

Valorizzazione degli scarti di materiale fine proveniente dalla lavorazione della sabbia di vetro per un reimpiego nell'industria vetraria

Stazione Sperimentale del Vetro

Sommario

Premessa.....	3
Descrizione delle attività svolte	4
Sistema di granulazione del materiale fine	5
Ricetta e materiali per la granulazione	6
Sabbia di vetro.....	6
Silicato di Sodio	7
Ricetta di granulazione di partenza	8
Test di resistenza meccanica	9
Test di abrasione.....	9
Validazione del test di abrasione.....	10
Test di resistenza a compressione	11
Interpretazione del test di resistenza alla compressione.....	11
Ricette di granulazione modificate.....	13
Processo di granulazione	13
Descrizione delle ricette	15
Effetto del materiale organico	16
Effetto del materiale fine.....	17
Granulazione del materiale Tal quale.....	17
Parametri di processo	18
Tempo di essiccazione	18
Tempo di stoccaggio/maturazione	19
Valutazione dell'umidità residua	21
Effetto dell'impilaggio del materiale granulato	22
Valutazione della strategia di granulazione ottimale	22
Ricetta di granulazione.....	22
Schema di Impianto Pilota	24
Stima dei consumi energetici di produzione	26
Utilizzo dei granuli per la produzione di vetro cavo	29
Analisi morfologica.....	29
Analisi chimica.....	30
Densità e Porosità Apparente	30
Profilo granulometrico	31
Test di fusibilità.....	31
Test di schiumatura	33
Conclusioni.....	36

Premessa

La sostituzione di materie prime tradizionali quali sabbia, calcare, soda ecc. con rottame di vetro pronto forno derivante dalla raccolta differenziata consente di risparmiare energia (circa il 2.5% di energia ogni 10% di rottame di vetro aggiunto nella miscela), di ridurre l'emissione diretta e indiretta di CO₂ (minore combustibile per unità di vetro prodotto e minor uso di ossidi e carbonati) e di evitare il depauperamento di risorse naturali (sabbia, calcare, ecc.).

L'utilizzo del rottame nella produzione di contenitori in vetro è tuttavia legato alla possibilità di ottenere una Materia Prima Seconda di qualità elevata in grado di rispettare i requisiti di qualità necessari all'industria del vetro. Per questo il rifiuto di vetro raccolto viene avviato ad impianti specializzati che provvedono alla rimozione delle impurità presenti (sottovaglio, ceramica, cristallo, metalli, carta, plastica, vetro ceramica, etc.). Durante queste lavorazioni vengono prodotti degli scarti quali, tra gli altri, scarti dalla selezione di sottovaglio e della ceramica.

Lo scarto di materiale ceramico può essere riutilizzato assieme allo scarto di sottovaglio (eliminato in quanto a causa delle sue dimensioni non può essere analizzato dalle macchine di selezione) nella produzione di sabbia di vetro. Il processo prevede la macinazione del materiale fino a raggiungere una granulometria inferiore ad 0.8 mm.

La sabbia di vetro può essere riutilizzata in vetreria come alternativa al rottame, tuttavia l'utilizzo del materiale ha portato in molti casi a fenomeni di instabilità, sia nel processo di fusione (schiumatura) sia nel prodotto finito (colore vetro, redox).

I risultati dei test di laboratorio condotti in passato hanno indicato che l'eliminazione della parte fine della sabbia di vetro (al di sotto di 0,2 mm) rende il materiale più stabile nel tempo, dal punto di vista redox, e con minore tendenza alla schiumatura.

L'eliminazione di questo materiale provoca la produzione di un ulteriore scarto che, se destinato al conferimento in discarica andrebbe a vanificare il circuito virtuoso di recupero di cui la sabbia di vetro è un esempio consolidato. Infatti, stando alle caratterizzazioni effettuate in passato, la frazione inferiore a 0,2 mm consta in media del 25,9%, da circa 22% fino al 30%.

Un'alternativa all'invio in discarica di questo materiale e la granulazione della frazione fine. Lo scopo della presente ricerca è quello di trovare le migliori condizioni per granulare il materiale di scarto al fine di riutilizzarlo come materia prima seconda per la produzione di vetro cavo.

Descrizione delle attività svolte

La sperimentazione si proponeva di dare una stima quanto più possibile precisa dei parametri di granulazione da applicare ad un impianto pilota in grado di produrre 25-30 tonnellate di granulato al giorno, e di stimare i consumi energetici associati.

Per la sperimentazione è stato utilizzato un granulatore sperimentale ideato e costruito da una azienda esterna in grado di produrre circa 1-5 Kg di granuli per ora.

Il granulato è stato prodotto a partire dalla frazione granulometrica inferiore a 0.2 mm ricavata da campioni di sabbia di vetro rappresentativi della produzione nazionale.

Per validare le condizioni di sperimentazione sono state validate delle metodiche sperimentali per la verifica delle proprietà meccaniche dei granuli. Infatti la consistenza del granulo è funzione del tempo di essiccazione e di maturazione, ed è stato necessario sviluppare dei test di resistenza meccanica all'abrasione tali da permettere una pronta e realistica valutazione delle prestazioni meccaniche dei granuli prodotti.

Sono state dunque definite delle ricette di granulazione con alcune modifiche, anche alla luce di alcune variazioni alla procedura di formazione dei granuli.

I granuli così prodotti sono stati caratterizzati ai fini dell'utilizzo come materia prima seconda per la produzione di vetro cavo.

Sistema di granulazione del materiale fine

Il granulatore è costituito da un sistema di mescolamento a rotante inclinato di circa 45°C, seguito da un sistema di essiccazione a due sezioni. Di seguito si riporta uno schema preso dal manuale d'uso descrittivo dell'equipaggiamento.

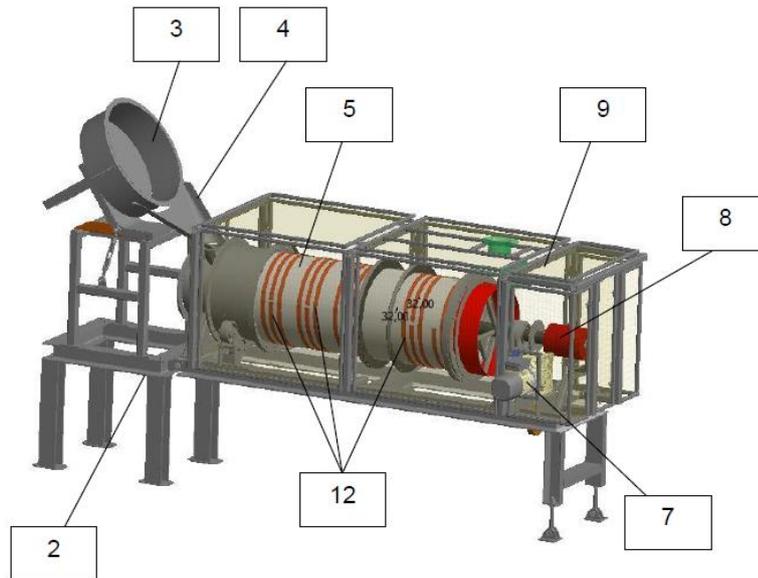


Figura 1: schema dell'equipaggiamento per la granulazione

Di seguito si riportano brevemente le descrizioni degli elementi evidenziati in Figura 1.

- 2. telaio di sostegno;
- 3. piatto di granulazione;
- 4. tramoggia di caricamento;
- 5. essiccatore rotante;
- 7-8. gruppo di azionamento;
- 9. telaio di sostegno;
- 12. termoresistenze;

Il sistema di riscaldamento è costituito da termoresistenze, cioè dei conduttori opportunamente schermati applicati sul mantello esterno dell'essiccatore rotante

(ulteriormente protetti dalla coibentazione) in modo da trasmettere calore all'essiccatore per effetto Joule.

Il collegamento elettrico delle termoresistenze è garantito da una presa rotante posta all'estremità dell'albero collegato al cilindro. Il controllo della temperatura è garantito da una sonda ad infrarossi che legge la temperatura del mantello del cilindro e da un termoregolatore che consente il passaggio controllato di corrente nelle termoresistenze.

Ricetta e materiali per la granulazione

I materiali utilizzati per la sperimentazione sono Sabbia di vetro Tal quale (TQ), Sabbia di vetro con granulometria inferiore a 0,2 mm e Silicato di Sodio.

Sabbia di vetro

Per i test di granulazione effettuati sono state utilizzate sabbie di vetro di produzione nazionale. Si riportano in Tabella 1 i valori granulometrici rilevanti e i dati di perdita al fuoco di sabbia di vetro relativa a 5 impianti di produzione nazionali.

sabbia	1	2	3	4	5
<0.2 mm	27,6%	23,7%	26,4%	30,0%	26,2%
PAF@550°C - <0.2	2,50%	2,04%	2,32%	4,01%	3,57%
PAF@550°C - TQ	0,65%	0,47%	0,53%	0,99%	0,85%

Tabella 1: valori di frazione fine (<0.2 mm) e di Perdita al Fuoco (PAF) a 550°C per le sabbie di vetro in oggetto.

Si nota dalla Tabella 1 che le sabbie di vetro analizzate possiedono una percentuale abbastanza simile di materiale inferiore a 0,2 mm, da circa 24% al 30%. Tale percentuale riflette la tecnologia di macinazione utilizzata, simile per i cinque impianti, e la tipologia di input. La perdita al fuoco misurata varia da 0,47% a 0,99%. Questa variazione piuttosto marcata è legata al tipo di materiale che viene utilizzato per la macinazione, e soprattutto al tipo di trattamento che subisce il materiale prima della macinazione, cioè se viene lavato o no. Di seguito in Tabella 2 vengono riportate le caratteristiche salienti delle sabbie di vetro utilizzate per i test di granulazione.

	SABBIA 1		SABBIA 2		SABBIA 3	
	> 0,2 mm	< 0,2 mm	> 0,2 mm	< 0,2 mm	> 0,2 mm	< 0,2 mm
<i>SiO₂</i>	71,38	71,63	71,36	71,23	71,28	71,33
<i>Al₂O₃</i>	2,09	1,83	1,89	1,88	1,90	1,90
<i>Na₂O</i>	12,31	12,32	12,37	12,45	12,38	12,29
<i>K₂O</i>	0,82	0,83	0,84	0,85	0,84	0,86
<i>CaO</i>	10,52	10,55	10,76	10,80	10,73	10,69
<i>MgO</i>	2,06	2,03	2,00	1,94	2,04	2,07
<i>SO₃</i>	0,08	0,10	0,10	0,11	0,10	0,09
<i>Fe₂O₃</i>	0,38	0,37	0,36	0,39	0,41	0,39
<i>PbO</i>	0,0305	0,0485	0,0358	0,0559	0,0336	0,0532
<i>LOI@550°C</i>	0.70	1.98	0.54	2.25	0.45	1.25
<i>COD</i> (<i>mgO₂/g</i>)	3,4		6,0		9,6	
<i>C eq. (kg/ton)</i>	1,3		2,2		3,6	

Tabella 2: analisi chimiche delle Sabbie di Vetro prevalentemente utilizzate nel corso della ricerca.

Silicato di Sodio

Nell'ambito del progetto è stato utilizzato del Silicato di Sodio liquido, costituito da una soluzione di Silicato di Sodio solido in acqua. È stato valutato anche l'utilizzo di Silicato di Sodio solido, ma considerazioni di carattere pratico, come la facilità di formulazione, e considerazioni di carattere generale (in un ipotetico scale-up industriale, per la dissoluzione del Silicato è richiesto un impianto aggiuntivo), hanno portato a scegliere il Silicato di sodio in soluzione acquosa. In dettaglio, il Silicato di Sodio utilizzato nel corso della ricerca ha le caratteristiche descritte in Tabella 3.

Parametro	Valore
<i>Peso specifico (gr/cc)</i>	1,358 – 1,383
<i>Equivalenti Baumè</i>	38 - 40
<i>Viscosità 20°C (mps)</i>	100 - 350
<i>Alcali totali (come % Na₂O)</i>	8,09 – 8,69
<i>Silice (come % SiO₂)</i>	26,77 – 28,58
<i>Residuo Secco (% peso)</i>	35 – 37,11
<i>pH</i>	11,2 – 11,8

Tabella 3: parametri Chimici e Fisici della soluzione di Silicato di Sodio utilizzata, da Scheda Tecnica fornita dal produttore.

Ricetta di granulazione di partenza

Prove sperimentali preliminari hanno mostrato come la frazione fine non possa essere granulata da sola, ma necessariamente debba contenere una certa percentuale di sabbia di vetro tal quale. Per l'esecuzione delle prove sperimentali su impianto pilota sono stati quindi utilizzati i seguenti ingredienti:

- Sabbia di vetro fine, ovvero con granulometria inferiore a 0,2 mm.;
- Sabbia di vetro Tal quale, ovvero a profilo granulometrico completo;
- Silicato di sodio a 38 – 40 Baumè;
- Acqua;

In Tabella 4 viene riportata la ricetta definita durante le prime sperimentazioni, utilizzando il piatto granulatore e una temperatura di essiccazione di circa 200°C.

materiale	% in peso di materiale secco	% in peso rispetto al materiale secco
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	75,0%	
<i>Sabbia di vetro < 0.2 mm</i>	25,0%	
<i>Acqua</i>		15,5%
<i>Silicato di Sodio</i>		16,5%

Tabella 4: ricetta di partenza per la produzione di granuli

In Tabella 4 i dati sono espressi come percentuale sul totale e come percentuale sul secco, dove “secco” significa la quantità di sabbia di vetro fine (<0,2mm) e Sabbia di vetro tal quale.

Test di resistenza meccanica

Al fine di caratterizzare i granuli ottenuti sono stati messi a punto due test per simulare due condizioni di stress: il trasporto su strada e la movimentazione a mezzo di pale, rispettivamente il test di abrasione ed il test di resistenza a compressione.

Test di abrasione

Per il primo test il meccanismo chiave di danneggiamento individuato è quello ad opera dell'abrasione.

Un test largamente usato nelle industrie che si occupano di granulati di vario tipo, ad esempio i fertilizzanti, è il “Los Angeles abrasion test” che consiste nell’inserire il campione in un cilindro rotante munito di alette posto in rotazione sul suo asse parallelo al terreno, assieme a sfere d'acciaio di piccolo diametro. Ispirandoci a questo test è stato messo a punto e studiato un test di abrasione alternativo.

Il test messo a punto in SSV si effettua ponendo il campione in esame all'interno del piatto fondo dei setacci usati per l'analisi granulometrica ($d=200\text{mm}$, altezza bordi= 50mm) il quale, grazie alla macchina per la granulometria, segue una traiettoria circolare di raggio 50mm ad una frequenza di circa $2/2,5$ rpm. Analogamente al test di riferimento, vengono inserite assieme al campione sfere d'acciaio di 8 g ciascuna per metà del peso del materiale introdotto. L'uso delle sfere di massa nota e costante è fondamentale. Il test funziona infatti grazie allo sfregamento reciproco dei granuli, ma anche grazie alla collisione degli stessi con le sfere d'acciaio. Campioni di dimensione, e dunque massa, diversa acquistano in fase di agitazione energia cinetica diversa essendo questa direttamente proporzionale alla massa dei granuli. L'utilizzo di sfere d'acciaio, in rapporto definito con il campione (1:2) uguali per ogni test garantisce che gli urti siano riproducibili e che dunque anche il test sia significativo nella sua riproducibilità nel sottoporre i granuli a sollecitazioni simili.

Definito il test come sopra descritto, sono state eseguite alcune prove per verificare quale fosse il tempo di agitazione migliore dei campioni. I risultati sono riassunti nel grafico in Figura 2.

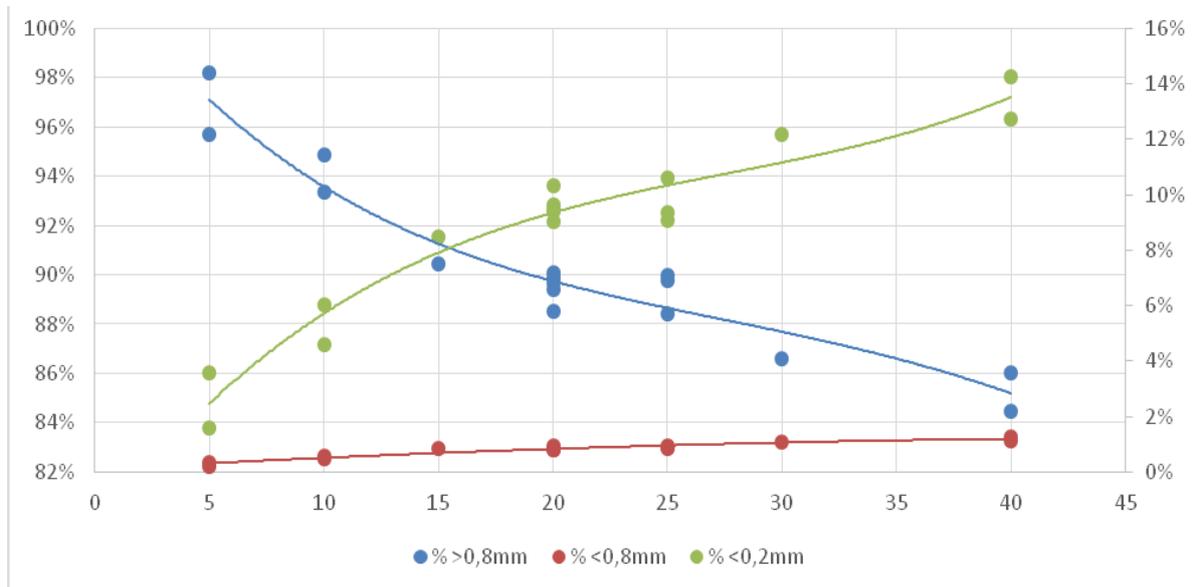


Figura 2: grafico delle prove di Abrasione: in ascissa il tempo di scuotimento in minuti, in ordinata la perdita in peso del materiale in % per il materiale > 0,8 mm (granuli rimasti) a sinistra, a destra per il materiale in polvere.

In ascissa viene riportato il tempo di agitazione in minuti, nell'ordinata di sinistra la percentuale di materiale integro (riferimento per i valori in blu), nell'ordinata di destra la percentuale di materiale fine (riferimento per i valori in verde ed in rosso).

Si può osservare che la frazione inferiore ai 0,2 mm è quella che viene persa maggiormente dai granuli, fino a 10 volte di più di quella compresa tra 0,2 e 0,8 mm. Le tendenze sono quelle attese: i granuli interi diminuiscono nel tempo, mentre le frazioni abrase aumentano.

Validazione del test di abrasione.

Una semplice valutazione della deviazione standard per ogni tempo di scuotimento porta a definire un'incertezza dell'ordine di 2.2 % sul materiale inferiore a 0,8 mm.

La validazione effettuata in laboratorio consta di 4 misure su 4 lotti di uno stesso campione. I valori di materiale inferiori a 0,2 mm sono mostrati in Tabella 5.

perdita di materiale <0.2 mm	
V1	10,33%
V2	9,38%
V3	9,45%
V4	9,04%

Tabella 5: materiale fine (<0.2 mm) perso dai granuli dopo 20 minuti di scuotimento.

- Valore medio: 9,55%
- Deviazione standard: 0,48%
- Dev. Standard della media: 0,24%
- T(stud) 99%: 4,6

L'incertezza estesa si ottiene dunque come $0,24 \times 4,6 = 1,1\%$ per un intervallo di confidenza del 99%.

Visti i valori assoluti ottenuti dai test, 20 minuti di tempo di analisi ragionevole per seguire eventuali modifiche alle ricette e garantire un errore sufficientemente basso per poter distinguere granulati prodotti in condizioni diverse. Da esperienze fatte durante questa ricerca, si considera accettabile un granulato con una perdita di materiale fine non superiore al 5%.

Test di resistenza a compressione

L'altro test a cui i granuli sono sottoposti è quello per testare la resistenza alla movimentazione con pale. Il test utilizzato è simile a quello di solito effettuato su granulati di fertilizzante, e consiste nel sottoporre i granuli a compressione assiale mediante bacchetta di vetro (diametro 5 mm): se il carico a rottura supera i 2 kg il test si considera superato in quanto si stima che il campione resisterà alla movimentazione con pale. Per questo test è stata usata una bilancia di opportuna precisione, ed ogni test è stato eseguito almeno su 12 granuli.

Interpretazione del test di resistenza alla compressione

È stato eseguito il test di resistenza meccanica alla compressione, come descritto precedentemente, su granuli a due diversi tempi di maturazione. Di seguito vengono presentati i dati, in Tabella 6.

Granuli prodotti con ricetta 1 (kg)	Granuli prodotti con ricetta 2 (kg)
4,7	6,7
3,7	5,7
4,15	6,15
4	6
5,1	7,1
4	6
3,5	5,5
2,5	4,5
4	6
4	6
3,65	5,65
3,1	5,1

Tabella 6: Valori di carico a rottura per il test di compressione descritto nel testo (valori in Kg).

Il valore medio e la deviazione standard vengono mostrati in Tabella 7.

Granulo	Valori medi (kg)	Dev. Standard (kg)
<i>Ricetta 1</i>	3,9	0,6
<i>Ricetta 2</i>	4,4	0,8

Tabella 7: descrittori statistici per il test di resistenza a compressione.

Si nota che la differenza tra i due test su granuli diversi è inferiore alle deviazioni standard calcolate, per cui il test viene interpretato con filosofia *pass/fail*, e non per valutazioni tra granuli prodotti con ricette diverse. Pertanto se vengono trovati granuli con carico di rottura inferiore a 2 kg, il test viene considerato negativo, e ripetuta la granulazione con ricetta diversa.

Ricette di granulazione modificate

In questo paragrafo vengono riassunti i passaggi che hanno portato alla definizione di una ricetta di granulazione ottimale, anticipando alcuni istanze sviluppate nei paragrafi successivi.

Processo di granulazione

La procedura applicata per ottenere il materiale granulato può essere così sintetizzata:

- formulazione del materiale secco con opportuno sistema di mescolamento (vedi Figura 4, a sinistra) e aggiunta delle opportune quantità di silicato di sodio e acqua
- trasferimento del materiale nel piatto di granulazione;
- permanenza del materiale nel piatto per un tempo opportuno per permettere la formazione dei granuli;
- trasferimento del materiale nel tunnel di essiccazione;
- raccolta del materiale per caduta, e ripetizione del passaggio nel tubo fino a separazione dei granuli.

È stato verificato che anche con minimi tempi di permanenza nel piatto granulatore si formano granuli di dimensioni elevate, e gli stessi granuli si aggregano finendo per formare degli aggregati di alcuni centimetri, come mostrato in Figura 3.



Figura 3: alcuni granuli aggregati. Dimensioni 1 -2 cm.

La maturazione dei granuli è legata alla reticolazione del legante – in questo caso Silicato di Sodio. Il silicato di Sodio reticola con una reazione di condensazione in cui si ha l'espulsione

di una molecola d'acqua per ogni legame Si-O-Si creato. Dunque, come osservato in precedenza, tutti quelle condizioni che favoriscano l'espulsione dell'acqua, come tempo e temperatura, spostano la reazione verso i prodotti e promuovono la reticolazione. Granuli di dimensione maggiore trattengono più a lungo l'umidità poiché ci mettono più tempo ad asciugare. Durante la ricerca è stato osservato come granuli di dimensione maggiore uscissero dall'essiccatore ancora umidi, al punto di non resistere all'impatto di caduta. Granuli di dimensioni contenute invece (3-4mm), uscivano dall'essiccatore già asciutti e avevano fin da subito ottime proprietà di resistenza meccanica.

Per evitare la formazione di aggregati di dimensioni così elevate è stato dunque eliminato il passaggio nel piatto granulatore, alimentando il tunnel di essiccazione direttamente con il materiale dopo la formulazione del secco in un mescolatore opportuno con il silicato di sodio e l'acqua, previo passaggio attraverso una griglia metallica con maglie quadrate di 5 mm, allo scopo di evitare l'aggregazione del materiale (vedi Figura 4 a destra).



Figura 4: a sinistra, il mescolatore utilizzato per il mescolamento del materiale da granulare; a destra, la griglia utilizzata per alimentare il tubo di essiccazione.

Mediante l'accorgimento della griglia, si ottengono granuli di dimensioni non superiori a 6,5 mm, che asciugano in tempi più brevi dei granuli prodotti con il piatto granulatore e con una scarsa tendenza all'aggregazione.

Descrizione delle ricette

Nel corso del progetto sono state apportate alcune modifiche alla ricetta di partenza (vedi Tabella 4), in quanto i granuli ottenuti spesso risultavano deboli meccanicamente, e robusti solo dopo lunghi tempi di essiccazione. A questo scopo è stato aumentato il tenore di Silicato di Sodio, sempre utilizzando il piatto granulatore, ed è stato variato anche il rapporto tra Sabbia di vetro TQ e inferiore a 0,2 mm, per cercare di rendere il granulo più compatto. In Tabella 8 viene riportata la ricetta migliore tra quelle testate, dove le proprietà meccaniche rispondono ai valori indicati nei paragrafi precedente.

materiale	% in peso di materiale secco	% in peso rispetto al materiale secco
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	85%	
<i>Sabbia di vetro < 0,2 mm</i>	15%	
<i>Acqua</i>		16%
<i>Silicato di Sodio</i>		29%

Tabella 8: ricetta migliorata per la produzione di granuli con piatto di granulazione

Con l'utilizzo della griglia per alimentare il tunnel di essiccazione, al posto del piatto granulatore, sono stati ottenuti granuli più piccoli. Questo ha portato ad ottimizzare altri parametri di processo, cioè diminuire la temperatura di essiccazione (dai 200°C iniziali a 80-100°C) e diminuire i tempi di residenza, fino all'ordine dei minuti. A parità di resistenza meccanica, granuli più piccoli richiedono meno Silicato di Sodio, per cui è stato possibile ottimizzare anche questo parametro mantenendo accettabili le proprietà meccaniche.

Tenendo conto di quanto sopra riportato e valutando i risultati delle prove effettuate, sono stati definiti degli intervalli dove il granulato ottenuto risulta accettabile. Si riporta in Tabella 9 tale ricetta.

materiale	% in peso di materiale secco	% in peso rispetto al materiale secco
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	15 - 25	
<i>Sabbia di vetro < 0,2 mm</i>	75 - 85	
<i>Acqua</i>		10 - 14
<i>Silicato di Sodio</i>		14 - 22

Tabella 9: ricetta di granulazione ottimizzata, sono mostrati gli intervalli di utilizzo delle materiali considerati.

L'ottimizzazione dei parametri di processo ha permesso la riduzione della dimensione dei granuli (alimentando il tubo di essiccazione attraverso il passaggio nella griglia) e di conseguenza l'ottenimento di granuli di resistenza meccanica accettabile in minor tempo e a temperature di essiccazione minori, con conseguente risparmio di tempo ed energia in un ipotetico *scale-up* industriale. Non si esclude che alcuni parametri debbano essere rivisti, soprattutto la quantità di acqua e/o la quantità di Silicato di sodio, in vista dell'utilizzo di un apparato di dimensioni più elevate.

Effetto del materiale organico

Un test di formulazione è stato eseguito privando la frazione fina della parte organica. Il fino ha intrinsecamente più organico, sia derivante dalla sedimentazione in fase di vagliatura, sia in forza della maggior area superficiale. La frazione fine usata per queste granulazioni è stata sottoposta a trattamento in forno a 550°C per 2 ore.

materiale	% in peso di materiale secco	% in peso rispetto al materiale secco
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	15	
<i>Sabbia di vetro < 0,2 mm</i>	85	
<i>Acqua</i>		13,5
<i>Silicato di Sodio</i>		16,5

Tabella 10: ricetta con fino bruciato e non bruciato.

La ricetta utilizzata per ottenere dei granuli è la stessa, per cui la presenza di materiale organico nelle quantità presenti nella sabbia di vetro (circa 0.5% - 1%, misurato come Perdita

al fuoco) non presenta alcuna influenza sul processo di granulazione a livello di laboratorio e dovrà essere valutata solo in funzione del potere riducente dei granulati in forza del quantitativo di organico presente.

Effetto del materiale fine

Sono stati eseguiti alcuni test di granulazione aumentando progressivamente la frazione fine, cioè inferiore a 0,2 mm. Di seguito in Tabella 11 vengono riportate le ricette che hanno permesso di ottenere dei granuli dalla resistenza meccanica accettabile.

materiale	fino 85	fino 95	fino 100
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	15%	5%	0%
<i>Sabbia di vetro < 0,2 mm</i>	85%	95%	100%
<i>Acqua</i>	15%	10%	18%
<i>Silicato di Sodio</i>	29%	14%	10%

Tabella 11: Ricette utilizzate per valutare la granulazione con maggiori quantità di materiale fine inferiore a 0,2 mm.

Come si nota dalle ricette in Tabella 11 per ottenere granuli partendo solo da frazione fine di proprietà meccaniche accettabili e con limitate quantità di Silicato di Sodio è stato necessario aumentare l'acqua fino al 18%.

Granulazione del materiale Tal quale

Sono stati effettuati dei test di granulazione utilizzando solo materiale Tal Quale, ovvero sabbia di vetro commerciale, senza aggiunta di frazione inferiore a 0,2 mm.

materiale	Mix TQ
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	100%
<i>Sabbia di vetro < 0,2 mm</i>	-
<i>Acqua</i>	11%
<i>Silicato di Sodio</i>	12%

Tabella 12: ricetta ottimizzata per la granulazione della Sabbia di Vetro Tal Quale

I granuli ottenuti, di resistenza meccanica accettabile, risultano mediamente più piccoli e più ruvidi, ma comunque all'interno dei limiti di resistenza all'abrasione e resistenza meccanica stabiliti precedentemente.

Parametri di processo

Tempo di essiccazione

I granulati prodotti con ricetta iniziale sono stati divisi in 4 frazioni e immessi nel cilindro essiccatore a 80 - 120°C rispettivamente per una volta (quella di prima granulazione), 2, 3 e 4 volte. Tali passaggi ulteriori sono serviti a valutare l'effetto di un eventuale maggior tempo di residenza dei granulati nel cilindro di essiccazione. I risultati della prova di abrasione sono riassunti nel grafico in Figura 5.

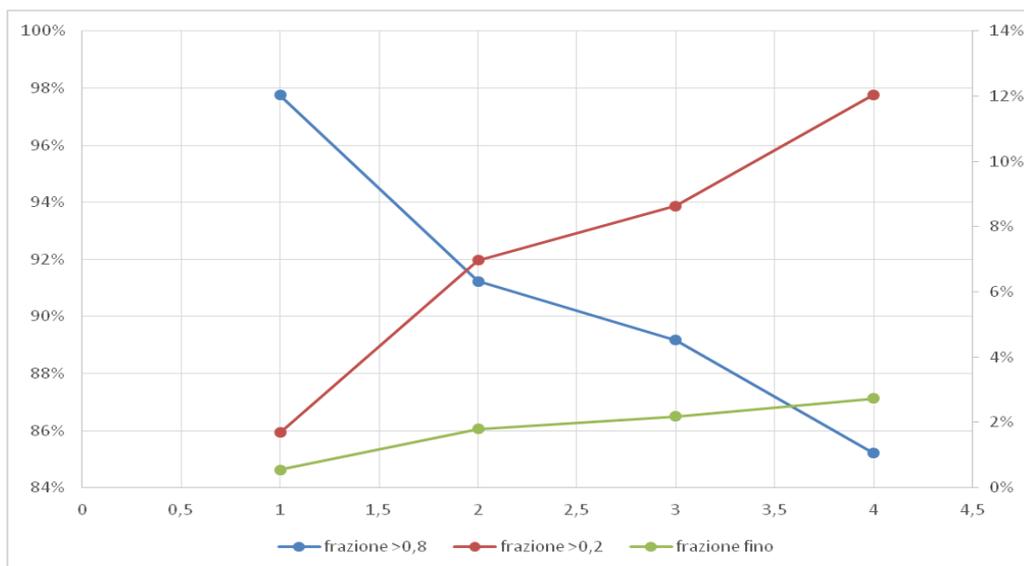


Figura 5: test di abrasione. In ascissa il numero di passaggi, in ordinata le perdite in peso dei materiali in Legenda..

Le frazioni perse a parità di durata del test di abrasione (20 min con sfere di acciaio) aumentano all'aumentare del numero di passate nel cilindro essiccatore, evidenziando la maggior tendenza dei granuli al danneggiamento prima del completamento della reticolazione del silicato.

Da considerazioni fatte sullo stato dei granuli dopo i diversi passaggi, è emerso che già dopo due passaggi i granuli risultano asciutti al tatto e non aggregati, per cui in grado di essere

movimentati: se si considera questo come il tempo minimo di residenza nell'essiccatore per ottenere dei granuli movimentabili è possibile stimare le seguenti condizioni di esercizio: residenza 10 - 15 minuti totali, temperatura 80 – 120°C.

Tempo di stoccaggio/maturazione

Allo scopo di individuare la miglior combinazione tra tempo di essiccazione e tempo di maturazione, sono state eseguite diverse prove di granulazione, seguite dai rispettivi test di resistenza meccanica.

Per questi test è stata usata la ricetta in Tabella 9 con questi parametri:

- cilindro essiccatore a 80 – 120°C;
- due serie di campioni: uno soggetto a 2 passate e uno soggetto a 6 passate in essiccatore;
- ciascuno di essi viene testato dopo un tempo di riposo nullo, riposo a T_{amb} per un tempo considerato infinito, riposo a $T=120^{\circ}C$ per un tempo infinito.

I dati di resistenza meccanica sono riassunti in Tabella 13, 14 e 15 e sono riassunti nel grafico in Figura 6:

Prova abrasione 2 passate 0 riposo			Prova abrasione 6 passate 0 riposo		
P_{iniz}	208	100,00%	P_{iniz}	206,75	100,00%
>0,8	201,84	97,04%	>0,8	191,44	92,59%
>0,2	1,64	0,79%	>0,2	8,33	4,03%
fino	4,52	2,17%	fino	6,98	3,38%

Tabella 13: prove di abrasione: nessuna maturazione.

Prova abrasione 2 passate riposo infinito a T_{amb}			Prova abrasione 6 passate riposo infinito a T_{amb}		
P_{iniz}	192,04	100,00%	P_{iniz}	200,95	100,00%
>0,8	188,6	98,21%	>0,8	193,24	96,16%
>0,2	0,92	0,48%	>0,2	1,55	0,77%
fino	2,52	1,31%	fino	6,16	3,07%

Tabella 14: prove di abrasione: maturazione a temperatura ambiente

Prova abrasione 2 passate riposo infinito a T=120°C			Prova abrasione 6 passate riposo infinito a T=120°C		
P _{iniz}	200,86	100,00%	P _{iniz}	191,46	100,00%
>0,8	198,66	98,90%	>0,8	187,23	97,79%
>0,2	0,6	0,30%	>0,2	0,79	0,41%
fino	1,6	0,80%	fino	3,44	1,80%

Tabella 15: prove di abrasione: maturazione a 120°C..

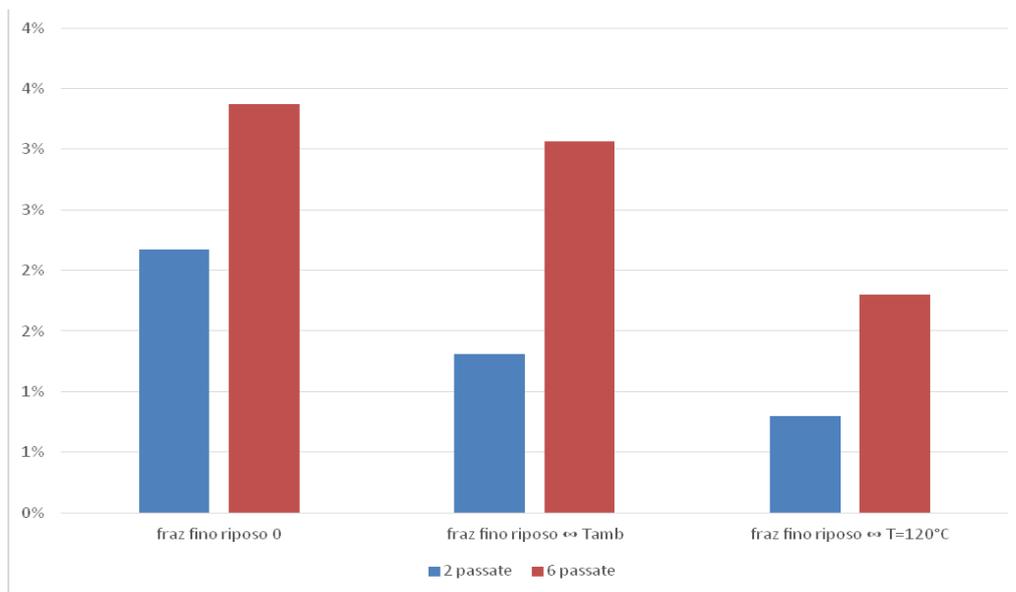


Figura 6: materiale fino perduto dai granuli nel test di abrasione.

Si nota come:

- la quantità di granuli >0,8 mm siano superiori per il campione a 2 passate rispetto a quello a 6 passate, indipendentemente dal metodo di riposo;
- i valori di perdita siano minori a 2 passate piuttosto che a 6, sia per la frazione >0,2 mm sia per quella fina;
- il tempo di riposo ha un effetto benefico sulla resistenza dei granuli, ancor maggiore se a temperatura elevata.

L'andamento delle frazioni di materiale conferma quanto già evidenziato col test precedente ovvero che passate aggiuntive nell'essiccatore indeboliscono i granulati rendendoli più prone a perdere materiale nelle successive prove di abrasione. Effetto benefico hanno invece i tempi di riposo a granulato fermo. In particolare l'effetto è maggiore a temperatura elevata dove si

ha rimozione dell'acqua e spostamento verso destra della reazione di condensazione del silicato di sodio.

Dato che i granuli sono ancora caldi quando escono dal tubo di essiccazione, il tempo minimo di stoccaggio corrisponde al tempo di raffreddamento misurato durante queste sperimentazioni, cioè circa 2 ore per quantitativi di 2 kg. Una volta che il materiale raggiunge la temperatura ambiente, la cinetica di reticolazione è estremamente rallentata ed il materiale è ormai pronto per il trasporto.

Valutazione dell'umidità residua

Allo scopo di ottimizzare i parametri energetici dell'ipotetico impianto di produzione pilota sono state condotte delle valutazioni sul quantitativo di acqua presente nei granulati nelle diverse fasi del processo di granulazione.

A questo scopo il materiale è stato valutato per la perdita di acqua subita nelle diverse fasi di produzione di granuli a livello di laboratorio, utilizzando la ricetta di partenza (vedi Tabella 2). L'umidità residua dopo ogni passaggio è stata determinata mediante misura della perdita in peso del materiale dopo essiccazione fino a peso costante a 105°C.

I risultati vengono mostrati in Tabella 16, normalizzati rispetto al prodotto finito.

Materiale / Fase	% in peso, rispetto al secco	% in peso, rispetto al granulo
miscelato	123,6	120,4
dopo essiccazione	105,6	102,4
dopo maturazione	103,2	100,0
secco (SdV + Sil sodio)	100,0	96,8

Tabella 16: schema delle perdite in peso dovute alla presenza di umidità.

Dal punto di vista energetico, il parametro più rilevante è la quantità di acqua da eliminare durante il processo di essiccazione, che risulta essere circa del 18%, mentre durante la maturazione viene eliminato circa il 2,4% di umidità, e ne rimane circa il 3,2% come acqua inglobata nel reticolo di polisilicato di sodio, che ha un ruolo strutturale.

Effetto dell'impilaggio del materiale granulato

È stato valutato l'effetto dell'impilaggio del materiale granulato in condizioni di stoccaggio all'aria aperta. Lo scopo era di valutare la variazione della resistenza meccanica, in questo caso resistenza all'abrasione, per granuli mantenuti in impilaggio per 24 ore.

Sono stati prodotti granuli in quantità sufficiente a riempire un tubo di plastica (diametro circa 20 cm) fino ad un metro di altezza. Sono stati utilizzati degli inserti di plastica morbida per dividere l'altezza della pila, in modo da valutare 4 lotti di granuli ad altezze diverse. I risultati sono mostrati in Tabella 17.

livello	granuli interi	materiale inferiore a 0,8
<i>1 (basso)</i>	99,18%	0,82%
<i>2</i>	98,77%	1,23%
<i>3</i>	99,12%	0,88%
<i>4 (alto)</i>	99,21%	0,79%

Tabella 17: risultati del test di abrasione sui granuli della prova di impilaggio.

Si nota che il materiale non mostra dipendenza dalla posizione nella pila, in quanto i valori di perdita di materiale fine dopo il test sono estremamente bassi e molto simili.

Valutazione della strategia di granulazione ottimale

Ricetta di granulazione

Le diverse ricette provate, nei vari casi descritti in precedenza, sono state valutate per le loro proprietà meccaniche granulometriche, allo scopo di stabilire una ricetta di granulazione di riferimento per la progettazione di massima di un impianto di produzione pilota di granuli.

Nel grafico successivo viene rappresentato un riassunto delle prove fatte, dove i colori rappresentano una valutazione della qualità dei granuli ottenuti. Il colore rosso rappresenta una completa non accettabilità, il colore verde invece una piena conformità. Il colore arancione si pone in una situazione intermedia, dove sono soddisfatti solo alcuni parametri.



Figura 7: grafico riassuntivo della valutazione delle diverse ricette utilizzate nel corso della ricerca.

Sulla base delle sperimentazioni eseguite e delle considerazioni sviluppate nelle pagine precedenti la ricetta di riferimento prevede un contenuto di sabbia compreso tra il 75 e l'85 %, silicato di sodio tra il 14 e il 22 %, acqua tra il 6 e 7 % e sabbia tale quale tra il 15 e 25 % (vedi Tabella 18).

Materiale	Intervalli accettabili - %	Valori di riferimento - %
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	15 – 25	20
<i>Sabbia di vetro < 0,2 mm</i>	75 – 85	80
<i>Acqua</i>	6 – 7	6
<i>Silicato di Sodio</i>	14 – 22	22

Tabella 18: ricette di granulazione di riferimento

All'interno di questi intervalli è possibile ottenere dei granuli di 1 – 3 mm di diametro medio. Si ritiene che questa ricetta sia sufficientemente robusta da poter essere utilizzata in un ipotetico impianto pilota per la granulazione di consistenti quantità di materiale (1 – 2 tonn/d).

Schema di Impianto Pilota

Di seguito vengono riassunti in Figura 8 i principali parametri di processo citati in precedenza, con una breve descrizione dei passaggi di lavoro.

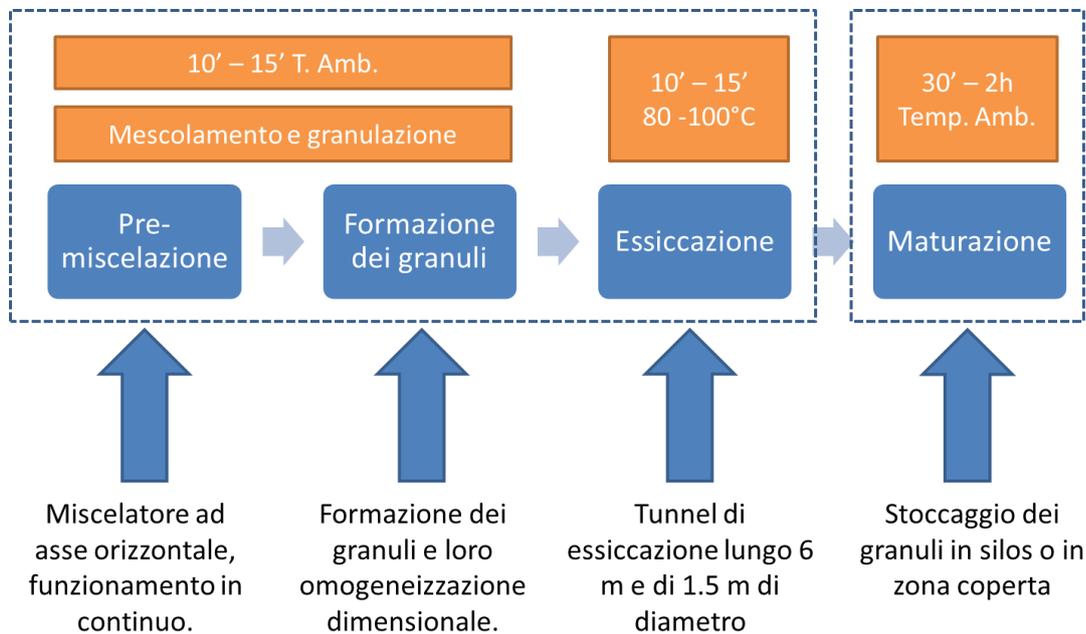


Figura 8: schema di impianto pilota, con i vari passaggi ed i relativi tempi di lavoro stimati.

Lo schema di impianto è diviso in tre stadi principali:

1. Stadio di miscelazione ingredienti e granulazione del materiale: in questo passaggio gli ingredienti vengono formulati in un miscelatore ad asse orizzontale, dove avviene la formazione ed omogeneizzazione dimensionale dei granuli. La durata di questo passaggio è stimata in circa 10 – 15 minuti a temperatura ambiente.
2. Essiccazione: in questo passaggio i granuli entrano in un tunnel ad essiccazione, dove si indurisce la parte superficiale del granulo, così da impedire l'aggregazione tra

granuli e proteggerli da eventuali danni causati dalla movimentazione. Le dimensioni del tunnel citate in Figura 8 sono dimensionate per una produzione giornaliera stimata tra le 1 e 2 tonnellate di materiale.

3. Stoccaggio: lo stoccaggio deve avvenire in silos (a questo punto i granuli risultano impilabili) oppure in zona coperta, dato che si degraderebbero rapidamente sotto l'azione dell'acqua piovana (il Silicato di Sodio è solubile in acqua).

Di seguito si riporta in Figura 9 uno schema di processo più dettagliato.

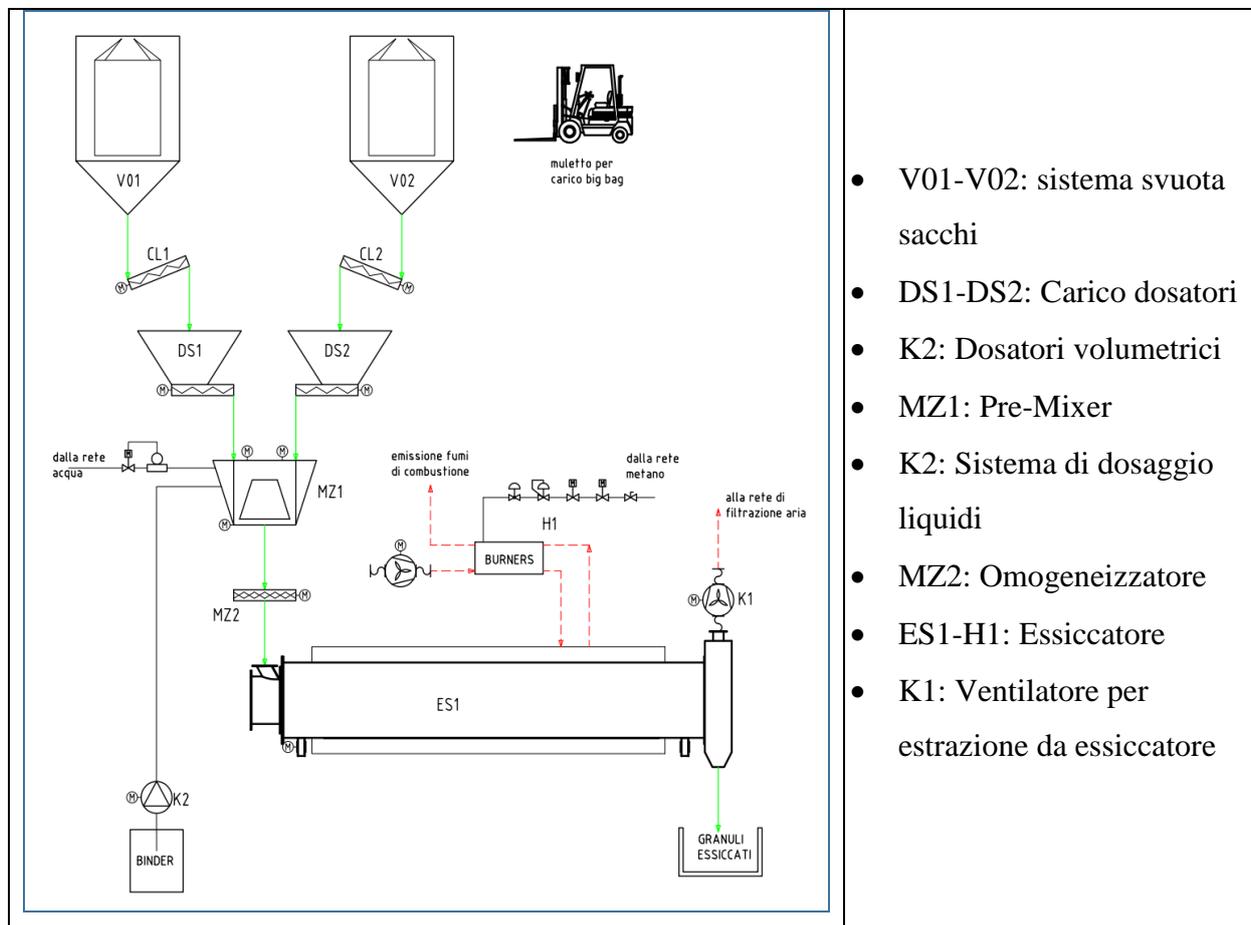


Figura 9: schema di impianto di granulazione

Stima dei consumi energetici di produzione

In base ai dati della ricetta ottimizzata, mostrata in Tabella 18, ed in base allo schema di impianto ipotizzato in Figura 8 e 9, si possono fare delle ipotesi ragionevoli su l'ipotetico consumo energetico per la produzione dei granuli.

In riferimento alla Figura 9, in Tabella 19 sono mostrate delle stime per i consumi della parte elettrica dell'impianto.

ITEM	DESCRIZIONE	POTENZA
V01	SVUOTA BIG BAG	
V02	SVUOTA BIG BAG	
CL1	COCLEA DI SOLLEVAMENTO	1,5 kW
CL2	COCLEA DI SOLLEVAMENTO	1,5 kW
DS1	DOSATORE VOLUMETRICO	0,37 + 0.75 kW
DS2	DOSATORE VOLUMETRICO	0,37 + 0.75 kW
MZ1	MISCELATORE ORIZZONTALE	11 + 2x 5,5 kW
MZ2	OMOGENEIZZATORE GRANULI	1,5 kW
ES1	ESSICCATORE ROTANTE	5,5 kW
H1	SERIE BRUCIATORI A GAS	
K1	VENTILATORE DI ESTRAZIONE	4,0 kW
K2	POMPA DOSATRICE	0,25 kW

Tabella 19: stima dei consumi elettrici dell'impianto mostrato in Figura 9.

Di seguito in Tabella 20 vengono invece riportate le stime dei consumi energetici per quanto riguarda la parte di essiccazione dei granuli, seguendo la ricetta ottimizzata mostrata in Tabella 18.

<i>Massa umida da trattare</i>	$W_1 =$	2,2	Ton/h
<i>Tasso di ricircolo</i>	$\varepsilon =$	0	
<i>Prodotto da essiccare</i>	$W_2 =$	2.200	kg/h
<i>Umidità prodotto in ingresso</i>	$u_1 =$	23	%
<i>Umidità prodotto in uscita</i>	$u_2 =$	3	%
<i>Massa prodotto secco</i>	$P_s =$	1.694	kg/h
<i>Temperatura prodotto in uscita</i>	$T_{pu} =$	50	°C
<i>Temperatura prodotto in ingresso</i>	$T_{pi} =$	20	°C
<i>Acqua evaporata</i>	$G_v =$	454	kg/h
<i>Calore di evaporazione</i>	$Q_{ev} =$	287.021	kcal/h
<i>Calore riscaldamento prodotto</i>	$Q_p =$	15.246	kcal/h
<i>Calore totale essiccazione</i>	$Q_{tess} =$	335.852	kcal/h
<i>Potenzialità termica generatore</i>	$Q_{gen} =$	403.022	kcal/h
TOT 0,47 MW			

Tabella 20: Stima dei consumi energetici per la parte di essiccazione dei granuli

I parametri più rilevanti alla base di questa stima sono riassunti in Tabella 21.

	Scenario A - 22 % silicato	Scenario B - 14 % silicato	
<i>SdV trattata</i>	1,7	1,7	<i>tonn/day</i>
<i>Materiale alimentato</i>	2,17	2,12	<i>tonn/day</i>
<i>Granulato prodotto</i>	1,88	1,83	<i>tonn/day</i>
<i>Consumo metano</i>	50,8	50,7	<i>mc/h</i>
<i>Consumo elettrico</i>	40	40	<i>kWh</i>
<i>Consumo silicato</i>	0,374	0,288	<i>tonn/day</i>

Tabella 21: parametri utilizzati per la stima dei costi di produzione del granulato.

Un'ipotesi di processo potrebbe prevedere la produzione di sabbia di vetro con granulometria superiore a 0,2 mm, mescolata al granulato del suo materiale inferiore a 0,2 mm, secondo lo schema in Figura 10.

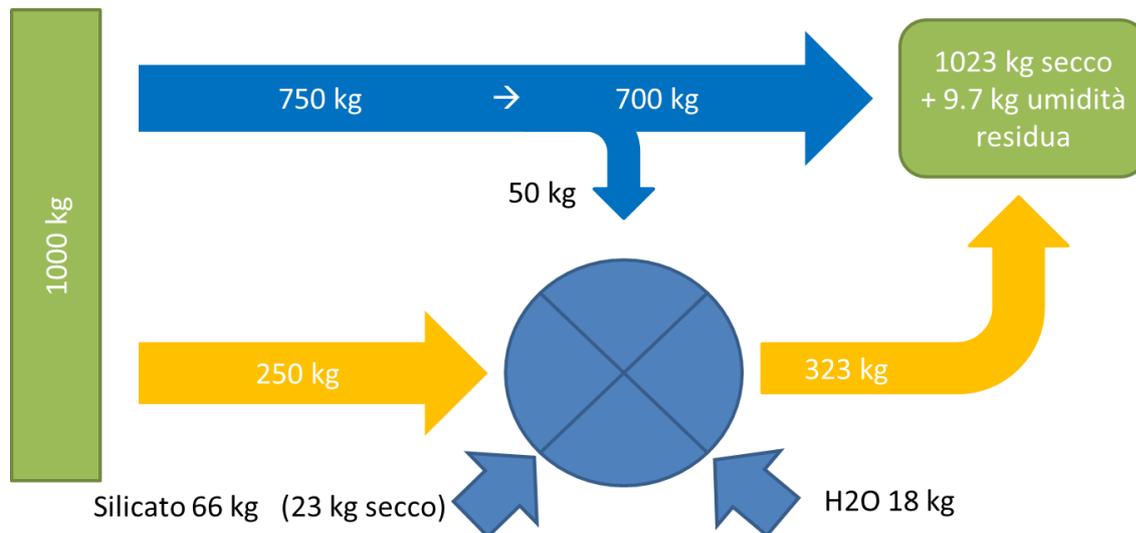


Figura 10: ipotesi di trattamento di valorizzazione della sabbia di vetro con vagliatura a 0.2 mm e granulazione

In Figura 10 viene riportato una stima di bilancio di massa, partendo da dati medi delle ricette discusse in precedenza, dove si tiene conto di un 25% di materiale inferiore a 0,2 mm, e un apporto di 23 kg di silicato di sodio secco, che corrisponde a 2 kg di Na₂O, corrispondenti a 3 kg di Soda come Na₂CO₃, e 21 kg di SiO₂, cioè sabbia.

Utilizzo dei granuli per la produzione di vetro cavo

Analisi morfologica

Un campione di granuli prodotto con la ricetta mostrata in Tabella 18, cioè all'interno degli intervalli citati, è stato sottoposto ad osservazione al microscopio ottico stereoscopico.



Figura 11: granulo (a sx), con a dx ingrandita la parte evidenziata in blu.

Si nota che si è formata una pellicola di alcune centinaia di micron parzialmente distaccata dal corpo principale del granulo. Il distacco non è comunque totale, e probabilmente dipende da una non ottimale cinetica di essiccazione, eventualmente da ottimizzare in sede di ottimizzazione del processo in un impianto pilota.

Un ulteriore ingrandimento dell'interno del granulo è mostrato in Figura 12.



Figura 12: ingrandimento dell'interno del granulo mostrato in Figura 11.

Si nota una lieve discontinuità, ma comunque la matrice risulta omogenea e compatta, senza notare segregazione di materiale fine separato da materiale più grossolano.

Analisi chimica

Un campione di granuli prodotto con la ricetta mostrata in Tabella 18, cioè all'interno degli intervalli citati, è stato sottoposto ad analisi chimica mediante XRF. Il risultato dell'analisi è mostrato in Tabella 22, confrontato con l'analisi chimica delle Sabbie formulate.

Ossido %p/p	Sabbia TQ	Sabbia < 0,2 mm	Granulo
<i>SiO₂</i>	71,4	71,1	71,5
<i>Al₂O₃</i>	2,05	2,04	2,05
<i>Na₂O</i>	12,4	12,2	12,5
<i>K₂O</i>	0,82	0,85	0,83
<i>CaO</i>	10,45	10,8	10,52
<i>MgO</i>	2,08	2,04	2,07
<i>SO₃</i>	0,07	0,11	0,078
<i>Fe₂O₃</i>	0,39	0,52	0,42
<i>PbO</i>	0,031	0,049	0,046
<i>LOI</i>	0,47	2,04	1,85

Tabella 22: analisi chimiche XRF delle sabbie utilizzate per la granulazione e dei granuli prodotti.

La composizione chimica è molto simile alla sabbia di vetro attualmente in commercio, di conseguenza il materiale può essere usato, senza specifiche conseguenze sulla composizione vetro, sia da solo che mescolato con la sabbia di vetro, utilizzando gli stessi accorgimenti applicati per il rottame e la sabbia di vetro. Il suo limite quantitativo di utilizzo dovrà essere valutato nel corso di una possibile prova industriale, unico contesto in grado di valutare pienamente i benefici derivanti da un suo utilizzo per la produzione di vetro cavo.

Densità e Porosità Apparente

La densità e porosità apparente dei granuli è stata misurata secondo la norma UNI EN 993-1 per materiali non isolanti densi ($d > 1$). Di seguito in Tabella 23 vengono riportati i risultati ottenuti.

Parametro	Valore
Densità	1,7 g/cm ³
Porosità	29,7 %

Tabella 23: Valori di Densità e porosità apparente per i granuli oggetto della ricerca.

Profilo granulometrico

Un campione di granuli prodotto con la ricetta mostrata in Tabella 12, cioè all'interno degli intervalli citati, è stato sottoposto ad analisi granulometrica mediante setacci tarati ASTM. Il risultato dell'analisi è mostrato in Figura 13.

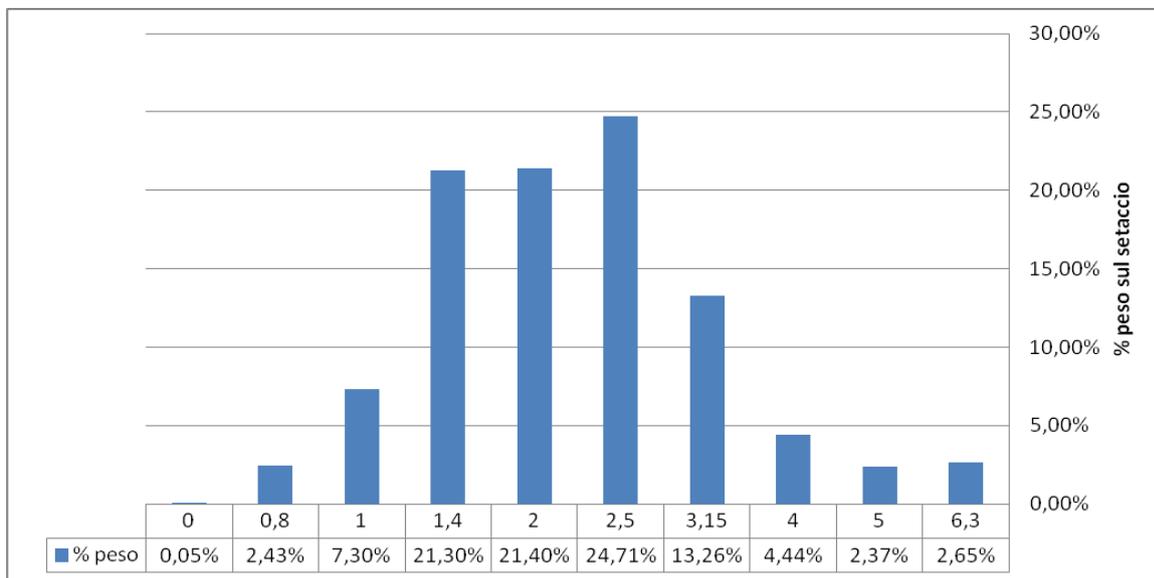


Figura 13: profilo granulometrico dei granuli prodotti con la griglia.

La scala inferiore della Figura 13 è in mm. Si può notare un profilo granulometrico piuttosto compatto, indice di una crescita omogenea dei granuli durante il processo.

Test di fusibilità

Nell'ambito della tecnologia vetraria, la fusibilità di un materiale è definita dal tempo necessario a formare un vetro omogeneo. A questo scopo vengono eseguite una serie di fusioni per tempi crescenti in condizioni controllate. Aliquote diverse di materiale, in questo caso granulato di sabbia di vetro, vengono poste in crogioli silico-alluminosi e inserite in forno alla temperatura di 1350°C. Ogni ora, per cinque ore, il vetro ottenuto viene tolto dal forno e messo nella muffola di ricottura per il tempo necessario a permettere il rilassamento

delle tensioni. I campioni vengono osservati per bolle e infusi al microscopio ottico stereoscopico.

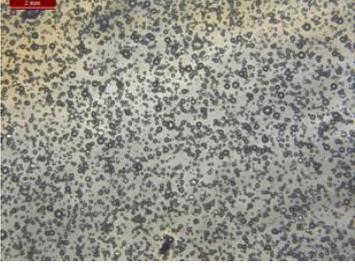
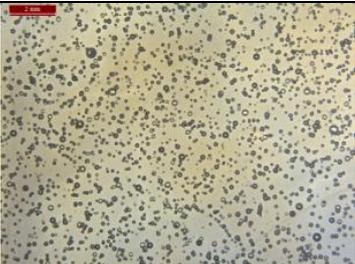
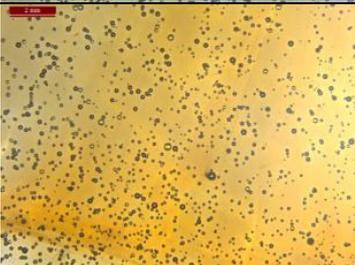
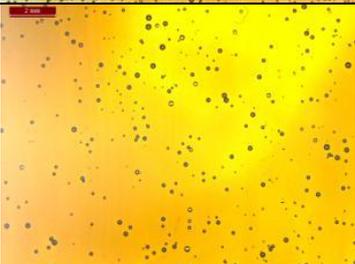
	<p>Tempo di residenza a 1350°C : 1 ora Numero di particelle non fuse: 0 Numero di bolle: 2867</p>
	<p>Tempo di residenza a 1350°C : 2 ore Numero di particelle non fuse: 0 Numero di bolle: 1780</p>
	<p>Tempo di residenza a 1350°C : 3 ore Numero di particelle non fuse: 0 Numero di bolle: 1337</p>
	<p>Tempo di residenza a 1350°C : 4 ore Numero di particelle non fuse: 0 Numero di bolle: 392</p>
	<p>Tempo di residenza a 1350°C : 5 ore Numero di particelle non fuse: 0 Numero di bolle: 120</p>

Tabella 24: serie di foto sulle fusioni effettuate sul materiale granulato, descrizione a sinistra.

I valori trovati sono compatibili con la numerosità di bolle che si rileva da test di fusione effettuati su sabbia di vetro nelle stesse condizioni, mentre l'assenza di infusi è compatibile con la presenza preponderante di materiale fine, in questo caso per l'80%, che garantisce una pronta fusibilità anche a tempi brevi degli eventuali materiali CSP presenti.

Test di schiumatura

La formazione di schiuma nei forni da vetro è, in generale, un problema di non facile soluzione, in quanto le cause possono essere diverse, e le soluzioni di non facile applicazioni. Il personale tecnico delle vetrerie spesso denuncia una tendenza alla schiumatura in seguito all'utilizzo della sabbia di vetro. Allo scopo di misurare questa tendenza, è stata sviluppata una metodica interna per quantificare la schiumatura a livello di prova di laboratorio.

Una certa quantità di materiale viene posta asciutta in crogioli silico-alluminosi ed inserita nel forno caldo a 1350°. Il materiale viene lasciato per circa 1 ora, successivamente il crogiolo viene estratto e messo in ricottura assieme al vetro contenuto. Una volta raffreddato, il crogiolo viene tagliato in due parti lungo l'altezza, e vengono misurati il livello del vetro attuale e quello raggiunto durante la fusione. In Figura 8 viene mostrato un esempio del risultato ottenuto dal test, con le indicazioni dei parametri considerati per il calcolo del livello di schiumatura.

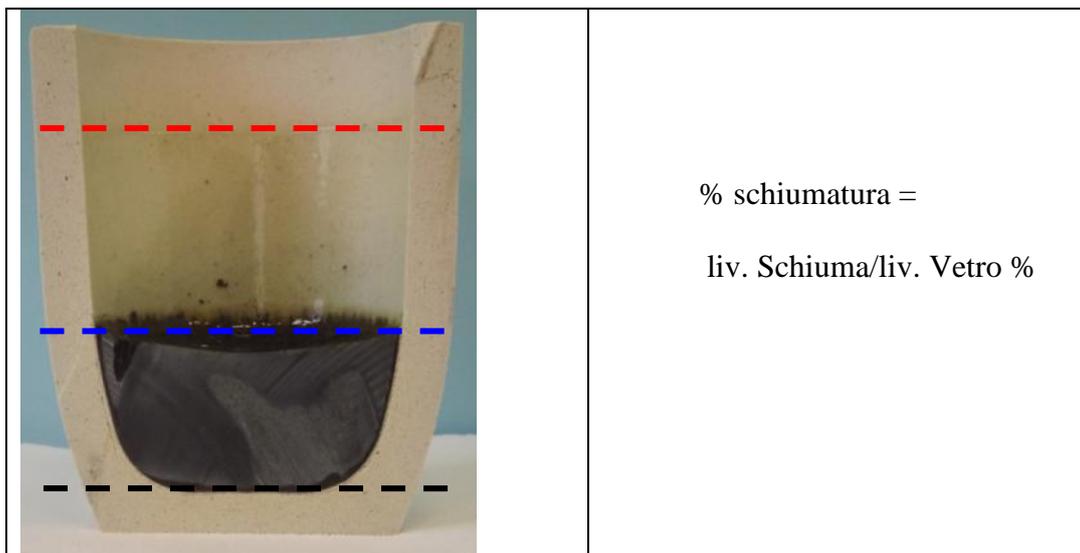


Figura 14 : Esempio di test, ed indicazione dei parametri considerati per la valutazione del livello di schiumatura.

I test effettuati sui materiali granulati hanno rilevato una diminuzione del livello di schiumatura rispetto al materiale da granulare.

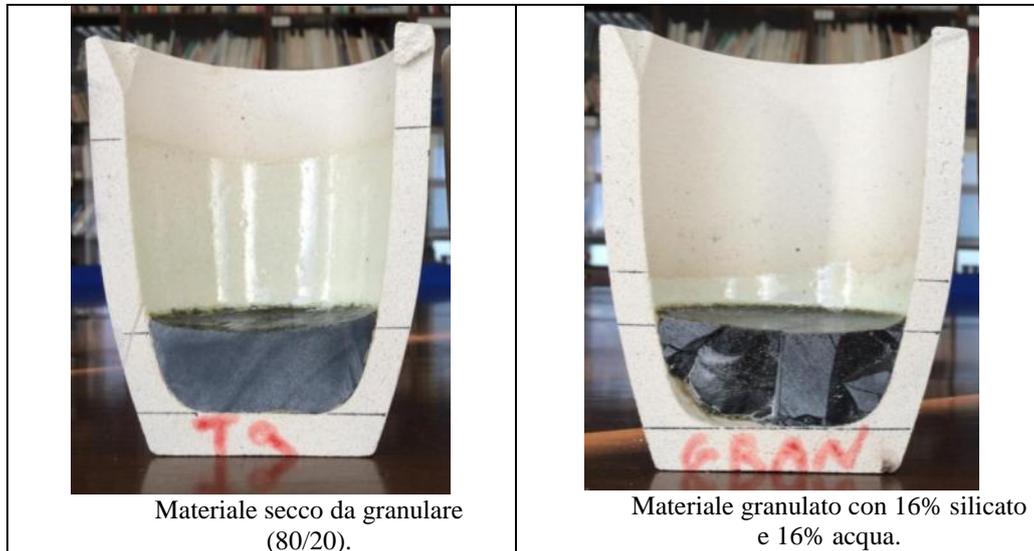


Figura 15: valori di schiumatura determinati per i test eseguiti in laboratorio.

Dai dati riportati in Figura 15 si nota che i granuli non presentano alcuna tendenza alla schiumatura. Di seguito, in Tabella 25, vengono riassunti i dati di schiumatura per le diverse prove effettuate.

Materiale da granulare (0 – 0.8 mm)	Materiale granulato (0.5 – 2 cm)	Materiale granulato (3 – 5 mm)	Rottame di vetro (1 – 3 cm)
133 – 153 %	50-55%	90-115%	75 - 88%

Tabella 25: intervalli di schiumatura per i diversi materiali sottoposti a test.

Se riportiamo i dati schiumatura più rilevanti rispetto ai valori ottenuti in passato (Progetto CONAI-CoReVe 2015-2016) otteniamo il grafico riportato in Figura 16.

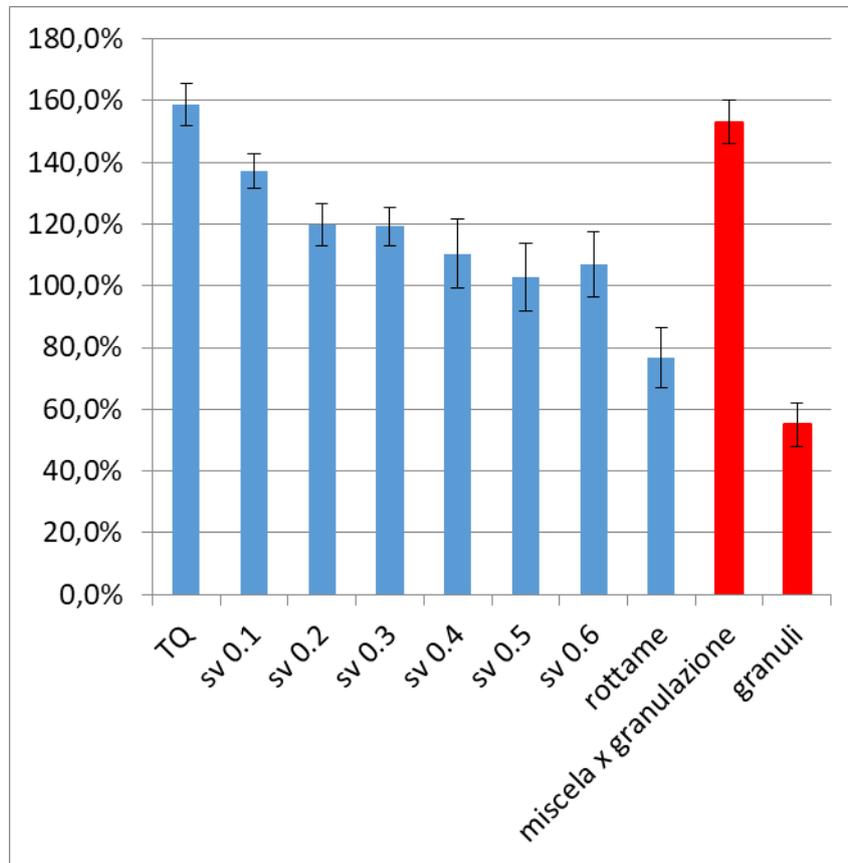


Figura 16: valori di schiumatura (ascissa) contro tipologia di materiale.

Si ricorda che la dicitura TQ, sv 0,1, sv 0,2 ecc. dal Grafico di Figura 16, si riferisce ad una sabbia di vetro che è stata sottoposta a test di schiumatura privandola di volta in volta, del materiale di sottovaglio inferiore a 0,1 mm, 0,2 mm rispettivamente.

Si può osservare che la tendenza alla schiumatura dei granuli risulta dello stesso ordine di grandezza, del rottame di vetro, e sensibilmente inferiore ai diversi tagli granulometrici applicati alla Sabbia di vetro.

Conclusioni

Durante il corso della ricerca sono state provate diverse ricette per diversi ambiti di applicazione.

I granulati ottenuti per mescolamento di materiale fine (<0,2 mm), materiale Tal quale, acqua e una soluzione di Silicato di sodio a 38-40 Baumè ha dimostrato ottime proprietà di resistenza meccanica e all'abrasione, secondo i test sviluppati in SSV.

Se consideriamo l'ipotesi di un utilizzo in forno da vetro per la produzione di contenitori che già utilizza sabbia di vetro, e ipotizzando che il granulato venga formulato mescolato con la sabbia di vetro, si può proporre una ricetta come riportata in Tabella 26:

materiale	% in peso di materiale secco	% in peso rispetto al materiale secco
<i>Sabbia di vetro TQ</i>	15 - 25	
<i>Sabbia di vetro < 0,2 mm</i>	75 - 85	
<i>Acqua</i>		10 - 14
<i>Silicato di Sodio</i>		14 - 22

Tabella 26: ricetta ottimizzata.

Dai test effettuati in laboratorio il tempo di residenza in essiccatore tra 80 e 100°C è di circa 10 – 15 minuti. L'applicazione di questa ricetta e di questi parametri produttivi porta ad ottenere dei granuli di dimensioni non superiori a 6,5 mm, mantenendo la resistenza meccanica a livelli accettabili.

Sulla base dei parametri di processo indicati è stato formulato un progetto di massima da applicare su scala industriale. Lo schema di impianto è diviso in tre stadi principali:

1. Stadio di miscelazione ingredienti e granulazione del materiale: in questo passaggio gli ingredienti vengono formulati in un miscelatore ad asse orizzontale, dove avviene la formazione ed omogeneizzazione dimensionale dei granuli. La durata di questo passaggio è stimata in circa 10 – 15 minuti a temperatura ambiente.

2. Essiccazione: in questo passaggio i granuli entrano in un tunnel ad essiccazione, dove si indurisce la parte superficiale del granulo, così da impedire l'aggregazione tra granuli e proteggerli da eventuali danni causati dalla movimentazione. Le dimensioni del tunnel citate in Figura 8 sono dimensionate per una produzione giornaliera stimata tra le 1 e 2 tonnellate di materiale.
3. Stoccaggio: lo stoccaggio deve avvenire in silos (a questo punto i granuli risultano impilabili) oppure in zona coperta, dato che si degraderebbero rapidamente sotto l'azione dell'acqua piovana (il Silicato di Sodio è solubile in acqua).

La caratterizzazione chimico fisica, le prove di fusibilità e di schiumatura non hanno trovato, a livello di laboratorio, alcun ostacolo all'utilizzo in vetreria, per ciò che concerne le problematiche di schiumatura e di dissoluzione delle particelle di materiale infusibile variamente presenti nella sabbia di vetro.

--- FINE DEL RAPPORTO DI PROVA ---

L'INCARICATO DELLA PROVA
Dr. Stefano Ceola

IL DIRETTORE DEI LABORATORI
Dr. Nicola Favaro