzato che gli scarti di cava, per la morfologia dei clasti, avrebbero potuto migliorare le prestazioni di stampa rispetto agli aggregati "tradizionali". Gli aggregati più impiegati nel mondo dell'edilizia sono tendenzialmente arrotondati e sferici. Al contrario, se non vengono trattati appositamente con macchine industriali, gli aggregati di scarti di cava di gneiss sono invece spigolosi e piuttosto allungati in forme oblate (Fig. 9). Le forme oblate derivano sia dalla presenza di clasti mono-minerali fatti di miche (biotite, muscovite o clorite) sia dalla frantumazione che tendenzialmente segue la struttura cristallografica dei minerali come i feldspati. Il comportamento di queste forme oblate nel flusso del fluido (malta + aggregato) all'interno del sistema di pompaggio e di estrusione della stampante 3D influenza il processo di stampa poiché condiziona la viscosità effettiva dell'impasto fluido (Fig. 9). Nella nostra ipotesi di lavoro, le forme oblate dello scarto di cava tendono a ruotare posizionandosi parallele al flusso, questo fa sì che si aumenta l'inter-connettività del fluido trasportatore e di conseguenza si riduce la viscosità della miscela. Quindi, in un flusso laminare la malta dell'aggregato di cava è più fluido. Quando però al momento dell'estrusione, si passa da un flusso laminare a un flusso caotico, il clasto oblato e angolare ruota incastrandosi con altri clasti, formando in questo modo uno scheletro plastico che potrebbe sostenere la forma dell'elemento stampato. Dunque, durante della posa, la viscosità effettiva della malta con gli aggregati di cava è maggiore rispetto a quelle con aggregati arrotondati. Nel processo di stampa queste proprietà reologiche sono fondamentali poiché permettono rapidamente la transizione tra un comportamento fluido e uno plastico, senza necessariamente solidificare velocemente il cemento attraverso additivi.

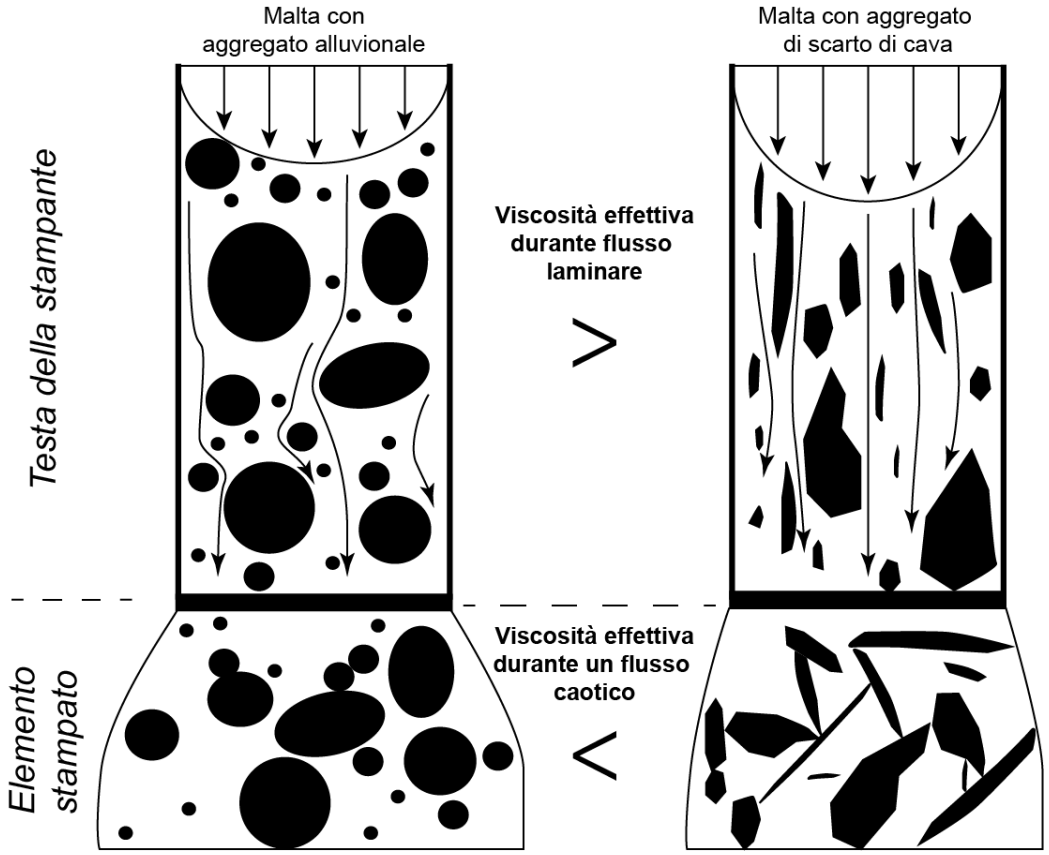

Figura 9 Schema di dinamiche di flusso nella testa di estrusione con malte di aggregati alluvionali (a sinistra) e di aggregati di scarto di cava (a destra). La morfologia dei clasti dell'aggregato di cava può incidere sulla reologia e aiutare a mantenere la forma dell'elemento allo stato fresco.

4.2.1. Materiali e metodi

Per simulare la situazione in una stampante 3D sono state prodotte delle malte con gli scarti di cava con l'obbiettivo di incrementare la viscosità effettiva dell'impasto (vedi cap. 4.1). Purtroppo, ad oggi non sono ancora stati fatti i test sulla stampante.

4.2.2. Valutazioni finali sulla tecnica a estrusione di malte cementizie

La causa della pessima lavorabilità dei calcestruzzi con scarti di cava risiede nella morfologia degli aggregati che non permettono il fluire della miscela fresca. Come illustrato nella Figura 9, tale caratteristica può avere dei benefici nella stampa 3D, in quanto aiuterebbe a mantenere la forma dell'impasto fresco una volta estruso e a reggere il peso degli strati applicati successivamente. La prima indagine in questa direzione ha dato buoni risultati. Il comportamento reologico delle malte fresche mostra infatti un'alta resistenza al flusso (vedi Fig. 7).

Da una prospettiva commerciale, la stampante 3D a estrusione di malte cementizie è matura per l'industrializzazione ma in Europa le industrie e le startup che si sono specializzate nella stampa 3D per l'edilizia sono poche (p.es. WASP, Mobbot). La tecnica richiede un know-how interdisciplinare che comunque si confronta grosse difficoltà legate alla buildability, ovvero il difficile rapporto da dover controllare durante la stampa tra gli aspetti reologici e quelli di resistenza finale. Attualmente quasi tutti gli elementi stampati con questa tecnica sono strutture non portanti e tendenzialmente elementi di design.

Gli investimenti da fare per questa tecnica sono ingenti. Ci è stato riferito che il costo per l'infrastruttura del centro di ricerca del National Centre of Competence in Research (NCCR) Digital Fabrication al Politecnico di Zurigo si aggira attorno ai 20 milioni di CHF. Questo laboratorio è però multifunzionale per più tecniche di costruzione robotizzate e con più bracci meccanici convertibili per molte applicazioni. I costi di un centro specializzato solo sulle malte cementizie è sicuramente inferiore ma non disponiamo di dati oggetti. Un braccio meccanizzato di seconda mano e convertibile a per tale scopo potrebbe richiedere un investimento di ca. 30-40 kCHF e a questi costi si aggiungono i costi del miscelatore, della pompa, etc. Un altro investimento fondamentale è sul capitale umano; questa tecnica necessita di tanti tecnici altamente specializzati.

Questa è la tecnica con più potenziale negli anni a venire e operativamente potrebbe effettivamente consumare grossi volumi di scarti di cava. Le difficoltà che questa tecnica incontra a prender piede, oltre che agli ingenti investimenti finanziari e di risorse umane, risiedono nella sfiducia e nell'incertezza legate alla tecnologia innovativa. Di fatto, questa tecnica richiede un cambiamento radicale nel modo di immaginare, di concepire e di costruire un edificio da parte di quasi tutti gli operatori del settore, dal cliente, all'architetto, all'ingegnere, al muratore. In questo contesto di cambiamenti radicali dovuti alla digitalizzazione dell'industria, il DACD-SUPSI dovrebbe avere degli interessi ad investire in questa tecnica per preparare e diffondere le competenze agli attori che opereranno nell'edilizia del futuro.

4.3. Stampa 3D a reazione di geopolimeri

Il principio di questa tecnica di stampa è rappresentato nella Fig. 1.b. L'elemento 3D si solidifica dalla reazione di una base liquida (silicato di sodio) con una polvere di metacaolino (minerale che funge da reagente) che, in precedenza, viene tagliata all'aggregato. Il mix aggregato+metacaolino viene depositato della stampante formando uno strato. In seguito, attraverso un braccio meccanico che si muove seguendo il modello digitale, viene fatto penetrare il silicato di sodio allo stato liquido nello strato. Laddove la base penetra nell'aggregato+metacaolino, essa reagisce con il metacaolino formando il legante, che allo stato solido viene chiamato geopolimero. Dopo il primo ciclo, la stampante deposita un secondo strato di aggregato+metacaolino in cui il braccio meccanico fa penetrare il silicato di sodio. Ripetendo l'operazione più volte la stampante costruisce l'oggetto sulla verticale. La struttura dell'elemento 3D è costituita dalla reazione completa del geopolimero (ca. 12 h per un blocco 50x40x30 cm). L'aggregato+metacaolino che non reagisce con la base può essere rimosso e riutilizzato. Questa tecnica permette di stampare strutture che deviano dalla verticale generando in questo modo sporgenze, archi e cavità che difficilmente possono essere stampati con altre tecniche e non produce scarti.

Figura 10 Prototipo della stampante 3D a reazione di geopolimero sviluppata all'ETHZ. a) Vista laterale della struttura (Foto di Pietro Odaglia). Si noti l'imbuto contenente l'aggregato mischiato al metacaolino. b) Vista dall'alto sul braccio meccanico xyz che si muove sopra allo strato di aggregati+metacaolino. c) Vista laterale del braccio meccanico xyz con la testina (rosa) da cui viene emesso il silicato di sodio.

4.3.1. Materiali e metodi

Questa tecnica di stampa 3D è stata sviluppata dal Politecnico federale di Zurigo. Il prototipo della stampante 3D è stato progettato e costruito da Pietro Odaglia sotto la guida del Prof. Dr. Benjamin Dillenburger, Chair of Digital Building Technologies. Le ricette del geopolimero sono invece state ideate da Vera Voney sotto la guida del Prof. Guillaume Habert, Chair of Sustainable Construction. Lo stato dell'arte di questa tecnica e i dettagli tecnici sulla stampante e sul materiale possono essere contemplati in Voney et al. 2019 e in Vonay et al. 2020.

Gli esperimenti sono stati eseguiti all'ETHZ con i campioni **EP** e PG e limi di segagione di rocce simili a BIG. La granulometria di EP è < 1 mm, di PG < 2mm e dei limi < ca. 0.125 mm. Il metacaolino mischiato agli aggregati (MetaStar© 501 – IMERYS KAOLIN) ha invece una granumoletria di ca. 4 µm. Il contenuto di SiO_2 e di Al_2O_3 del metacaolino corrisponde rispettivamente a 51.63 e a 44.57 wt% (Voney et al. 2019; Vonay et al. 2020). La soluzione basica si è ottenuta dalla dissoluzione in acqua deionizzata a 20°C di pellets di KOH (Sigma Aldrich) e di un gel di silicato in polvere (Davisil grade 635, Sigma Aldrich). Il rapporti

di H_2O/K_2O e di SiO_2/K_2O sono rispettivamente di 13.9 e di 1.6. La massa volumica della soluzione è di 1.43 g/cm^3 (Vonay et al. 2020).

Le ricette del geopolimero a 2 componenti (ovvero la componente metacaolino negli aggregati e la componente liquida di silicato di sodio) per la stampa a reazione non corrisponde alla ricetta di un geopolimero dove le componenti vengono mischiate prima del getto. Nel primo caso, la reazione finale del geopolimero dipende anche dalle capacità del liquido di penetrazione nello strato di aggregati+metacaolino. La strategia per ottimizzare le ricette deve considerare la porosità e la permeabilità degli aggregati+metacaolino e la soluzione può essere ottimizzata cambiando i parametri Si/Al, K/Al, H_2O/K_2O e SiO_2/K_2O. Per comparare le proprietà meccaniche del geopolimero stampato con quello gettato, si sono prodotte dei geopolimeri premiscelati da aggregati con 20wt% di metacaolino e con una soluzione di silicato di potassio.

La stampante ha delle dimensioni di ca. 2x1x2 m (Fig.10) e permette di stampare oggetti di piccole dimensioni (max. 50x40x30cm). È stato concepito come un hardware libero (open hardware) e può quindi essere riprodotto con materiali a basso costo già presenti sul mercato. I parametri tecnici regolabili durante la stampa e che influenzano la stabilità del materiale stampato sono: i) il diametro dell'ugello (n), ii) il volume emesso per distanza percorsa dall'ugello (V/dist), iii) la distanza tra linee stampate (s) e iv) lo spessore dello strato aggregato + metacaolino (d). Questi parametri possono essere combinati per calcolare il volume di soluzione da applicare per un determinato volume dello strato di aggregato+metacaolino.

$$\frac{soluzione\ [\mu l]}{volume\ strato\ aggregato\ [mm^3]} = \frac{V/dist\ [\mu l/mm]}{n\ [mm] * s\ [\%] * d\ [mm]} \qquad \text{(eq. 1)}$$

Su dei cubi di una dimensione di 4x4x4 cm è stata quantificata l'accuratezza della stampa che corrisponda a:

$$accuratezza\ [\%] = \frac{lunghezza\ misurata\ [mm] - lunghezza\ \ da\ modello\ [mm]}{lunghezza\ misurata\ [mm]} * 100 \qquad \text{(eq. 2)}$$

Dopo 7 giorni, sugli stessi cubi sono stati eseguiti dei test compressivi con una pressa meccanica Unitronic (Matest) applicando 0.1 kN/s (50 kN cell).

4.3.2. Risultati

Ottimizzazione del mix del geopolimero

Sugli aggregati del campione EP e sui limi di segagione si sono fatti una serie di esperimenti per ottimizzare il rapporto ideale tra aggregato di scarto di cava e metacaolino. Differenti mix con un contenuto di metacaolino di 0, 20, 40, 60 , 80 wt% sono stati fatti reagire con dieci gocce di silicato di sodio per testare la stabilità del geopolimero (Fig. 11). Dopo 24 h il volume solidificato (Fig.12) è stato immerso in acqua per verificare se la reazione del geopolimero è avvenuta in maniera completa.

Da un'analisi qualitativa si è constatato che il miglior risultato si ottiene un mix di 20 wt% di metacaolino. Tale valutazione considera la stabilità in acqua del geopolimero e la compattazione dei prodotti di reazione. Si è inoltre cercato di minimizzare il consumo di metacaolino.

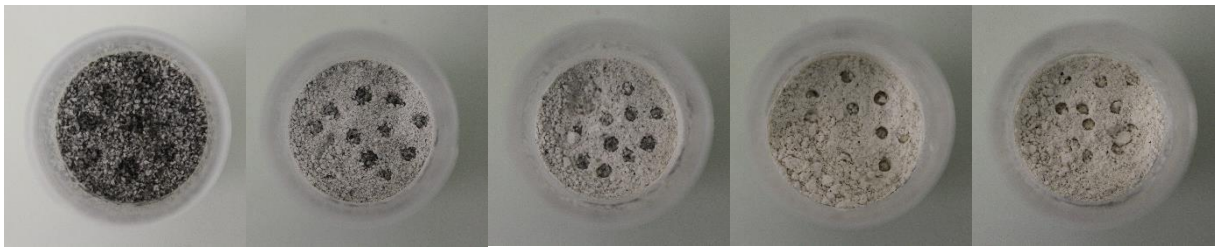

Figura 11 Sei mix dell'aggregato EP con percentuali di metacaolino che variano da 0, 20, 40, 60, 80 wt% a cui si sono aggiunte 10 gocce di silicato di sodio per verificare la stabilità del prodotto finale.

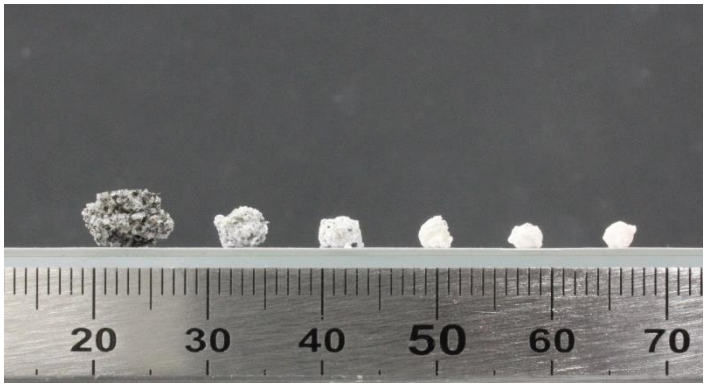

Figura 12 Prodotto di reazione solidificato di geopolimero + aggregato EP (reazione con 0, 20, 40, 60, 80, 100 wt% di metacaolino) dopo 24 h. La seconda goccia da sinistra è stata reputata come quella più stabile e più sostenibili da un punto di vista ecologico e economico.

Sorprendentemente si è constatato che dopo alcune settimane il silicato di sodio reagisce anche senza l'aggiunta di metacaolino (prima goccia da sinistra nella Fig. 12). Si è ipotizzato che tale reazione ritardata fosse da imputare alla presenza di miche nell'aggregato (muscovite, biotite e clorite) che di fatto sono minerali con concentrazioni di alluminio e di silicio simili a quelle del metacaolino. Quindi l'alluminio e il silicio potrebbero essere stati messi a disposizione dalle miche piuttosto che dal metacaolino durante la reazione. Con l'obiettivo di aumentare la reattività al silicato di sodio delle miche negli aggregati, gli aggregati sono stati trattati termicamente a varie temperature. Di fatto, a elevate temperature le miche si destabilizzano e la denaturalizzazione della loro struttura cristallina avrebbe potuto aumentare la reazione con il silicato di sodio. Gli aggregati sono stati essiccati a 110°C in un forno per poi essere portatati alla temperatura di picco (Tav. 5).

Tavola 5 Parametri dei trattamenti termici eseguiti per cercare di aumentare la reattività degli aggregati

Campione	Essicazione a 110 °C	Temperatura C° al picco
EP	2 giorni	1050 C° per 2 ore
EP	8 ore	900 C° per 2 ore
EP	8 ore	800 C° per 2 ore
EP	8 ore	650 C° per 2 ore
EP	12 ore	650 C° per 12 ore

Gli aggregati trattati termicamente sono stati poi fatti reagire con il silicato di sodio e sottoposti al test della stabilità in acqua. Tutti i campioni trattati termicamente si sono disgregati in acqua testimoniando che la reazione tra il silicato di sodio e l'aggregato di fatto non è avvenuta (Fig. 13). In qualche modo la deidratazione delle miche durante i trattamenti chimici ha diminuito la reattività delle stesse. Dopo questo tentativo fallito, non si è più continuato nell'intento.

Figura 14 Esempi di campioni che dopo l'aggiunta del silicato di sodio e un'attesa di 1 h si sono disgregati in acqua. In questi campioni la reazione del geopolimero non è avvenuta.

Test meccanici

Le stampe a geopolimero con scarti di cava EP mostrano delle resistenze alla compressione tra i 10 e 12 MPa. Valori che sono simili alle resistenze del geopolimero con aggregato "tradizionali" di origine fluviale ottenute con la stessa tecnica (Fig. 14). Le resistenze sono comunque più elevate rispetto ai risultati con leganti organici prodotti da stampanti 3D commerciali.

I getti con il geopolimero premiscelato e gli scarti di cava EP hanno prodotto dei geopolimeri con resistenze di ca. 37 MPa, leggermente inferiori ai geopolimeri premiscelati con gli aggregati tradizionali che hanno raggiunto i 42 MPa (Fig. 15).

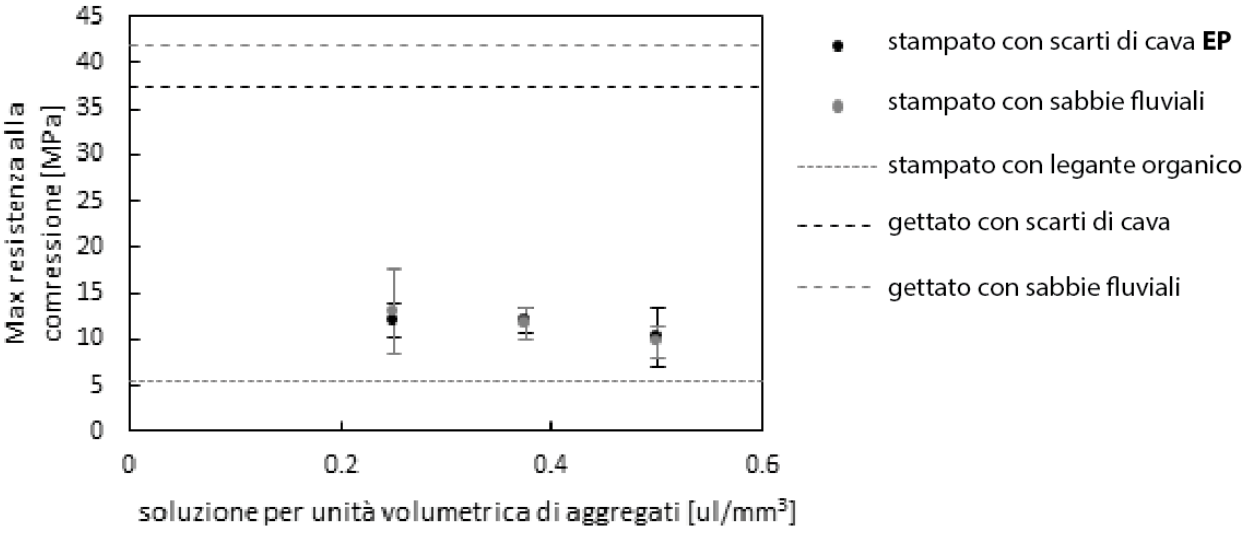

Figura 15 Test meccanici compressivi su geopolimeri stampati e gettati (Voney et al. 2020)

Precisione e accuratezza

La precisione della stampa nelle differenti direzioni x, y e z non è uguale. Come mostra la deviazione standard delle dimensioni del blocco stampato, la precisione lungo la verticale (z) è più alta rispetto all'asse x e y. La deviazione standard rimane in tutti i casi inferiore a 1.1 mm. Non esiste nessuna correlazione tra la precisione (deviazione standard) e le quantità di silicato di sodio versato a parità di distanza percorsa dal braccio meccanico. L'accuratezza, calcolata con l'equazione 2, è simile in tutte le direzioni e anche in questo caso non viene influenzato dalle quantità di fluido versato.

Inoltre, i campioni stampati con gli scarti di cava EP hanno la precisione e l'accuratezza simile ai campioni stampati con gli aggregati standard.

Tavola 6 Dimensioni con deviazioni standard delle misure dei cubi stampati e accuratezza (calcolata con l'eq. 2) della stampa 3D (Voney et al. 2020)

V/dist	scarti di cava			sabbia fluviale		
	dimensioni					
µl/mm	x (mm)	y (mm)	z (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
0.5	43 ± 0.8	42 ± 0.5	43 ± 0.0	42 ± 0.3	42 ± 0.6	43 ± 0.4
0.75	42 ± 0.5	42 ± 1.0	42 ± 0.3	42 ± 0.7	42 ± 0.9	43 ± 0.4
1	42 ± 0.9	42 ± 1.1	42 ± 0.3	42 ± 0.7	42 ± 0.6	43 ± 0.0
	accuratezza					
µl/mm	x (%)	y (%)	z (%)	x (%)	y (%)	z (%)
0.5	6.6	5.3	6.2	5	4.2	6.9
0.75	6.1	5.9	6	5.8	5.4	6.7
1	5.3	5.6	5.7	4.8	4.4	7.5

Prototipi di stampa

Come esempio concreto, con gli aggregati di scarti di cava EP si sono prodotti 2 prototipi per valutare le potenzialità e le possibilità di un elemento architettonico stampato con questa tecnica. La Fig. 15a mostra un elemento stampato con delle cavità ondulate. La struttura alveolare si ingrandisce dal basso verso l'alto ed è stata progettata per valutare qualitativamente il limite di dettaglio degli ornamenti stampati. Inoltre, si nota l'alta porosità che va a influire sia sulla resistenza sia sull'estetica dell'elemento. Nella Fig. 15b l'elemento stampato mostra una struttura alveolare regolare e la tessitura è meno porosa. Da un prototipo all'altro sono stati fatti degli accorgimenti per diminuire la porosità ma l'elevata porosità rimane tutt'oggi una criticità. Attualmente si stanno cercando delle soluzioni per diminuirla.

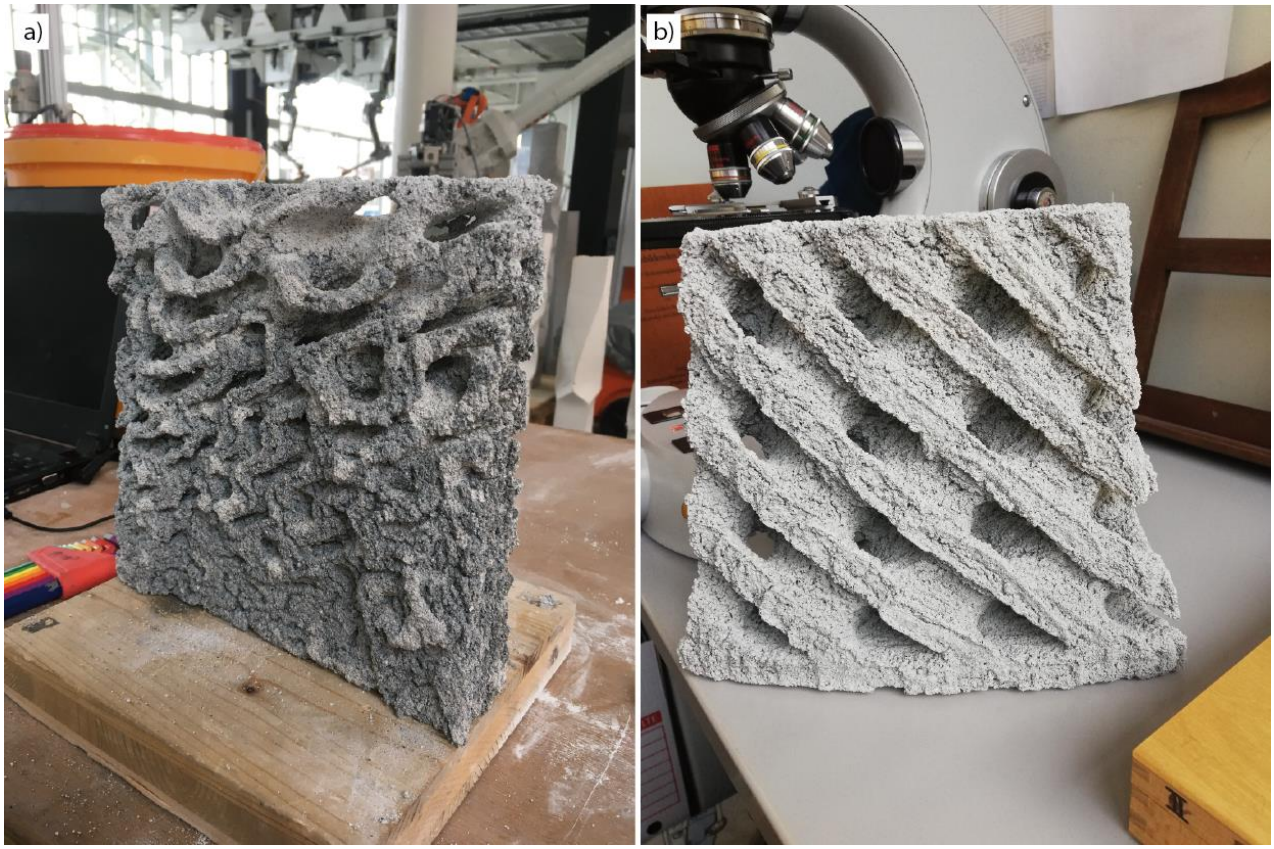

Figura 15 Esempi di prototipi stampati con la stampa a reazione del geopolimero

4.3.3. Valutazioni finale sulla tecnica di stampa a geopolimero

La versatilità di questa tecnica di stampa 3D permette di stampare elementi molto complessi che deviano dalla verticalità dell'elemento (p. es. archi, cavità) e con dettagli leggermente inferiori al centimetro.

Da un punto di vista ambientale, questa tecnica di stampa è più sostenibile rispetto alle tradizionali tecniche di produzione di malte cementizie o di calcestruzzo. Di fatto, l'industria edile consuma più del 40 % delle risorse disponibile (per es. Horvath, 2004) e causa enormi emissioni di CO_2. A differenza della reazione del cemento portland, che globalmente produce 7% dell'emissione totale di CO_2 (p. es. Coppola et al. 2018), la reazione del geopolimero è a zero emissione di CO_2. Inoltre, la stampa 3D permette di posizionare materiale solo dove è necessario da un punto di vista della statica, risparmiando il consumo della materia prima e non producendo scarti. L'impatto ecologico del geopolimero potrebbe essere ulteriormente ridotto incrementando la reattività delle miche dell'aggregato. I trattamenti termici sugli aggregati eseguiti in questo studio non hanno aumentato la loro reattività. Per raggiungere tale fine, in un futuro studio, si potrebbe combinare trattamenti termici con quelli chimici, come si è riuscito ad ottenere con i scarti di cava di granito (Tschadjié et al., 2015).

Da una prospettiva commerciale, il prototipo di stampante non è ancora maturo per l'industrializzazione. Di fatto, gli elementi sono relativamente ridotti (50x40x30 cm) e la stampante non è stata sviluppata per la produzione di elementi in serie. Sussistono inoltre delle criticità sulle resistenze alla compressione e sulla durabilità dei geopolimeri stampati. I 10-12 MPa di resistenza alla compressione non sono sufficienti per la costruzione di elementi strutturali e sono al limite dell'applicabilità su elementi non strutturali come per esempio lastre di facciata. L'alta porosità, oltre che a incidere sulla resistenza alla compressione, rende il materiale poco durevole soprattutto sotto l'effetto di ripetuti cicli di gelo e disgelo. Ciò nonostante, materiali porosi fatti con scarti di cava hanno proprietà igroscopiche che all'interno di edifici possono avere dei benefici positivi sul microclima (De Rossi et al. 2018). Quindi, con lo stato dell'arte della tecnica è pensabile di applicare la tecnica per elementi non standard all'interno di edifici per diventare un tool nell'industria del design. Bisogna però considerare che questa tecnica è agli albori e che il potenziale di miglioramento delle proprietà meccaniche del prodotto stampato è elevato. Non bisogna quindi escludere l'ipotesi di stampare elementi architettonici ev. anche strutturali per un impiego esterno. Il grande punto di forza di questa tecnica è che, adeguata la ricetta del geopolimero e i parametri di stampa, essa necessita di conoscenze minime di robotica/meccatronica (si tratta di un braccio robotizzato xyz simile a quelli già esistenti nel mondo della pietra naturale) e non esistono criticità reologiche durante la stampa come è il caso nelle stampe a estrusione di malte cementizie. Quindi se i limiti tecnici vengono risolti, l'applicazione nel mondo dell'edilizia può avvenire senza un eccessivo investimento di conoscenza e in tecnologia. Le dimensioni degli elementi stampati e i costi attuali del geopolimero limitano l'impiego di questa tecnica alla stampa di elementi di decoro come per esempio lastre di facciata.

4.4. Stampa 3D del cassero con polimero plastico rPLA e getto della malta cementizia

Il principio di questa tecnica di stampa è rappresentato nella Fig. 1.3 e consiste nel stampare con resine plastiche rPLA il negativo (quindi il cassero) o il positivo dell'elemento (da cui si genera il cassero in un altro materiale). La malta cementizia o il calcestruzzo vengono gettato nel cassero in un secondo momento. Quindi non si tratta in senso stretto di una stampa 3D. Questa tecnica è nata da una richiesta del Laboratorium 3D, startup di Biasca che simula in laboratorio i comportamenti idrodinamici di letti di fiumi in piena. Con questa tecnica si sono prodotti dei tetrapodi con delle corrugazioni complesse da posizionare nei letti di fiumi dei simulatori del laboratorio.

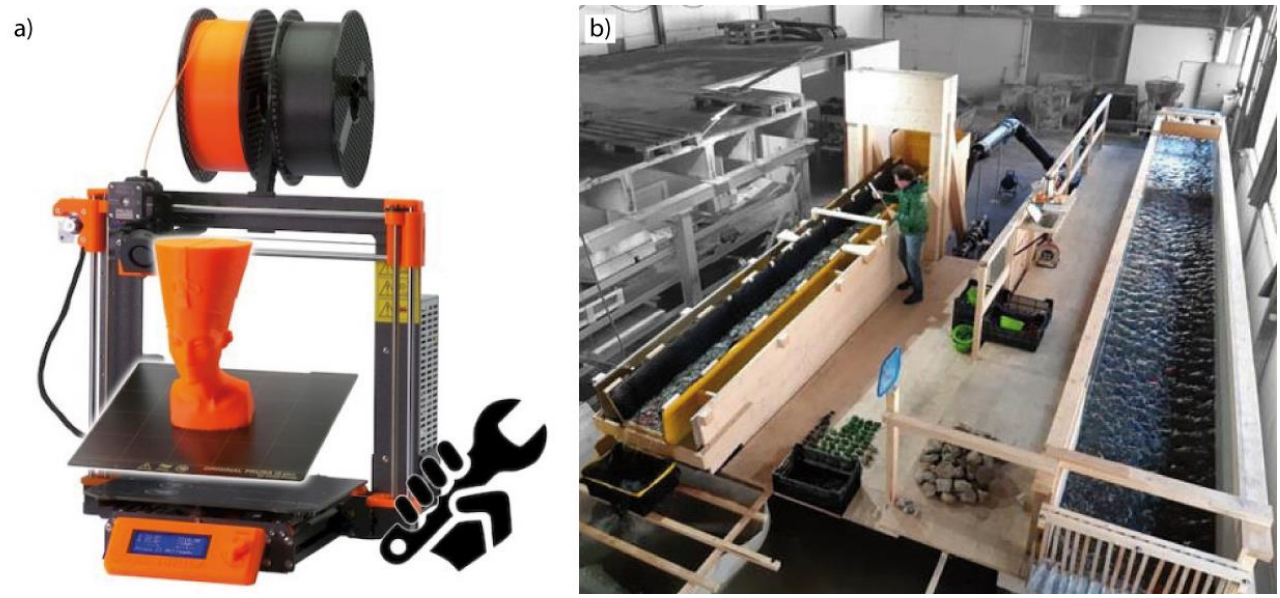

Figura 16 (a) La stampante commerciale Prusa MK2.5s in dotazione del Fablab utilizzata in questo progetto per stampare con le resine plastiche rPLA. (b) Simulatori di letti di fiume della startup Laboratorium 3D da cui è partita la richiesta di stampare i tetrapodi da collocare all'interno dei simulatori.

4.4.1. Materiali

Questa tecnica di stampa è stata sviluppata dai ricercatori SUPSI Filippo Schenker, Samuel Antonietti e Marco Lurati (FabLab) con l'ausilio di una stampante commerciale Prusa MK2.5s (Fig. 16). I modelli digitali sono strati elaborati con il software Fusion 360 di Autodesk. Nel corso del progetto sono stati sperimentati due procedimenti. Nel *Procedimento 1* si è stampato il cassero (la negativa dell'elemento) in rPLA (ReForm rPLA - black) e in seguito si è gettato una malta a presa rapida. *Nel Procedimento 2* si è invece stampato l'elemento con rPLA (ReForm rPLA - Off-White). Da questo elemento si è poi generato un cassero in silicone (SCS-RTV 3428 A&B della Swiss-Composite). Nel cassero in silicone si è poi gettata la malta cementizia. In entrambe i casi si è optato per una malta a presa rapida (Geolite© 10 della Kerakoll) per accelerare i tempi di sperimentazione ma può essere sostituito da una malta con aggregati di cava.

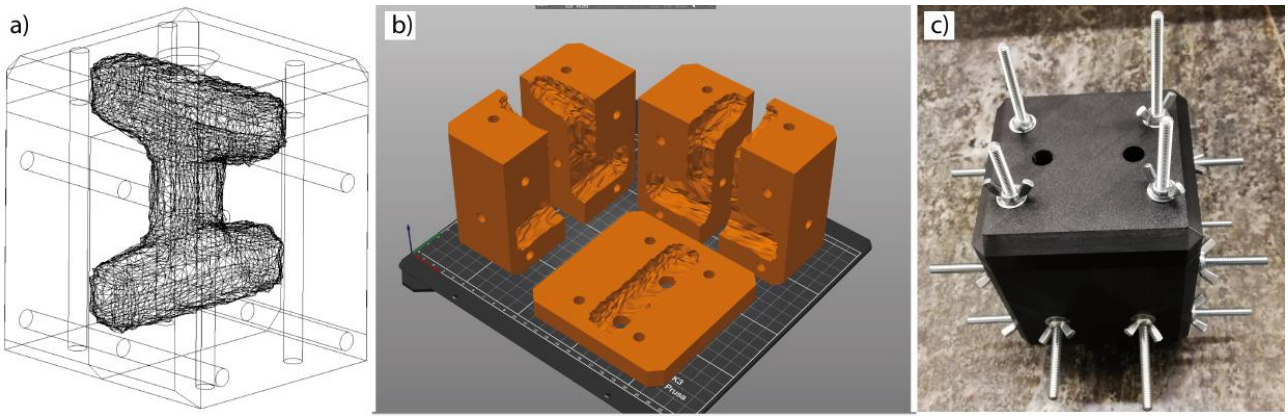

Figura 17 Varie fasi della progettazione del tetrapodo: (a) tetrapodo in forma digitale, (b) rappresentazione in 3D del cassoro, (c) cassero stampato e fissato con barre e viti.

4.4.2. Metodi e Risultati

Procedimento 1:

La struttura del cassero è stata progettata a partire dal tetrapodo ricevuto in forma digitale da Laboratorium 3D (Fig. 17a). Durante lo sviluppo, particolare attenzione è stata posta alla composizione del cassero che permettesse il getto delle malte cementizie e lo scasseramento. Si è optato per un cassero a 4 pareti e un coperchio con 2 bocchette per gettare le malte (Fig. 17b e c). Tutti i pezzi vengono fissati con delle barre in metallo. Il getto è avvenuto su una tavola vibrante.

Nello scasseramento il tetrapodo si è fratturato nel cassero in rPLA la cui rigidità non ha permesso il distacco delle complesse rugosità dell'elemento (Fig. 18). Elementi meno curvilinei possono essere scasserati più facilmente.

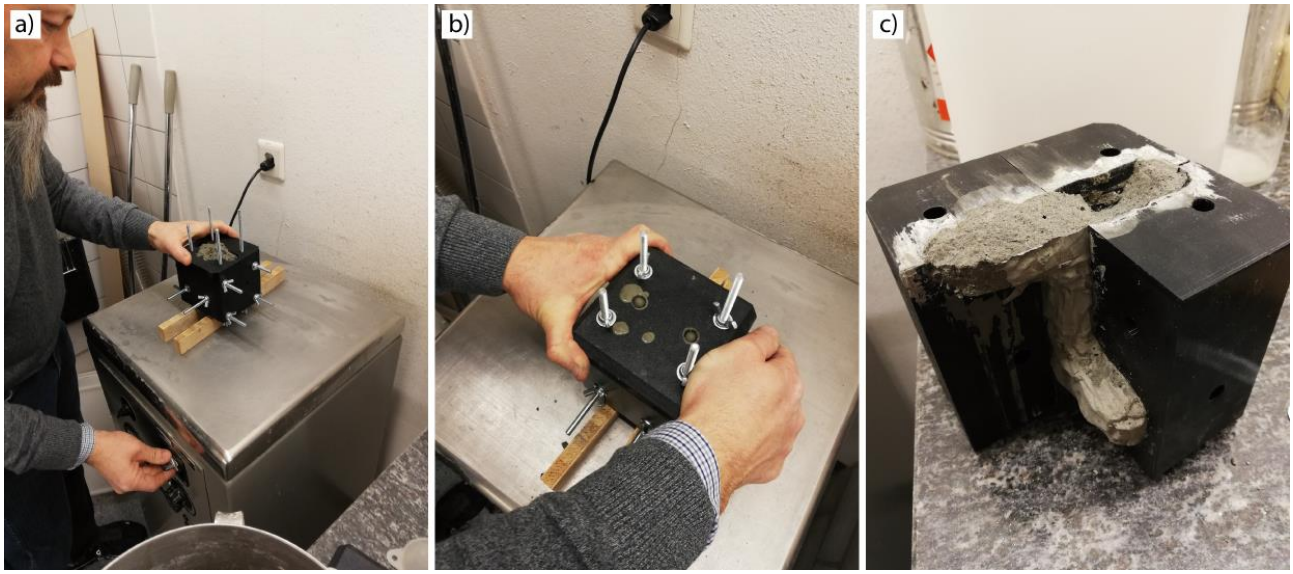

Fig. 18 Fasi del getto della malta cementizia su un tavolo vibrante ((a) e (b)). (c) Tetrapodo fratturato durante lo scasseramento. La rigidità del rPLA non ha permesso il distacco degli elementi particolarmente rugosi.

Procedimento 2:

Per ovviare al problema dello scasseramento del *Procedimento 1* si è deciso di produrre un cassero in silicone. Attualmente non esistono stampanti a silicone. Per produrre il cassero in silicone si è introdotto il tetrapodo stampato con rPLA in un contenitore cubico fissandolo a un asse in legno tramite due cilindri che nel cassero in silicone costituiscono i fori in cui si gettano le malte cementizie (Fig. 19). Dopo di che si è gettato il silicone nel contenitore cubico (Fig.19b). Per mischiare il silicone a due componenti SCS-RTV 3428 A&B della Swiss-Composite è opportuno usare pigmenti e agitare il silicone con un ferro a "uncino" inserito nel trapano. Per evitare la formazione di troppe bolle d'aria sarebbe opportuno mettere il silicone sottovuoto prima di gettarlo. Il recipiente non dev'essere troppo pieno (massimo a metà) perché durante il "degassamento" in vacuum il volume del silicone può aumentare di ca. 2 volte.

Durante il getto della malta cementizia, il cassero in silicone può essere confinato sia dal recipiente cubico con cui è stato costruito (Fig. 19b) sia dall'adesivo. I tetrapodi in malta cementizia ottenuti con questa tecnica hanno modellato perfettamente i dettagli dell'elemento digitale. L'elasticità del silicone ha permesso uno scasseramento anche di elementi con ornamenti molto complessi (Fig. 20).

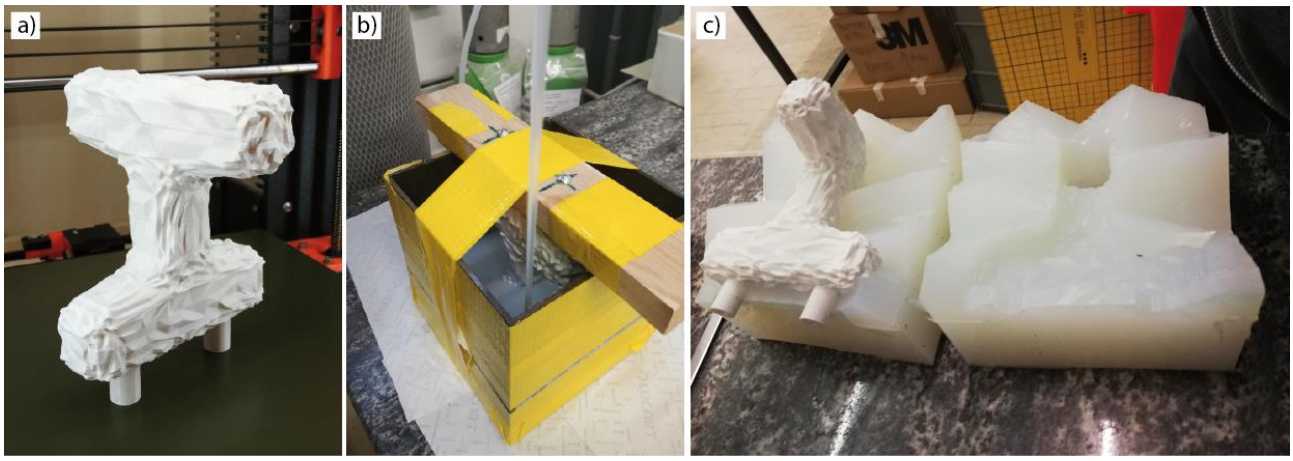

Figura 19 (a) Tetrapodo in rPLA. (b) Getto del silicone in contenitore cubico con all'interno il tetrapodo in rPLA. (c) Silicone indurito e tagliato a metà che funge da cassero per le malte cementizie.

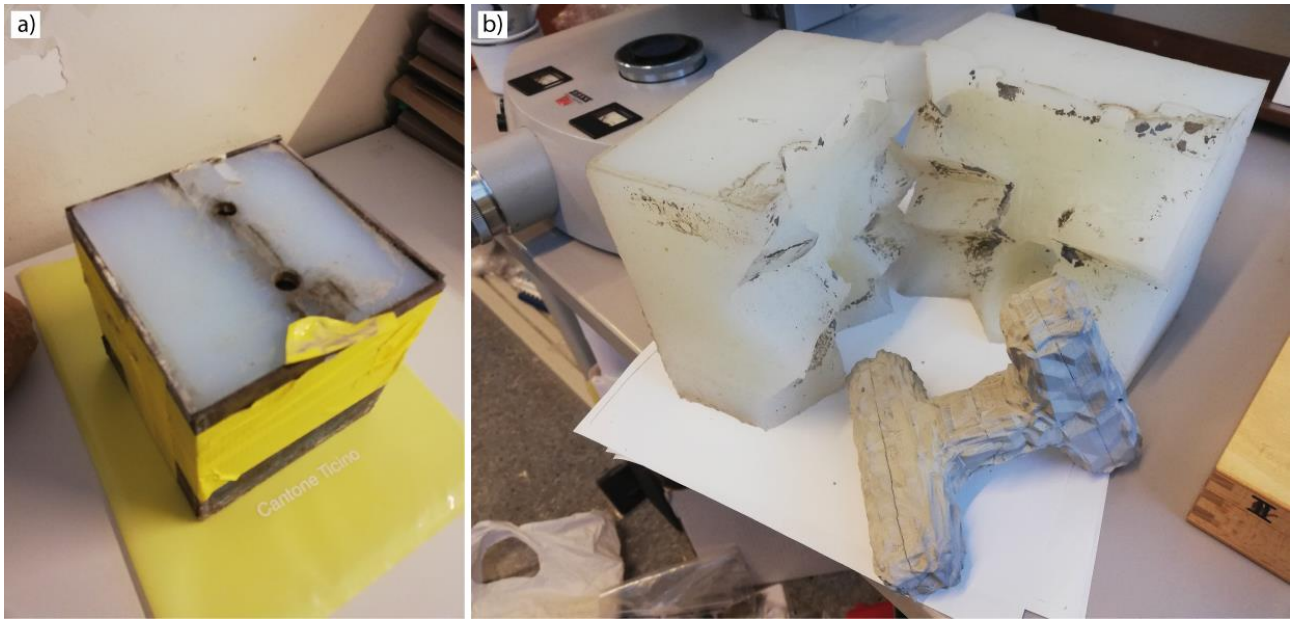

Figura 20 (a) Cassero in silicone in cui è stata gettata la malta cementizia. (b) Tetrapodo scasserato in malta cementizia con cassero in silicone.

4.4.3. Valutazioni finale sulla tecnica di stampa a polimero plastico rPLA e getto della malta cementizia

Questi metodi per produrre elementi complessi in malte cementizie è versatile, poco costoso (il costo di una stampante a rPLA si aggira attorno a 800.- CHF), non richiede conoscenze specifiche sul materiale e risulta essere particolarmente conveniente quando bisogna riprodurre un elemento complesso molteplici volte. L'utilizzo di resine platiche e di silicone non rende il prodotto particolarmente ecologico.

Il *procedimento 1* con il cassero in rPLA è efficiente per produrre elementi complessi ma con superfici lisce che permettono lo smantellamento del cassero. Il *procedimento 2* con il cassero in silicone ha il vantaggio che potenzialmente può riprodurre qualsiasi elemento in 3D. Il loro utilizzo a scala industriale è però ipotizzabile solo sulla produzione di elementi di scala ridotta (< 1m).

5. Impiego delle stampe 3D nell'ambiente costruito: valutazione strutturale-architettonica

5.1 Calcestruzzi e pietre artificiali

Figura 21 Impiego di elementi architettonici in pietra artificiale nella costruzione dei piani di terra di edifici a Lugano. (Fonte: Stefano Zerbi)

Sin dagli albori del suo sviluppo ed impiego il calcestruzzo, armato o non armato, è stato utilizzato per produrre elementi prefabbricati[1]. I calcestruzzi con aggregati piuttosto fini impiegati per la produzione di elementi prefabbricati decorativi sono stati spesso definiti nel passato come pietre artificiali. Essi hanno sostituito elementi costruttivi e architettonici che fino agli inizi del XX secolo erano stati prodotti con le pietre naturali. Questo impiego è largamente diffuso anche nel Canton Ticino a partire dagli inizi del '900 per elementi quali davanzali, architravi e stipiti di porte e finestre, balaustre di balconi, mensole, balconi, scalini, elementi decorativi. Tutti questi elementi dell'architettura sono caratterizzati dall'essere prefabbricati in officina e poi messi in opera in cantiere; prodotti in grande numero sulla base di stampi e casseforme che riproducono modelli definiti; presentano delle lavorazioni di superfici particolari (simili a quelle della pietra naturale) e una tessitura fine e omogenea. Questi elementi fanno parte di un sistema costruttivo, quello della muratura a conci, basato su elementi ripetuti messi in opera e accostati con una malta legante. Quest'impiego è andato scomparendo a favore di quello del calcestruzzo armato gettato in opera. Materiale "plastico" che assume la forma della cassaforma, ma questa volta alla scala del manufatto intero, sia esso edificio o opera d'arte. Negli ultimi anni gli elementi costruttivi in calcestruzzo armato prefabbricati sono sempre più impiegati non solo nell'ambito dell'edilizia industriale, ma anche in quella residenziale e amministrativa e questo anche nel Canton Ticino. Per esempio, i due nuovi Campus della SUPSI, Campus Supsi-Usi di Viganello e Campus Mendrisio, sono realizzati con questo sistema costruttivo. Esistono in questo settore alcune ditte attive sul territorio del Canton Ticino. Inoltre il tema del rivestimento degli edifici, quindi della parte più esterna dell'involucro è tornato di grande attualità sia presso i progettisti sia presso i committenti. Ne è da esempio la produzione di uno dei più grandi uffici d'architettura svizzeri, di fama mondiale, Herzog & De Meuron. I rivestimenti contemporanei, anche con materiali minerali quali i calcestruzzi, tendono sempre di più verso l'elemento speciale piuttosto che seriale e in questo ambito la stampa 3D costituisce sicuramente una risposta alla possibilità di personalizzazione unita alla produzione industriale o industrializzata[2].

[1] Per esempio le realizzazioni del pioniere del "cemento armato" Joseph Luis Lambot che nel 1848 realizzò una barca in cemento armato. Bosc, Jean-Louis, et al. *Joseph Monnier et la naissance du ciment armé*, Paris, Editions du Linteau, 2001.

[2] A questo proposito si veda il grande numero di ricerche e pubblicazioni su questo argomento. Per esempio: Sanjayan, Jay G., ed. *3D concrete printing technology. Construction and building applications*, Amsterdam, Butterworth-

Alla luce di questi antecedenti storici e degli sviluppi attuali delle tecniche costruttive, lo sviluppo di calcestruzzi per la stampa 3D e degli elementi con essi prodotti è sicuramente auspicabile.

5.2 Calcestruzzo e stampa 3D

Nella stampa 3D di elementi in calcestruzzo, sia armato sia non armato, si assiste ancora ad una situazione di realizzazione di prototipi volti a consolidare sia le conoscenze del processo sia le conoscenze e caratteristiche dei materiali. Una vera e propria produzione industriale non esiste ancora. In particolare, si è ancora al livello della realizzazione di elementi, quindi ad una prefabbricazione, e non alla scala dell'edificio, anche se realizzazioni di piccole dimensioni esistono. In particolare uno degli ambiti di ricerca e sviluppo attuali è quello della stampa 3D di elementi in calcestruzzo armato dove l'armatura in acciaio costituisce un problema per la sua integrazione. Una risposta possibile è quella dell'impiego dei calcestruzzi fibrorinforzati, che presentano però in generale una consistenza troppo liquida e quindi una difficoltà ad essere stampati. Per ovviare al problema dell'armatura, quindi del rinforzo strutturale, alcune esperienze recenti hanno impiegato una tecnica mista che consiste nella stampa 3D di un "guscio", con valore estetico e di cassaforma a perdere, che permette la messa in opera di un calcestruzzo armato tradizionale oppure del calcestruzzo fibrorinforzato[3]. In altri casi, la resistenza meccanica dell'elemento non viene assicurata tramite le armature, ma tramite la stampa di nervature disposte all'interno della forma[4]. Ad oggi, la stampa 3D del calcestruzzo permette la produzione di elementi prefabbricati decorativi e/o strutturali che spaziano dal campo dell'arredo interno ed esterno a quello dell'edilizia civile.

Figura 22 Esempi di tecniche di stampa 3D di calcestruzzi. Dagli elementi decorativi e d'arredo, alle strutture sino a parti intere di edifci. (Fonti: cobod.com; xtree.eu; cybe.eu; ETHZ)

Heinemann, 2019. Wangler, Timothy; Flatt, Robert J. ed., *First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018*, (RILEM bookseries ; volume 19), Cham, Springer, 2019.

[3] Gaudillière, N. et al., "Building applications using lost formworks obtained through large-scale additive manufacturing of ultra-high-performance concrete", in: Sanjayan, Jay G., ed. cit., pp. 37-58.

[4] Vantyghem, G. et al., "Compliance, stress-based and multi-physics topology optimization for 3D-printed concrete structures", in: Wangler, Timothy; Flatt, Robert J. ed., cit., pp. 323-332.

5.3 Possibili impieghi nell'edilizia

Per individuare e caratterizzare i possibili impieghi nell'edilizia di elementi prodotti in calcestruzzo tramite la stampa 3D si è deciso di suddividere questi ultimi secondo tre tipi di produzione principali. Stampa di elementi pieni; stampa di elementi a guscio con riempimento; stampa di elementi cavi con o senza nervature di rinforzo.

Vista la diffusione della pietra artificiale nell'architettura del Canton Ticino un impiego possibile della stampa 3D è quello di produrre elementi di sostituzione unici o in serie per il restauro e recupero di monumenti storici ed edifici di valore patrimoniale. L'acquisizione delle geometrie tramite scansione laser degli elementi originali permette la produzione tramite stampa 3D senza casseforme o altri tipi di stampo. Nell'ambito delle nuove costruzioni a medio termine gli elementi prefabbricati tramite stampa 3D potrebbero sostituire altri elementi in calcestruzzo gettato in casseforme. Per esempio gli elementi di rivestimento oppure nella produzione di casseforme a perdere con alto valore estetico e funzionale[5]. Per questi elementi la stampa 3D permette sia un'ottimizzazione nell'impiego del materiale (quantità) sia una personalizzazione delle forme e delle geometrie (unicità). L'ottimizzazione nell'impiego del materiale e quindi una sua riduzione in termini di quantità è al servizio di una maggiore sostenibilità di questi elementi prefabbricati.

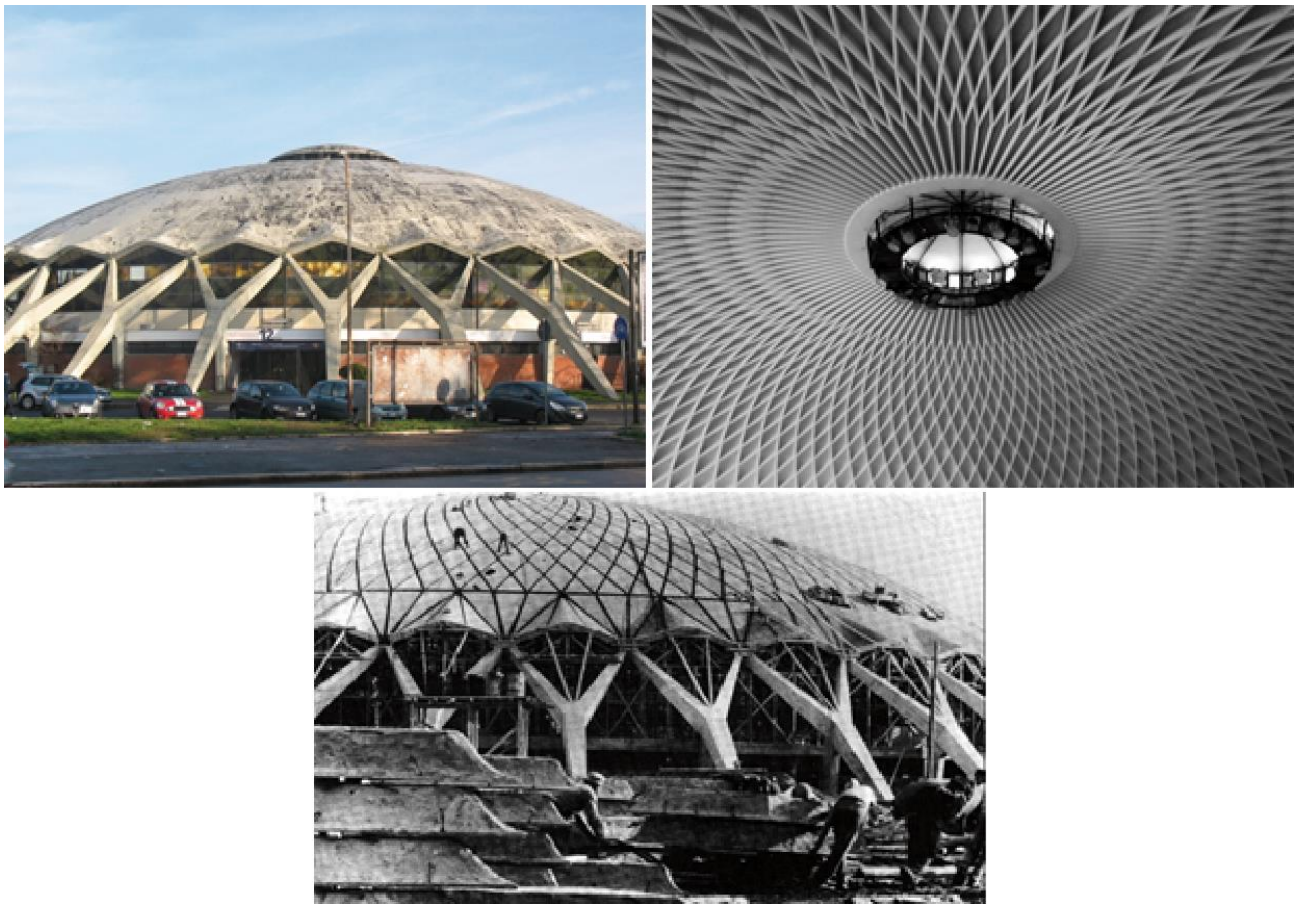

Figura 23 Pier Luigi Nervi, Annibale Vitellozzi - Palazzetto dello Sport - Roma - 1956-1957. Vista esterna; intradosso della cupola e foto di cantiere con le casseforme a perdere.

[5] Per esempio rivedendo e attualizzando le esperienze compiute dall'ingegnere Pier Luigi Nervi negli anni '50 del XX secolo con le casseforme in ferrocemento, come nel progetto del Palazzetto dello Sport di Roma del 1956-1957.

Tavola 7 Tabella riassuntiva dei possibili impieghi della stampa 3D

	ELEMENTO PIENO	STAMPA 3D DELLA CROSTA CON GETTO ITEGRATIVO INTERNO	ELEMENTO CAVO
ELEMENTI STRUTTURALI			
Nuove costruzioni	SI	SI	SI con possibilità di alleggerimento
Restauri	SI	SI con possibilità di rinforzo strutturale	SI
ELEMENTI NON STRUTTURALI			
Nuove costruzioni	SI	SI	SI
Restauri	SI	SI	SI
RINFORZO / ARMATURA	Necessità di rinforzo / armatura		Necessità di rinforzo / armatura
VANTAGGI	Possibilità di impiego di calcestruzzi alveolari per elementi termicamente isolanti.	Qualità estetiche della crosta. Qualità strutturali del getto integrativo p.e. con impiego di calcestruzzi fibro-rinforzati o tradizionali armati.	Possibilità di alleggerimento per elementi prefabbricati. Proprietà di isolamento termico.
CRITICITÀ		Comportamento dell'interfaccia.	

6. Incontri e discussioni con i stakeholder

Nel corso dello svolgimento dello studio abbiamo incontrato e intervistato gli stakeholder territoriali coinvolti nella filiera dello scarto di cava per individuare i possibili protagonisti di un sviluppo industriale ad alto valore aggiunto con stampanti 3D. Nella Tavola 7 sono elencati i punti chiave delle interviste che hanno aiutato nella mappatura dell'albero della filiera (Fig. 24) e che hanno permesso una valutazione economica sostenibile lungo tutti i nodi della filiera.

Durante il mese di febbraio 2019, si è proceduto alla raccolta dei campioni nelle cave oggetto di indagine e contemporaneamente si è sfruttata tale occasione per confrontarsi con i cavisti in merito alle seguenti questioni:

(i) la configurazione del loro business e le prospettive future;

(ii) l'attuale gestione dei residui di cava;

(iii) la possibile esplorazione di opportunità connesse al riuso dei residui di cava.

Per quanto riguarda il primo tema sono emerse situazioni alquanto variegate e differenti. Alcuni cavisti hanno una buona posizione sul mercato, anche a livello internazionale, grazie alla qualità e alla particolarità del gneiss estratto, tanto da poter vendere il materiale non lavorato a soggetti terzi. Altri hanno cave che con un basso tasso di rendimento, con percentuali di scarto elevato, con difficoltà di mercato che rendono particolarmente critico il mantenimento dell'equilibrio economico e hanno, pertanto, prospettive future incerte.

La natura del materiale, il grado di sfruttamento della cava e la percentuale di scarto giocano un ruolo essenziale nel determinare, in prima istanza, le possibilità di successo e di sviluppo nel lungo termine. Accanto a questi elementi di carattere strutturale, si accompagnano atteggiamenti imprenditoriali profondamente diversi. Da chi ha una prospettiva fortemente imprenditoriale, con atteggiamento proattivo ed esplorativo rispetto alle opportunità che si presentano a chi, all'opposto, mostra un atteggiamento meno proattivo, con un modesto orientamento all'innovazione.

Per quanto riguarda l'attuale gestione dei residui di cava è necessario premettere che esistono tre differenti tipologie. La prima tipologia di residuo di cava è dato da ciò che si genera durante l'estrazione in cava, determinato dalla rottura dei blocchi. Tale residuo è usualmente lasciato presso il sito di estrazione e

riutilizzato per il rinverdimento della cava stessa o per la costruzione di vie di accesso. Il secondo tipo di residuo di cava, maggiormente pregiato e campionato in questo lavoro, è invece derivante dalle lavorazioni ed è costituito da pezzi di grandezza differente ma costituite da materiale, non appartenente alle due principali categorie immesse sul mercato (1a e 2a scelta). Lo stoccaggio di questo materiale, a seconda dell'organizzazione interna della cava, può favorire o sfavorire il suo riutilizzo, in funzione del grado di purezza. Una terza tipologia di residuo è il limo di segagione, ovvero un residuo sottilissimo, misto ad acqua e altre sostanze che viene generato durante il taglio del materiale.

Tavola 7: Interviste con alcuni dei principali attori coinvolti nell'utilizzo degli aggregati di cava.

Data	Nome	Attori	Discussione
06.02.2019	Cave E.Pollini, M. Bettazza e Pollini	Cavisti	Disponibilità a fornire materiale di scarto; strategie di business eterogenee; pochi disposti a investire in nuove tecnologie
07.02.2019	Cave Ongaro, Polti, Legiuna e Bignasca	Cavisti	
10.09.2019	Paolo Muscionico, IFEC ingenieria SA	Esperto ripari fonici	Stampa 3D per ripari fonici? Difficile lungo autostrade e ferrovie, perchè i ripari fonici impiegati in questo contesto devo essere resistenti a forti urti, gelo e sali. Attualmente le proprietà dei materiali stampati non esaudiscono tali requisiti. Possibile per stutture interne.
07.10.2019	anonimo	Esperto di calcestruzzo	Stampa 3D ha futuro? Anche OMYA prevede l'acquisto di una stampante 3D, ma gli obbietivi non sono ancora definiti.
07.11.2019	anonimo	Produttore di aggregati	Il costo dell'aggregato di cava? Al momento il materiale Italiano costa meno di quello prodotto in loco (vedi analisi costi).
14.11.2019	anonimo	Produttore di calcestruzzi	Interesse alla stampa 3D con geopolimero? Mancanza di mercato, però sostegno a tessere contatti con il loro centro di ricerca.
06.12.2019	anonimo	Produttore di prefabbricati	Interesse alla stampa 3D con geopolimero? Si, inizio della collaborazione

Attualmente i residui di cava costituiscono uno dei problemi principali da gestire in termini di stoccaggio e smaltimento. È necessario comunque essere consapevoli che la generazione di residui di cava può essere minimizzata attraverso l'affinamento e la cura del processo di taglio della pietra, ma in ogni caso rappresenta una caratteristica strutturale del business.

Rispetto al terzo tema di discussione è emerso un forte interesse nella ricerca di soluzioni per il riutilizzo dello scarto di cava. Al contempo, data la natura e il focus del loro business basato sull'estrazione e sulla lavorazione dei pezzi finiti, riconoscono nella maggioranza dei casi che l'esplorazione dell'opportunità di business prospettata – il riuso del materiale in edilizia o il riuso del materiale mediante stampe 3D – è un'opzione molto lontana dal loro core business. Pertanto la tendenza generale è nel porsi rispetto a questa opzione come partner e fornitori di materiale. Non è percepita come un'opzione perseguibile l'apertura di una nuova area strategica d'affari all'interno delle loro imprese esistenti. La costituzione di una eventuale start-up sarebbe, da quanto rilevato dagli attori, la via maggiormente perseguibile. Non è da escludere a priori la definizione di un solido rapporto di partnership, di comune interesse, tra un'eventuale start-up e l'impresa o le imprese fornitrici, anche se ciò si presume non possa prescindere da un percorso di messa a fuoco di un chiaro modello di governance, interconnesso ad uno specifico modello di business.

7. Panoramica sulla filiera dell'utilizzo degli scarti di cava

Per meglio identificare e comprendere le opportunità nella valorizzazione di questo materiale di scarto si è optato per la ricostruzione della filiera produttiva che questo materiale potrebbe ipoteticamente seguire, identificandone i principali attori che la costituirebbero. Per effettuare questo lavoro, nel corso delle analisi, si sono effettuate interviste con i principali attori (vedi Cap. 6). In particolare, si è avuto un confronto diretto con un attore attivo nella frantumazione del materiale per la creazione dell'aggregato, con un produttore di calcestruzzo e con un produttore di prefabbricati in calcestruzzo (Tav. 7). Il lavoro ha portato alla creazione

di un “albero” delle opportunità e dei potenziali sbocchi sul mercato di questo prodotto di scarto. Il percorso identificato tiene in considerazione come principale obiettivo l’individuazione delle principali opportunità che possano portare questo scarto da essere fonte di costo a potenziale prodotto ad alto valore aggiunto; fungendo da materia prima per altri processi produttivi non legati all’industria della pietra ma bensì all’industria edile. Per trarre le dovute considerazioni, in tale processo sono stati mappati anche gli interessi ed eventuali criticità percepiti degli attori che costituiscono tale filiera. La filiera della pietra non è stata oggetto di studio, in quanto percorso naturale di valorizzazione dello gneiss ticinese.

Dalle analisi effettuate ne risulta il seguente percorso, schematizzato nel diagramma (Fig. 24), e descritto ed esplicato in maniera succinta nei paragrafi successivi mettendo in luce gli aspetti ritenuti maggiormente rilevanti ai fini di progetto.

Come si evince dal diagramma (Fig. 24), i primi due sbocchi possibili per questo scarto sono lo smaltimento e il riutilizzo in cava. Per quanto concerne il primo, esso si ramifica in due opzioni principali che sono lo smaltimento in discarica a pagamento oppure in cava tramite l’attività di riempimento di vecchie zone di estrazione. L’opzione di smaltire in discarica questi scarti, come dalle schede V8 – “Cave”, V6 – “Approvvigionamento in materiali inerti” e V7 – “Discariche del Piano direttore cantonale”, diventa onerosa per i cavisti in quanto i volumi sono veramente ingenti, e tale costo è quello che sta mettendo attualmente la loro attività sotto ulteriore pressione economica. Per contro l’opzione di smaltire, nel limite del possibile e nel rispetto delle leggi vigenti, tale materiale (in particolare lo scarto di scavo) all’interno della cava stessa porta a sgravare le aziende da tali costi. In quest’ottica di riduzione dei costi è orientato anche lo sbocco nel riutilizzo in cava, di fatto parte del materiale può essere riutilizzato nelle opere di “strutturazione” della cava come ad esempio l’impiego del limo per creare (o pareggiare) il fondo della cava e delle rampe di accesso ai luoghi di estrazione oppure l’uso degli scarti di maggiori dimensioni (blocchi di gneiss) per la creazione di pareti di contenimento e di sostegno come pure per la costruzione di rampe e strade all’interno della cava.

Con questi due primi sbocchi non si assiste ad una vera e propria valorizzazione dello scarto ma bensì ad attività, peraltro già praticate dai cavisti, per allentare la pressione sui costi. Queste prime opzioni sono di facile percorribilità e a costo quasi nullo per queste aziende, inoltre, non prevedono o non necessitano l’intervento di attori terzi perché tutto può essere effettuato con macchinari e attrezzature di cui già dispongono.

Per contro, per un’effettiva valorizzazione dello scarto all’interno dell’industria edile il materiale grezzo deve entrare in un processo di lavorazione, il cui primo passo è la frantumazione dello scarto con conseguente selezione. Questa fase è fondamentale in quanto permette di portare il materiale dallo stato di scarto a quello di materia prima per l’edilizia. Questa prima lavorazione, come si evince dallo schema, può avvenire in loco utilizzando unità mobili di frantumazione (come quelle impiegate in questo studio) oppure in impianti fissi di frantumazione. Questo significa che i cavisti potrebbero anche integrarsi a valle nella filiera con quest’attività, ovvero preparando questa materia prima potenzialmente vendibile direttamente in cava. Per questa operazione vanno tenuti in conto il costo del servizio di frantumazione oppure in costo dell’acquisto del macchinario, il costo di lavorazione ed il costo per lo stoccaggio della materia prima realizza.

Per quanto concerne la frantumazione in impianto, ad oggi, i cavisti cedono (solitamente) questo materiale di scarto ad aziende attive nella frantumazione; le quali si assumono integralmente i costi di trasporto e lavorazione del materiale con l’onere di vendere il frantumato per rientrare nei costi dell’operazione. In questa fase è emersa l’importanza della tipologia di scarto in quanto con quello di scavo il frantumatore si trova a sua volta con la creazione di un 30% di scarto (soprattutto terriccio derivante dal terreno superficiale), cosa che si riduce con lo scarto di lavorazione arrivando ad un massimo del 20%. A titolo di confronto con la lavorazione di materiale proveniente da scavo fluviale il frantumatore ha uno scarto massimo del 5%. Questo aspetto rende fondamentale una prima selezione del materiale da parte del cavista per rendere maggiormente attrattiva l’operazione, il quale come vantaggio ottiene una riduzione del costo di smaltimento del proprio materiale di scarto ed il rischio del mancato venduto ricade interamente sull’azienda frantumatrice.

In questa fase di lavorazione lo scarto, diventato materia prima per l’edilizia, può dunque prendere la forma di “prodotto finito” e finire direttamente sul mercato oppure diventare una componente per la produzione e l’impiego di calcestruzzi o malte cementizie.

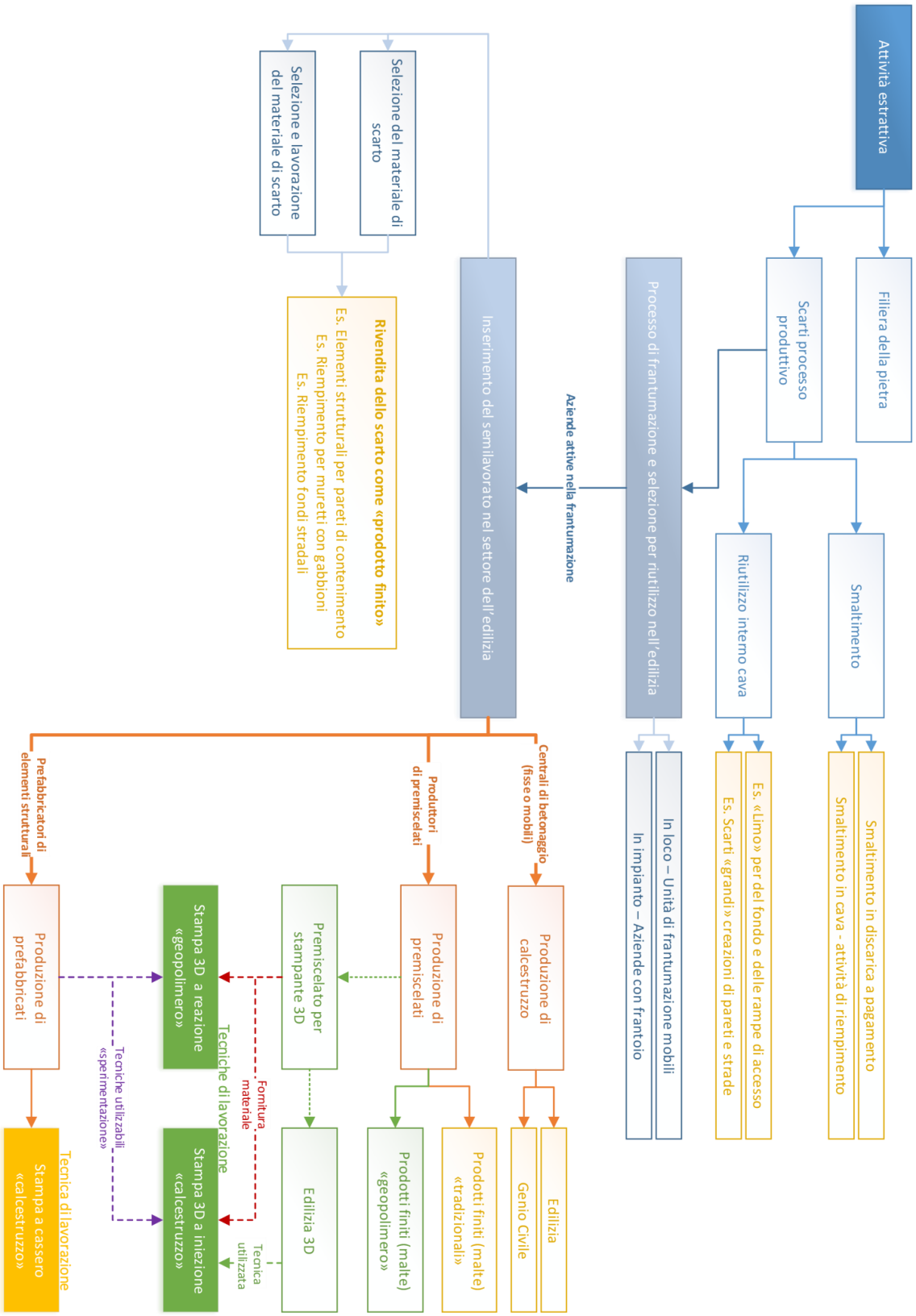

Figura 24 Mappa della filiera dello scaro di cava. In verde gli sbocchi del materiale di scarto ad alto valore aggiunto.

Per quanto concerne questo primo sbocco sul mercato come semi-lavorato / prodotto finito, i pezzi frantumati della lavorazione dello gneiss vengono selezionati per diventare materiale per la costruzione. Ad esempio scarti di grandi dimensioni, senza particolare lavorazione, possono diventare elementi strutturali per la creazione di pareti di contenimento, elementi di dimensioni medio/piccole possono essere venduti come

materiale di riempimento per muretti costruiti con gabbioni metallici, oppure scarti di piccole dimensioni possono essere impiegati per la creazione di fondi stradali. Questi prodotti da immettere sul mercato possono essere frutto di una mera selezione dello scarto, oppure essere preparati con una minima lavorazione, ovvero la frantumazione e divisione per dimensioni ed eventuale impiego. In particolare, nei primi due esempi fatti, si può ancora valorizzare le proprietà "estetiche" del gneiss locale, cosa che nelle restanti opzioni di uscita del prodotto sul mercato si vengono a perdere. Anche questo tipo di attività può potenzialmente essere svolta dai cavisti stessi; aprendosi il mercato per il riutilizzo e la valorizzazione del loro scarto, convertendo un costo in un eventuale opportunità di guadagno.

In relazione alle aziende attive nel settore della frantumazione, si è potuto constatare che l'attività di ritiro, lavorazione e rivendita dello scarto di cava negli anni ha perso di attrattività e di redditività economica. Parallelamente la domanda di tale prodotto si è ridotta drasticamente, in quanto economicamente non più concorrenziale rispetto al prodotto proveniente dall'estero e anche alla conclusione di grandi opere di genio civile nel nostro cantone (grandi consumatori di tale prodotto e spesso vincolate nelle commesse pubbliche all'utilizzo/riutilizzo di materiale locale). A titolo informativo, l'azienda intervistata ci ha riportato che negli ultimi sei anni la sua attività in questo ambito si è ridotta drasticamente passando da uno smercio di circa 100 tonnellate annue di frantumato alle attuali 10 tonnellate, principalmente impiegate per la creazione di fondi stradali. Se prima l'azienda destinava a quest'attività 7 camion e 5 silos ora lavorano solo con due camion e hanno due silos operativi (uno per ogni impianto sul territorio ticinese), e raccolgono materiale solo da cave in prossimità degli impianti di lavorazione. Fondamentalmente l'attività non è redditizia economicamente, solo di costi diretti tra trasporto e lavorazione il costo alla tonnellata di prodotto frantumato arriva a circa CHF 25.-. Già solo questo primo costo di lavorazione porta il frantumato, nella forma di aggregato per calcestruzzi e malte, ad essere fuori mercato. A titolo di confronto, più attori della filiera ci hanno confermato che per lo stesso importo riescono ad importare dall'Italia un aggregato di performance nettamente superiori (ovvero ghiaie e sabbie arrotondate). Il frantumatore, dal canto suo, ci ha confermato che le performance dell'aggregato di cava frantumato per applicazione nell'industria del calcestruzzo e delle malte cementizie possono essere aumentare con un ulteriore lavorazione per l'arrotondamento degli elementi. Questo farebbe aumentare notevolmente i costi del prodotto finito portandolo ulteriormente fuori mercato, e attualmente senza una garanzia di volumi di vendita per coprire i costi non sono interessati a fare un investimento nel macchinario per tale lavorazione.

Un altro fattore che rende ancora meno concorrenziale l'aggregato di cava sono le nuove disposizioni in materia di edilizia e di utilizzo delle discariche (vedi piani direttori cantonali), che consentono e facilitano a fornitori esteri di portare in Svizzera l'aggregato (come pure direttamente il calcestruzzo da gettare) e al contempo di esportare gli inerti nelle discariche italiane. Questo fa sì che tali attori possono fornire un doppio servizio a prezzi molto più concorrenziale rispetto ad aziende locali. Queste dinamiche di mercato fanno sì che i frantumatori ticinesi non riescono più a smerciare tale prodotto, pertanto mantengono solo in minima parte quest'attività. Principalmente utilizzano i propri impianti per la frantumazione del loro materiale di scavo e l'aggregato risultante viene fornito soprattutto alle loro aziende partner, in particolare per opere legate a commesse pubbliche che prevedono una percentuale di utilizzo di materiale di scarto.

Gli effetti di questo meccanismo si ripercuotono anche sugli altri attori della filiera in particolare sui produttori di calcestruzzi, i quali sono i principali acquirenti di aggregati. Come si evince dallo schema in Fig. 24, l'aggregato di cava risultante dal processo di frantumazione potrebbe essere assorbito dall'industria del calcestruzzo e in particolare da aziende attive nel settore che possiedono centrali di betonaggio (fisse o mobili). Quest'ultime sono grandi consumatrici di questa materia prima. Per quanto concerne la qualità dell'aggregato, le aziende attive nella frantumazione riescono a produrre un prodotto certificato per l'impego nell'edilizia e nel genio civile (vedi a riguardo le analisi di questo studio). Inoltre, dato che i macchinari sono regolarmente certificati, riescono a garantire una distribuzione granulometrica ottimale dell'aggregato per la produzione delle differenti tipologie di calcestruzzo. Pertanto, per i produttori di calcestruzzo la scelta è meramente economica, di fatto possono ottenere un prodotto di qualità superiore ad un prezzo inferiore approvvigionandosi da fornitori esteri. Data la pressione nel settore delle costruzioni creata da fornitori esteri, i produttori di calcestruzzi locali devono anch'essi cercare di essere competitivi sul prezzo del prodotto finito, pertanto per abbassare il costo del loro venduto ricorrono ad aggregati esteri di costo inferiore e performance superiori. In conclusione, questi attori non sono propensi all'utilizzo di questo aggregato a meno che non vi siano delle condizioni quadro e incentivi che spingano verso l'uso/ri-uso del materiale locale (es. vedi ordinanze per le commesse pubbliche, eventuali leggi specifiche per il settore, ecc.).

Per contro, come si può evincere dallo schema, nell'industria delle malte cementizie si sono identificati quali potenziali attori i produttori di premiscelati. Purtroppo per l'esplorazione di questa opzione non siamo riusciti ad avere un incontro rilevante con attori del settore, in quanto le aziende presenti in Ticino si occupano solo della rivendita di prodotti finiti e le attività di produzione sono concentrate nel nord Italia. Per una continuazione dello studio sarebbe interessante potersi confrontare con chi si occupa effettivamente di produzione, per valutare se effettivamente vi è un potenziale. In ogni caso, per uno sbocco in questo ambito, si è identificato un primo possibile utilizzo dell'aggregato nella produzione di malte premiscelate tradizionali a base cementizia. Oppure si sono identificati anche degli sbocchi potenziali nell'ambito dei premiscelati per l'impiego di stampanti 3D nell'edilizia, ovvero premiscelati per la stampa 3D a reazione con il geopolimero oppure per la stampa 3D a iniezione di calcestruzzo (vedi Cap. 4 dedicato al tema). In quest'ottica i produttori sarebbero i fornitori di materia prima per le aziende che utilizza queste tecniche di lavorazione in 3D. Per quanto concerne l'aggregato di cava, il frantumatore, già con la tecnica attuale di lavorazione, riesce a realizzare un prodotto con una granulometria idonea sia per la produzione di premiscelati di malte geopolimere sia di malte cementizie; come pure per applicativi sia tradizionali sia in ambito di stampa 3D.

Infine, come ulteriore sbocco si è identificato l'impiego dell'aggregato di cava nell'ambito della produzione di prefabbricati. In questo caso, come si evince dal diagramma, gli attori principali sono i prefabbricatori di elementi strutturali i quali attualmente utilizzano come tecnica di lavorazione la stampa a cassero con calcestruzzo. In questo caso si andrebbe a fornire al prefabbricatore l'aggregato necessario per la produzione del calcestruzzo per il suo processo produttivo. A differenza dei produttori di calcestruzzo, le aziende attive nella prefabbricazione non sono così sensibili ai prezzi dell'aggregato, poiché gli elementi cementizi prefabbricati sono spesso a vista e l'aggregato non deve influenzare in maniera negativa l'estetica. In quest'ottica, attualmente, riescono ad importare un aggregato di qualità superiore a prezzi molto contenuti dall'Italia (idoneo per le loro necessità).

Dall'incontro con questo attore della filiera, si è riscontrato che questo tipo di industria è molto tradizionale ed i prodotti sul mercato sono molto simili, la differenza o la competizione tra i produttori viene fatta a livello di calcestruzzo utilizzato nella produzione. Sotto questo aspetto i prefabbricatori investono molto nella ricerca delle miscele per il calcestruzzo sempre più performante, aspetti spesso dettati da esigenze di mercato (es. vedi direttive opere pubbliche, ecc.). Un altro aspetto su cui stanno sviluppando la ricerca in questo settore sono le modalità di incastro degli elementi prefabbricati, questo per lavorare sulla velocizzazione nella costruzione degli stabili e per la realizzazione di edifici in altezza (multi-piano). Tradizionalmente questo tipo di elementi prefabbricati nel settore dell'edilizia viene utilizzato nella costruzione di capannoni (strutture grandi senza piani) e la caratteristica principali di questi elementi è la superfice liscia. Quest'ultima deriva dalla tecnica di lavorazione, ovvero la stampa a cassero. Pertanto, nella tecnica di stampa 3D a reazione di geopolimero, si intravvede un potenziale innovativo per quest'industria dando la possibilità al prefabbricatore di creare elementi non lisci. Verso l'esplorazione e la sperimentazione di questa opportunità, il prefabbricatore intervistato, esprime un certo interesse.

8. Valutazione economica: filiera di lavoro, keyplayer, etc.

Con la ricostruzione dell'ipotetica filiera per il riutilizzo dello scarto di cava, si è identificato che il passaggio chiave per una sua valorizzazione nell'industria dell'edilizia è la frantumazione di questo materiale. Gli attori principali in questo caso sono le aziende che possiedono impianti di frantumazione solitamente collegate con imprese di costruzione o con produttori di calcestruzzo. Grazie alle analisi svolte, si è potuto verificare che allo stato della tecnica attuale, in particolare per le aziende con impianti fissi, è fattibile lavorare il materiale per poterlo preparare sia per impieghi tradizionali e sia per materiali innovativi (es. calcestruzzi, malte cementizie, malte cementizie per stampante 3D, malte a geopolimeri idonei per stampante 3D, ecc.). Di fatto, tecnicamente a questo stadio non ci sono particolari problemi affinché lo scarto possa passare ad una fase successiva di valorizzazione. Come esplicitato nel Cap. 7, questo tipo di attività è già svolta da questo tipo di azienda.

Per quanto concerne le lavorazioni che possono seguire la frantumazione, in particolare nell'impiego dell'aggregato derivante, si sono osservati tre potenziali attori; ovvero i produttori di calcestruzzo, i produttori di premiscelati e i produttori di prefabbricati.

Nel caso dei produttori di calcestruzzo, che sarebbero i potenziali attori che potrebbero assorbire i volumi più grandi di scarto valorizzato, alle nostre latitudini non vi sono gli estremi affinché ciò avvenga senza un

cambio delle condizioni del settore (aspetti non controllabili da attori privati). Attualmente l'aggregato di cava non risulta concorrenziale e attrattivo per questo tipo di attività (vedi cap. 8)[6]. A meno che non vi sia la volontà istituzionale di sostenere e incentivare logiche di economia circolare e valorizzazione delle risorse locali, nell'ottica di un'industria più sostenibile in termini ambientali ed economici.

Per quanto concerne i produttori di premiscelati, anch'essi potenzialmente potrebbero essere dei grandi consumatoti di aggregati, purtroppo in Ticino non vi sono locate centrali di produzione. Pertanto l'aggregato di cava, a meno che non vi sia l'insediamento di un'azienda produttrice, dovrebbe essere esportato verso il nord Italia (dove sono insediate le aziende produttrici) con le conseguenti difficoltà delle esportazioni Svizzera-Unione Europea. In questo caso il concetto di economia circolare e minor movimentazione delle merci verrebbero a venire meno, come pure alcuni importanti aspetti di sostenibilità ambientale ed economica. In generale l'opzione dell'impiego in ambito di premiscelati, come descritto nel Cap. 7, deve essere ancora vagliata in dettaglio.

Per contro, in Ticino di produttori di prefabbricati ce ne sono e questi potrebbero essere dei potenziali attori per la valorizzazione dello scarto di cava ticinese sia nell'ambito della loro attività tradizione sia nella sperimentazione di nuove tecniche di lavorazione (vedi Cap. 9). Questi attori, rispetto ai produttori di calcestruzzo, sono meno sensibili ai prezzi delle materie prime e producono un prodotto finito a maggior valore aggiunto. Con queste condizioni l'attrattività dello scarto di cava aumenta, in particolare se come argomenti di vendita del prodotto finale (prefabbricato) si valorizza la totalità dello *Swiss Made* affiancato a concetti di sostegno all'economia circolare, alla sostenibilità ecc. Inoltre, se si affianca l'introduzione della stampa 3D a reazione del geopolimero nel processo produttivo si può introdurre anche l'avvento di prodotti innovativi per questo tipo di industria. Come emerso nel corso della ricerca questa potenziale tecnologia di produzione rispetto all'impiego del calcestruzzo tradizionale risulta più ecologica, emettendo meno quantitativi di CO_2 e riducendo al minimo gli scarti di lavorazione (vedi Cap. 4.3), e dovrebbe fornire a questi attori maggiore flessibilità nel processo produttivo con la conseguente possibilità di fare delle personalizzazioni dei prodotti finiti. In quest'ottica lo scarto di cava finirebbe a essere componente di un prodotto innovativo ad alto valore aggiunto, prodotto con una tecnica innovativa.

In merito agli impieghi come aggregato nelle tecniche di stampa 3D a malte cementizie, attualmente risulta uno sbocco limitato e difficilmente percorribile poiché l'industria dell'edilizia in stampa 3D in Svizzera ed in Europa è ancora una nicchia di mercato e l'aggregato di cava non è concorrenziale economicamente. Allo stato attuale delle ricerche l'aggregato di cava non sembra essere più performante rispetto a quello normalmente utilizzato in questa tecnica. Vi sono però delle ipotesi ancora da verificare legate al comportamento idrodinamico dell'aggregato durante il processo di stampa (vedi cap. 4.2), le quali potrebbero migliorare la competitività di questo aggregato sulla buildability.

In egual maniera risulta difficile, almeno a breve termine, che gli attori identificati nella filiera o in generale imprese attive nel settore delle costruzioni in Ticino, adottino questo tipo di tecnologia in quanto ancora poco accessibile economicamente e in fase di consolidamento. Per contro la tecnologia basata sulla stampa 3D a reazione con geopolimero, presenta alcuni potenziali degni di essere esplorati (vedi cap. 4.3).

9. Discussioni e valutazioni generali dello studio derivanti dell'approccio condiviso

Questo progetto dà seguito a un lungo percorso, tutt'ora in corso, di collaborazione e di ricerca nel settore lapideo in Vallemaggia e vuole ampliare le prospettive ad altri comparti d'estrazione in Ticino e nel Moesano. L'analisi SWOT del rapporto DACD-DEASS (2018) in Vallemaggia proponeva varie opzioni di rilancio del settore lapideo attraverso differenti modalità di gestione e di utilizzo del materiale di scarto. Il riutilizzo ad alto valore aggiunto basato sulle stampanti 3D a conglomerato cementizio sembrava essere un'opzione percorribile in particolare da alcuni attori del settore lapideo. Queste ipotesi vengono confermate, di fatto la stampa 3D a conglomerato cementizio o a geopolimero può rappresentare un'opportunità per un settore con

[6] Le condizioni attuali e la pressione sul settore dell'edilizia sono talmente forti che uno sforzo di privati non è sufficiente per portare l'aggregato ed il prodotto finale (calcestruzzo) ad essere concorrenziali e attrattivi. L'industria non è pronta a pagare un tale sovrapprezzo per un prodotto totalmente autoctono e basato sull'economia circolare e la sostenibilità delle risorse. L'industria attualmente sottostà a logiche di prezzi al ribasso.

una tradizione storica riconosciuta quale quello lapideo (innovazione di prodotto) come pure nel settore dalla costruzione, in particolare nel nell'ambito della produzione di prefabbricati (innovazione di processo e prodotto). In ambo i casi grazie alle nuove tecnologie si potranno sviluppare nuove competenze nell'ambito del computer design, dei nuovi materiali e delle nuove tecniche di costruzione/ produzione 3D.

Le analisi sull'aggregato di scarto di 6 cave ticinesi e una grigionese mostrano che questo inerte può essere impiegato in più settori dell'edilizia, anche quello altamente tecnologico. Per l'uso tradizionale (calcestruzzo e malta cementizia di tipo C) è consigliato mischiarlo con un minimo del 30% con un aggregato alluvionale per incrementare la durabilità del conglomerato cementizio e raggiungere una buona lavorabilità della malta. Per un impiego tradizionale gli scarti di cava prodotti annualmente in Canton Ticino potrebbero coprire senza nessun limite tecnico più del 20% del fabbisogno di aggregati per calcestruzzo.

L'analisi economica ha però mostrato che con l'euro al ribasso e il settore edilizio Italiano in crisi, questa strada al momento non è percorribile per la concorrenza dei prezzi sugli aggregati italiani che sono meno cari e oltretutto di qualità migliore. Quindi senza nuove direttive cantonali che incentivano l'utilizzo di materiale di scarto su commesse pubbliche o grandi opere o cambiamenti delle normative di gestione degli inerti tra la Svizzera e l'Italia difficilmente si potrà sviluppare un'economia circolare della materia prima. Una via percorribile di sviluppo ambientale sostenibile è l'utilizzo di materiale di scarto per materiali edili stampati con tecniche 3D, dove il costo dell'aggregato non incide in maniera eccessiva sull'alto valore aggiunto del prodotto finale. Nell'edilizia svizzera il settore della stampa 3D rimane un mercato di nicchia e finora pochi istituti di ricerca (p. es. dfab - ETHZ) e alcune start-up (p. es. themobbot.com) sono riuscite a svilupparsi e cercano da un lato di affermare la tecnologia e dall'altro di trovare spazio e posizionamento all'interno del mercato. È quindi illusorio pensare che nel 2020 l'utilizzo di scarti di cava attraverso le stampanti 3D possa risolvere in maniera sostenibile il problema territoriale degli eccessi di questi inerti. Si tratta comunque di un primo passo che deve servire da rampa di lancio per il settore e che dev'essere intrapreso per dare confidenza nella tecnologia agli operatori, e fiducia agli investitori e ai potenziali clienti.

Di fatti, in questo studio abbiamo valutato 3 tecniche di stampa 3D che potrebbero essere applicate per nuove attività nel settore edile. (i) La stampa 3D a estrusione di malte cementizie ha il potenziale per rivoluzionare il mondo dell'edilizia tramite la stampa di elementi architettonici. Allo stato dell'arte della tecnica, le strutture stampate non fungono da elementi portanti di edifici. Con questa tecnica l'aggregato di scarto di cava potrebbe essere utilizzato in grandi quantità. L'ipotesi che durante la stampa questo aggregato sia più performante rispetto ad altri non è stata né smentita né comprovata. Le verifiche sono ancora in corso. Gli investimenti per acquistare e sviluppare questa tecnica sono ingenti, sia per quanto concerne i macchinari sia per quanto concerne la formazione tecnica di personale altamente specializzato e qualificato per il loro impiego. Inoltre, questa tecnologia per essere pienamente adottata necessita di un drastico cambio di mentalità da parte di tutti gli attori nel mondo dell'edilizia; perché va a stravolgere il modo tradizionale di costruire. Questo ostacolo psicologico, che è anche legato alle incertezze tecniche ed economiche di una nuova tecnologia, è difficile da superare. (ii) La stampa 3D a reazione del geopolimero è agli albori e la sua commercializzazione è vincolata da incertezze legate al materiale, alla performance della stampante e al costo dell'elemento stampato (il costo del geopolimero è di 4-5 volte superiore ai tradizionali cementi). Rispetto alla tecnica a estrusione, questa stampante permette più libertà nelle geometrie e soprattutto durante la stampa non ha criticità reologiche, il che semplifica il funzionamento della stampante e la sua manovrabilità da parte dell'operatore[7]. Inoltre, la stampa è guidata da un braccio robotizzato xyz simile a quelli già esistenti e utilizzati nella lavorazione della pietra naturale, quest'aspetto potrebbe facilitare ai cavisti l'adozione di tale tecnica. Allo stato dell'arte della tecnica e considerando il costo elevato del geopolimero, il suo impiego è ipotizzabile per la creazione di prodotti personalizzati e ad alto valore aggiunto come ad esempio lastre di rivestimento per esterni o arredi d'interni. Questi prodotti di pietra artificiale, creati partendo dagli scarti, potrebbero rientrare in una forma innovativa nello stesso mercato della pietra naturale. Il successo di questa tecnica dipende principalmente dalle proprietà del materiale stampato che deve raggiungere resistenze meccaniche più alte per poter essere lavorabile (produzione, trasporto, posa). (iii) La stampa del cassero con polimero plastico rPLA e getto della malta cementizia può essere implementata dagli attori del settore con un investimento minimo. La tecnica è utile quando si vuole riprodurre più volte lo stesso elemento complesso di una dimensione < ca. $1m^3$.

[7] Vedi ad esempio: 1 operatore vs >4 operatori con competenze diverse per controllare i diversi aspetti tecnici della stampa a estrusione

10. Conclusioni e possibili scenari di sviluppo del progetto

In un contesto di gestione sostenibile della materia prima, lo studio sulla qualità degli aggregati di cava per malte e calcestruzzi tradizionali apre nuovi scenari di economia circolare a livello ticinese. Di fatto, questi inerti producono calcestruzzi idonei per la maggior parte degli impieghi nell'edilizia. Un calcestruzzo con 100% di aggregato ticinese possiede buone resistenze meccaniche ma una mediocre durabilità e una difficile lavorabilità. Però, se agli aggregati locali si taglia ca. 30% di materiale alluvionale (di solito alloctono) si ottiene un calcestruzzo di tipo C (quello più impiegato nel mondo dell'edilizia), mentre con 60% di materiale alluvionale un calcestruzzo di tipo G (quello più performante sotto tutti gli aspetti). Quindi, gli scarti di cava prodotti annualmente in Canton Ticino potrebbero coprire senza nessun limite tecnico più del 20% del fabbisogno di aggregati per calcestruzzo cantonali, come mostrato dal rapporto DACD-DEASS (2018). Inoltre, a queste percentuali bisogna aggiungere gli enormi volumi di scarto che sono stati depositati come materiali di ripiena nel corso degli anni, potenzialmente recuperabili e utilizzabili.

Nonostante le limitazioni tecniche sono minime, al momento questo materiale non è sfruttato nell'industria del calcestruzzo ticinese per questioni di concorrenza di prezzo degli aggregati italiani che sono al ribasso sia per la crisi dell'edilizia Italiana sia per il tasso di cambio CHF/Euro basso. Quindi, senza nuove direttive cantonali che incentivano l'utilizzo di materiale di scarto su commesse pubbliche o grandi opere, come pure senza cambiamenti nelle normative di gestione degli inerti tra la Svizzera e l'Italia difficilmente si potrà sviluppare un'economia circolare cantonale della materia prima.

Una via sostenibile dal punto di vista ecologico è l'impiego di questi aggregati di scarto di cava in conglomerati innovativi per stampe 3D. Abbiamo valutato 3 tipologie di stampe (2 in collaborazione con l'ETHZ): (i) La stampa *a estrusione di malta cementizia* è la tecnica che può potenzialmente rivoluzionare il mondo dell'edilizia e assorbire in futuro grossi volumi di scarto. Per il momento, però, rimane un mercato di nicchia a livello globale (di fatto non presente in Ticino) che rende l'investimento non sostenibile e non sensato economicamente per un'impresa edile con un mercato locale. (ii) La stampante 3D *a reazione di geopolimeri* possiede ancora grandi incertezze sul materiale e sul suo sviluppo industriale (performance della stampante e costi di produzione). Questa tecnica è agli albori, però possiede un potenziale di miglioramento sotto tutti i punti di vista. (iii) La stampa *del cassero con polimero plastico rPLA e getto della malta cementizia* può essere implementata per la produzione ripetuta di piccoli elementi (<1m) dagli attori stessi del settore con un investimento minimo. Di fatto, la tecnica sviluppa con questo studio verrà adottata da un start-up locale. Ciò nonostante, con il mercato attuale è illusorio pensare che l'utilizzo di scarti di cava attraverso le stampanti 3D possa risolvere in maniera sostenibile il problema territoriale degli eccessi di questi inerti.

Dalla mappatura della filiera dello scarto di cava e l'analisi economica si è evinto che gli attori che più approfitterebbero dello sviluppo di queste tecniche 3D sono i cavisti e i costruttori di prefabbricati. Alcuni tra questi attori hanno mostrato un forte interesse a un investimento per la sperimentazione di queste tecniche. Per i cavisti il prodotto stampato è una rivalorizzazione di qualcosa che attualmente per loro costituisce un costo ed un problema da gestire. Inoltre, il loro mercato di sbocco del prodotto derivante da questa ulteriore lavorazione potrebbe essere lo stesso di quello attuale della pietra naturale. Per i prefabbricatori queste nuove tecniche di produzione potrebbe essere utilizzate per personalizzare gli edifici costruiti con elementi prefabbricati, diventando in questo modo più competitivi sui prodotti e servizi erogati in completa compatibilità con le tecniche attuali di costruzione.

Di fatto, un prefabbricatore di elementi cementizi ha manifestato il suo interesse per collaborare allo sviluppo della tecnica a reazione del geopolimero attraverso un progetto Innosuisse congiunto tra SUPSI e ETHZ. L'obiettivo di questo progetto è di migliorare la qualità finale del prodotto stampato in termini di proprietà meccaniche e la durabilità del materiale stesso. Al contempo, ci si prefigge l'obiettivo di portare il prototipo sviluppato dall'ETHZ ad una prima versione Beta di questa stampante, verificandone le potenzialità per l'utilizzo industriale nella produzione di elementi di facciata. Se le sfide tecniche dovessero essere vinte, si potrebbe ragionare effettivamente su di una valorizzazione dello scarto di cava in un prodotto ad alto valore aggiunto, con basso o contenuto impatto ambientale e coerente con le logiche dell'economia circolare. In ottica di sviluppo della tecnica, si può affermare che risulterebbe una delle poche applicazioni concrete ed efficaci nel mondo delle "Digital Building Technologies".

Benefici e impatti per la SUPSI

Il progetto ha rafforzato la rete di contatti territoriali attraverso la diffusione dei risultati sul territorio che è avvenuta gradualmente durante gli incontri con gli attori della filiera dello scarto di cava ed è ancora in corso. Il progetto è stato presentato anche alle autorità cantonali e al Forum Innovazione Svizzera Italiana 2019. Inoltre, sabato 6 Giugno 2020 a Giubiasco e a Bellinzona esporremo il progetto al "BeGreen Festival – un mondo sostenibile", come attività di promozione scientifica per la popolazione.

Il progetto ha anche permesso di instaurare delle nuove collaborazioni scientifiche con l'ETHZ che sfoceranno in un inoltro di un progetto innosuisse che intende rivisitare in SUPSI il prototipo della stampante 3D dell'ETHZ. Inoltre, è nata una collaborazione con la start-up che utilizzerà la tecnica sviluppata in SUPSI per stampare elementi che verranno posizionati in simulatori di letti di fiumi. Sono nate anche collaborazioni interne con il FabLab che inizialmente non facevano parte dello del profetto.

I risultati di questo progetto sfoceranno nella formazione continua per architetti e ingegneri nel Simposio "Via della Pietra" che si svolgerà in primavera 2021. Inoltre, le pietre artificiali stampate con il geopolimero verranno sperimentate nel laboratorio "Rocks mechanics" nel corso Bachelor "Principi di geotecnica" per ingegneri civili. Infine, se il progetto Innosuisse dovesse andare in porto, la stampante a reazione di geopolimeri in SUPSI verrà integrata nei casi di studio del Master interaction design.

Da un punto di vista scientifico sono stati pubblicati 2 abstract (vedi allegati) per i congressi: (i) Beyond 2020 – World sustainable built environment conference, Gothenborg e (ii) European Geoscence Union conference 2020, Vienna. Dagli organizzatori della sessione tematica di quest'ultima conferenza siamo stati invitati a sottomettere un articolo scientifico per il special issue on "aggregates" sul Bulletin of Engineering Geology and the Environment (Springer). La preparazione dell'articolo è in corso.

Referenze bibliografiche

de Laubier, R, Wunder, M., Witthöft, M, Rothballer, C (2018). Will 3D Printing Remodel the Construction Industry? BCG Report – The Boston Consulting Group.

cemsuisse (2005). Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) in der Schweiz – Stand des Wissen, Neue experimentelle Erkentnisse und Empfehlungen, Ast &Jakob, Vetsch AG, Köniz

Coppola, L., Coffetti, D., & Crotti, E. (2018). An holistic approach to a sustainable future in concrete construction. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 442, No. 1, p. 012024. IOP Publishing.

DACD-DEASS (2018). Estrazione pietra naturale nel comparto di Riveo-Visletto (Vallemaggia). Rapporto sullo studio della situazione attuale e possibili scenari di sviluppo delle cave di pietra di Riveo-Visletto commissionato dal Patriziato di Cevio-Linescio.

De Rossi, A., Carvalheiras, J., Novais, R. M., Ribeiro, M. J., Labrincha, J. A., Hotza, D., & Moreira, R. F. P. M. (2018). Waste-based geopolymeric mortars with very high moisture buffering capacity. Construction and Building Materials, *191*, 39-46.

Horvath, A. (2004). Construction materials and the environment. Annu. Rev. Environ. Resour., vol. 29, pp. 181-204

Jensen, V. (1993). Alkali Aggregate Reaction in Southern Norway. Doctor Technicae Thesism University of Trondheim,262 pp.

Tchadjié, L. N., Djobo, J. N. Y., Ranjbar, N., Tchakouté, H. K., Kenne, B. B. D., Elimbi, A., & Njopwouo, D. (2016). Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. Ceramics International, 42(2), 3046-3055.

Bundesamt für Strassen (2006). Schäden durch Alkali-Reaktion an Betonbauten in der Schweiz, von: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton, Wildegg

SN EN 206-1/NE:2013, Tabella NA.3, Béton – Partie 1: Spécification, performances, production et conformité – Éléments nationaux NE à la norme SN EN 206-1:2000.

Voney, V., Odaglia, P., Landrou, G., Brumaud, C., Jipa, A., Agusti Juan, I., ... & Habert, G. (2019). Powder Bed 3D Printing with Geopolymers. In International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019) (pp. 533-540). RILEM Publications SARL