

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA
CON SEDE A CESENA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE

in INGEGNERIA MECCANICA Classe LM- 33

Sede di Forlì

TESI DI LAUREA

in SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI LM

**SVILUPPO ED OTTIMIZZAZIONE DI PRODOTTI E
PROCESSI PRODUTTIVI CERAMICI A RIDOTTO IMPATTO
AMBIENTALE**

CANDIDATA

Claudia Bandini

RELATORE

Prof. Ing. Alberto Fregni

Anno Accademico 2010/2011

Sessione III

A nonna Tudina,

il più grande esempio di forza, saggezza e bontà che abbia mai conosciuto.

SOMMARIO

INTRODUZIONE.....	7
I.1 UN PROBLEMA PER TUTTI.....	9
I.2 CENNI STORICI.....	9
I.3 GESTIONE DEI RIFIUTI.....	11
I.4 I MARCHI ECOLOGICI.....	14
CAPITOLO 1: I MATERIALI CERAMICI.....	15
1.1 GENERALITA' SUI MATERIALI CERAMICI.....	17
1.2 IL LEGAME CHIMICO.....	18
1.3 COMPOSIZIONE DELLA CROSTA TERRESTRE.....	20
1.4 LE MATERIE PRIME CERAMICHE.....	20
CAPITOLO 2: LE TECNOLOGIE PRODUTTIVE CERAMICHE.....	27
2.1 EVOLUZIONE DELLE TECNOLOGIE PRODUTTIVE NEL SETTORE CERAMICO.....	29
2.2 FORMULAZIONE DELL' IMPASTO.....	30
2.3 LA MACINAZIONE.....	31
2.4 L' ATOMIZZAZIONE.....	39
2.5 FINITURA DELLE POLVERI.....	42
2.6 LA PRESSATURA.....	43
2.7 L' ESSICCAZIONE.....	48
2.8 APPLICAZIONE DEGLI SMALTI.....	51
2.9 COTTURA.....	52
2.10 LINEE DI SCELTA, LUCIDATURA, CONFEZIONAMENTO.....	58
CAPITOLO 3: IL SISTEMA DI VALUTAZIONE LEED.....	59
3.1 VANTAGGI NELLA REALIZZAZIONE DI UN EDIFICIO SECONDO I PRINCIPI DELL'ECOSOSTENIBILITA' (GREEN BUILDING).....	61
3.2 IL PROTOCOLLO LEED.....	61
3.3 CREDITI LEED DERIVANTI DALL'AGGIUNTA DI MATERIALI RICICLATI [6].....	64
CAPITOLO 4: FINALITA' E IMPOSTAZIONE DELLA SPERIMENTAZIONE.....	69
4.1 L'OBIETTIVO DELLA SPERIMENTAZIONE.....	71
4.2 COLLABORAZIONE CON L'AZIENDA CERDOMUS CERAMICHE S.P.A.....	71
4.3 COLLABORAZIONE CON CENTRO CERAMICO BOLOGNA.....	72
4.4 LINEE DELLA SPERIMENTAZIONE.....	73

CAPITOLO 5: 1° PARTE DELLA SPERIMENTAZIONE: PREPARAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI IMPASTI CON L'AGGIUNTA DI MATERIALE RICICLATO	75
5.1 PREPARAZIONE IMPASTI PRESSO LABORATORIO TECNOLOGICO DI CERDOMUS	77
5.1.1 MATERIALI	77
5.1.2 METODI	83
5.1.3 RISULTATI	105
5.2 CARATTERIZZAZIONE DEGLI IMPASTI SELEZIONATI PRESSO CENTRO CERAMICO	106
5.2.1 MATERIALI	106
5.2.2 METODI	108
5.2.3 RISULTATI	114
5.3 APPENDICE A	131
5.4 APPENDICE B	133
 CAPITOLO 6: 2° PARTE DELLA SPERIMENTAZIONE: PREPARAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI PIASTRELLE PRODOTTE SEMI- INDUSTRIALMENTE	 137
6.1 MATERIALI	139
6.2 METODI	139
6.3 RISULTATI	141
 CAPITOLO 7: L'INFLUENZA SUI CONSUMI ENERGETICI DELL'AGGIUNTA DI VETRO NELL'IMPASTO	 147
7.1 IL PROBLEMA ENERGETICO E L'INNOVAZIONE TECNOLOGICA	149
7.2 I FORNI RAPIDI MONOSTRATO	150
7.3 STIMA DEL RISPARMIO ENERGETICO	152
 CAPITOLO 8: CONCLUSIONI	 155
BIBLIOGRAFIA	159

INTRODUZIONE

I.1 UN PROBLEMA PER TUTTI

Il problema della gestione dei rifiuti è divenuto sempre più rilevante ed è direttamente sotto gli occhi dei cittadini.

La crescita dei consumi e la progressiva urbanizzazione hanno aumentato sempre più la produzione dei rifiuti e la loro gestione nella società moderna si è trasformata in un problema di non semplice soluzione.

L'incremento dei rifiuti è infatti strettamente legato al benessere a cui il nostro paese è arrivato. I rifiuti infatti, in quanto prodotti di scarto che derivano dall'attività dell'uomo, sono una funzione diretta della cultura e dell'organizzazione di vita dell'uomo.

Fino ad oggi, in particolare nel nostro Paese, lo smaltimento in discarica ha rappresentato la soluzione più adottata. Tuttavia, la discarica non si presenta come una soluzione permanente al problema dei rifiuti e, come ormai è tratto noto, comporta spesso gravi conseguenze sull'ambiente e sulla salute pubblica.

I.2 CENNI STORICI

L'uomo preistorico, prima nomade poi agricoltore, produceva rifiuti: essi erano lo scarto delle proprie attività. Oltre ai rifiuti fisiologici vi erano resti di cibo e di attività manuali, rifiuti quindi di origine prevalentemente animale e vegetale. Utensili, armi ecc. erano realizzati con ciò che la natura offriva (legno, pietra, ossa, pelle) ed una volta caduti in disuso venivano abbandonati.

A quel tempo probabilmente nessuno si pose mai il problema di dove riporre i rifiuti; essi erano semplicemente abbandonati in spazi lontani dalle abitazioni oppure gettati in fiumi o dirupi che normalmente si trovavano in prossimità delle capanne.

La nascita di villaggi e poi in seguito delle prime cittadine mise in evidenza la necessità di allontanare i rifiuti, soprattutto quelli fisiologici, per evitare l'insorgere d'infezioni ed il moltiplicarsi di insetti e animali dannosi alla salute dell'uomo.

Sembra che Atene nel III° secolo a.C. disponesse già di un servizio urbano per la raccolta dei rifiuti.

Nei secoli successivi in città come Parigi e Roma divenne necessario emettere ordinanze locali di divieto di abbandono rifiuti in luoghi pubblici: "Non dovranno essere gettate dalle finestre immondizie e materie infette, né acqua di qualsiasi genere" (Parigi 1531).

La rivoluzione industriale ed il progresso hanno a mano a mano aumentato il problema in termini non soltanto di quantità ma anche di qualità, producendo una

metamorfosi del rifiuto. Intorno al 1925 il rifiuto più diffuso era ancora la cenere, ma il vetro e i metalli venivano scartati in quantità non trascurabili.

Nel secondo dopoguerra nasce la cosiddetta "civiltà dei consumi": da quel momento la quantità dei rifiuti è aumentata vertiginosamente, in particolare materiali organici, vetro, carta e prodotti nuovi come le plastiche e i materiali delle industrie chimiche e siderurgiche.

I paesi industrializzati devono quotidianamente risolvere il problema dello smaltimento degli enormi quantitativi di materiale scartato, perché i cicli naturali non riescono a "chiudersi".

Gli agenti atmosferici non riescono a trasformare i rifiuti in tempo utile e i batteri e i funghi non hanno successivamente il tempo per decomporli, purtroppo non c'è più equilibrio tra i tempi della natura e quelli dell'uomo.

Ma non solo, dal momento in cui sono stati immessi sul mercato enormi quantitativi di materiali che fino ai giorni nostri non erano presenti in natura, il problema dei rifiuti è diventato ancora più critico.

Nella maggior parte dei casi essi non sono biodegradabili, cioè non esistono ancora in natura organismi piccoli o grandi capaci di decomporli.

Oggi la politica europea e nazionale sui rifiuti propone la soluzione della gestione integrata dei rifiuti basandosi su quattro concetti semplici e di buon senso ma, a quanto pare, difficilissimi da attuare:

- produrre meno rifiuti,
- produrre rifiuti meno pericolosi,
- recuperare il massimo di materia ed energia dai rifiuti
- smaltire correttamente il resto (che dovrà essere il meno possibile.),
incentivando quindi la raccolta differenziata e il riciclo

L'Unione Europea e molti altri paesi, già dagli anni '90, basandosi sui concetti sopra elencati ha iniziato ad attuare una politica per la gestione dei rifiuti basata sulla prevenzione, sulla promozione del riciclo e sulla diminuzione del ricorso alla discarica.

Ecco le principali iniziative in merito:

- Convenzione di Basilea, 1989: approvazione di specifiche direttive e iniziative di cooperazione sul controllo dei movimenti transfrontalieri e lo smaltimento dei rifiuti.
- Conferenza di Rio de Janeiro, 1992: ha posto in evidenza a livello internazionale lo stretto legame che unisce la produzione di rifiuti con il degrado dell'ambiente e ha permesso di individuare obiettivi e strumenti per prevenire il più possibile e

- minimizzare la produzione di rifiuti, soprattutto pericolosi e per migliorarne in particolare la gestione così da diminuire i danni sia sulla salute sia sull'ambiente.
- Trattato di Amsterdam, 1997: introduzione dello sviluppo sostenibile nelle politiche ambientali europee. In questo contesto gli Stati membri hanno affermato la loro determinazione a promuovere il progresso economico e sociale tenendo conto dello sviluppo sostenibile e della protezione dell'ambiente.
 - Protocollo di Kyoto, 1997 (ma entrato in vigore nel 2005): obbligo per i paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti (CO₂ e altri gas serra) nel periodo 2008-2012, in una misura non inferiore al 5% rispetto alle emissioni registrate nel 1990
 - Strategia di Göteborg, 2001: lo sviluppo sostenibile¹ per la protezione dell'ambiente è divenuto uno degli obiettivi prioritari dell'UE (gestione e utilizzo più responsabile delle risorse).
 - Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo, giugno 2003: introduzione dell'analisi del ciclo di vita (LCA – Life Cycle Analysis) come lo strumento da utilizzare per individuare le azioni appropriate da intraprendere in ogni fase della vita del prodotto al fine di diminuirne gli impatti negativi sull'ambiente.
 - Riesame della politica ambientale europea, gennaio 2005: la Commissione europea ha messo in risalto in particolare l'importanza della relazione tra economia ed ambiente puntando innanzitutto sulla produzione di prodotti che dovranno utilizzare minori risorse, presentare un minor impatto ambientale ed evitare la produzione di rifiuti fino dalla fase di progettazione. In questo contesto, come dono, la raccolta differenziata e il connesso settore del riciclo giocano un ruolo fondamentale.

I.3 GESTIONE DEI RIFIUTI

I rifiuti sono definiti come le sostanze e gli oggetti che derivano da attività umane o da cicli naturali di cui il detentore abbia deciso di disfarsi. Essi vengono classificati in base alla loro origine e alla loro pericolosità.

Un interesse particolare negli ultimi decenni riguarda la riduzione degli effetti dei rifiuti sulla natura e sull'ambiente, la possibilità di recuperare risorse da essi e la riduzione dei rifiuti stessi.

¹ Sviluppo sostenibile: modello di sviluppo socio-economico che sia in grado di soddisfare le necessità delle attuali generazioni senza per questo compromettere i bisogni di quelle future.

L'impossibilità oggettiva a percorrere questa strada come unica alternativa alla loro gestione non significa che il loro smaltimento dovrà fare a meno della "tappa finale" alla discarica, bensì che questa, oltre ad essere controllata, dovrà venire dopo altre tipologie di gestione quali il riciclo, il compostaggio², la termovalorizzazione³, ecc. Il rifiuto da onere ambientale deve quindi diventare un'opportunità di sviluppo. La prevenzione richiede il continuo controllo e miglioramento delle prestazioni e dell'efficienza ambientale. Le imprese produttrici dovranno quindi provvedere a:

- introdurre sistemi di gestione ambientale all'interno dei processi industriali e dei servizi (certificazione ambientale);
- modificare le tecnologie di processo per ridurre l'inquinamento (eco-efficienza dei cicli di produzione e di consumo);
- migliorare i sistemi di abbattimento delle emissioni (aria, acqua, suolo);
- perseguire l'efficienza energetica e la riduzione della produzione dei rifiuti;
- perseguire l'innovazione ambientale di prodotto oltre che di processo, migliorando le prestazioni ambientali del prodotto e le potenzialità di recupero e riutilizzo anche a fine vita.

LA NORMATIVA SULLA GESTIONE DEI RIFIUTI IN ITALIA

Il d.lgs. 22/97 e le sue successive modifiche ed integrazioni hanno avviato una nuova fase in materia di gestione dei rifiuti con il passaggio ad una nozione onnicomprensiva di gestione dei rifiuti dove lo smaltimento diventa la fase finale e residuale del complesso ciclo dei rifiuti

Un punto fondamentale è rappresentato dal passaggio dal concetto di rifiuto da eliminare a quello di rifiuto da valorizzare come risorsa o energia, attraverso la realizzazione della gestione integrata dei rifiuti che consenta di raggiungere gli obiettivi prioritari concordati a livello comunitario.

La nuova normativa considera non più il rifiuto come scarto bensì come risorsa, rifiuto che quindi può essere nuovamente utilizzato comportando un vantaggio sia ecologico sia economico. L'obiettivo prioritario in tema di rifiuti individuato dalle politiche comunitarie è l'uso razionale e sostenibile delle risorse, seguendo un rigoroso ordine gerarchico: a partire dalla riduzione della produzione e pericolosità dei rifiuti, passando per la valorizzazione degli stessi, sotto forma di materia, incrementando la

² Compostaggio: tecnicamente è un processo biologico aerobico e controllato dall'uomo che porta alla produzione di una miscela di sostanze umificate (il compost) a partire da residui vegetali sia verdi che legnosi o anche animali, mediante l'azione di batteri e funghi.

³ Termovalorizzazione: smaltimento dei rifiuti mediante un processo di combustione ad alta temperatura (incenerimento) che dà come prodotti finali un effluente gassoso, ceneri e polveri.

raccolta differenziata e valorizzando il rifiuto residuo dal punto di vista energetico, fino allo smaltimento in condizioni di sicurezza.

Deve essere garantita, infine, la corretta gestione della fase conclusiva dell'intero ciclo del recupero, favorendo:

- la reintroduzione dei materiali recuperati nei diversi cicli produttivi in sostituzione delle materie prime vergini (recupero di materia);
- la valorizzazione della componente energetica delle frazioni non altrimenti utilizzabili (recupero di energia).

GLI ASPETTI SOCIO-ECONOMICI ED AMBIENTALI DI UNA OTTIMALE GESTIONE DEI RIFIUTI

Oggi il rapporto dell'umanità con l'ambiente è arrivato ad un punto critico. La nostra società, fortemente industrializzata, in continua crescita demografica ed urbana, inquina, da un lato perché richiede beni la cui produzione ha effetti negativi sull'ambiente, poiché diventeranno potenziali rifiuti, dall'altro perché consuma risorse limitate ed esauribili.

Il tema dei rifiuti, è quello forse più discusso, dato l'impatto immediato che provoca sul territorio e sulla società; questi infatti, non rappresentano solo un pericolo per l'ambiente, ma sono sempre di più una minaccia per la salute umana.

Il problema dello smaltimento è inoltre solo un aspetto della vicenda: molto importanti sono anche le attuali modalità di produzione e consumo che devono essere modificate per minimizzare lo sfruttamento delle risorse non rinnovabili.

La realizzazione di un modello di sviluppo sostenibile è possibile se si riesce a trovare un giusto equilibrio tra la spinta ad incrementare lo sviluppo socio-economico e la preservazione delle risorse naturali.

Per fare ciò è necessario coinvolgere industrie, autorità, consumatori, nel processo di revisione dei circuiti produttivi del rifiuto.

Riciclare o valorizzare i rifiuti generati dalla produzione e dal consumo diventa una scelta obbligata sia per ridurre il prelievo di risorse vergini dall'ambiente (materie prime e fonti energetiche primarie) sia per contenere il rilascio in esso di sostanze inquinanti o comunque incompatibili con il mantenimento degli equilibri climatici e biologici del pianeta.

Meno prelievo di risorse e minor rilascio di rifiuti e inquinanti riducono le pressioni sull'ambiente e concorrono alla sopravvivenza degli ecosistemi di cui tutti siamo parte.

Diventa quindi fondamentale mettere in atto su vasta scala il processo di recupero e riciclo di tutte quelle componenti naturali già utilizzate ossia dei materiali che sono

riscattabili dai rifiuti. Recupero e riciclo possono dunque convertire i rifiuti in un ricco e variegato patrimonio di risorse rinnovabili.

I.4 I MARCHI ECOLOGICI

Uno degli strumenti che il consumatore possiede per influire sulla produzione di rifiuti consiste nell'orientare i propri acquisti su beni contrassegnati da marchi ecologici che, nati nell'ambito della politica ambientale europea contraddistinguono una serie di prodotti/servizi eco-compatibili.

Attualmente in molti paesi europei sono stati creati dei sistemi di etichettatura (labels) o marchi ecologici, che indicano prodotti di eccellenza ambientale tra quelli immessi sul mercato, strumenti che probabilmente verranno utilizzati su vasta scala in un prossimo futuro.

La Commissione Europea, con l'aiuto degli Stati membri ,definisce i gruppi di prodotti/servizi che possono essere certificati e per ciascuno di essi definisce i criteri ecologici che devono essere rispettati ai fini del rilascio del marchio. I criteri sono definiti in modo da ridurre gli impatti ambientali negativi (qualità dell'aria e acqua, rifiuti, consumo energetico, ecc.) individuati a seguito dell'analisi dell'intero ciclo di vita del prodotto/servizio. I criteri vengono periodicamente sottoposti a revisione e resi più restrittivi in modo da indurre il miglioramento continuo della qualità ambientale dei prodotti e servizi etichettati e rimanere al passo con l'evoluzione tecnologica.

CAPITOLO 1
I MATERIALI CERAMICI

1.1 GENERALITA' SUI MATERIALI CERAMICI

L'uomo inventò i materiali ceramici circa diecimila anni fa; da allora fino a questo secolo, gli sviluppi sono stati scarsi e il termine materiali ceramici ha indicato prevalentemente i materiali ottenuti per cottura di impasti di materiali argillosi (sinterizzazione).

Fin dall'antichità si scoprì che riscaldando l'argilla umida questa diventava dura e poteva prendere forme prima della cottura.

Gli antichi greci avevano coniato la terminologia *Keramos* per rappresentare il processo di formatura e cottura dell'argilla comune.

Più recentemente il significato si è esteso fino a comprendere buona parte dei materiali inorganici non metallici duri, caratterizzati da rottura fragile, e ottenuti con processi anche diversi dalla sinterizzazione, quindi anche materiali vetrosi, il cemento, i composti ionici (NaCl), il quarzo, i silicati, ecc.

Quindi, tra le molteplici possibili definizioni, un materiale ceramico può essere efficacemente descritto come *" qualunque prodotto, avente una forma, composta da materie prime inorganiche non metalliche (siano esse minerali od artificiali), che da uno stato incoerente di polvere⁴ viene trasformato tramite svariate operazioni in un semilavorato che, per cottura, diviene un oggetto solido, avente struttura parzialmente cristallina e parzialmente vetroso "*.

Praticamente tutte le trasformazioni e/o miscele dopo cottura sono permanenti.

Le proprietà di questi materiali variano in modo marcato a causa delle differenze di legame, in generale sono tipicamente duri e fragili, con basse tenacità e duttilità, ciò ne ha fortemente limitato l'impiego nelle applicazioni industriali più avanzate.

Al contrario sono, di solito, buoni isolanti elettrici e termici per l'assenza di elettroni di conduzione, hanno una temperatura di fusione relativamente alta e una elevata stabilità chimica in molti ambienti aggressivi, grazie alla stabilità dei forti legami.

Fino a poco tempo fa si parlava esclusivamente di ceramici tradizionali, composti da ossidi naturali e impiegati per la produzione di piastrelle, sanitari, stoviglie, laterizi e alcuni tipi di refrattari, vetri, cementi.

Oggi, grazie a tecniche avanzate di preparazione e l'utilizzo di non-ossidi e ossidi speciali, questi materiali sono anche un sussidio utilissimo per tutti i settori di tipo tecnico ingegneristico.

⁴ Stato incoerente di polvere: miscela di polveri indipendenti tra di loro e capaci di interagire soltanto attraverso collisioni.

I ceramici avanzati appartengono a quella classe di sostanze a scarsa reattività dotati anche di una certa resistenza meccanica, utili, quindi ad esempio per impieghi di supporto, per utilizzi ad alte temperature, isolamento termico e ricoprenti (bioceramici, porcellane elettriche e termiche, ceramici per l'elettronica, catalizzatori, refrattari speciali, ecc.)

1.2 IL LEGAME CHIMICO

Prima di trattare in dettaglio di ciascun materiale è bene ricordare che il legame atomico presente nei composti ceramici è un insieme di tipo ionico e covalente; è possibile calcolare valori approssimati delle percentuali dei due tipi di legame, considerando le differenze di elettronegatività tra le diverse varietà di atomi presenti. L'entità del legame ionico o covalente tra gli atomi di questi impasti è importante poiché determina anche il tipo di struttura cristallina che si formerà nel composto ceramico finale.

Il legame ionico è un legame chimico di natura elettrostatica che si forma quando le caratteristiche chimico-fisiche dei due atomi sono nettamente differenti, e vi è soprattutto una grande differenza di elettronegatività tra i componenti.

Nei solidi ionici la disposizione degli ioni è determinata sostanzialmente dai seguenti fattori:

1. dimensione relativa degli ioni nel solido ionico;
2. necessità di bilanciare le cariche elettrostatiche per mantenere la neutralità elettrica.

I solidi ionici sono costituiti da cationi e anioni; nel legame alcuni atomi perdono i loro elettroni più esterni per l'elevata differenza di elettronegatività, per così divenire cationi e altri acquistano elettroni esterni per diventare anioni.

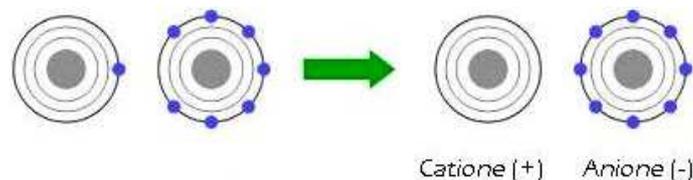


Fig. 1.1: Formazione di cationi e anioni nel legame ionico.

I cationi sono quindi, normalmente, più piccoli; il numero di anioni che circondano ciascuno di essi (numero di coordinazione) corrisponde al numero di atomi adiacenti che circondano un catione centrale.

Per ottenere una struttura stabile e più compatta possibile e per ridurre al minimo l'energia globale del solido, il catione centrale deve essere circondato dal maggior numero di anioni, i quali devono essere in contatto con lo ione centrale e deve essere mantenuta la neutralità di carica.

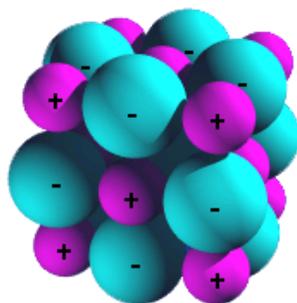


Fig. 1.2: Modellazione della struttura di un solido ionico.

Il legame covalente ha invece luogo fra atomi con piccole differenze di elettronegatività e che sono vicini l'uno all'altro nella tavola periodica; gli atomi mettono in comune i loro elettroni esterni con altri atomi, in modo che ciascuno arrivi alla configurazione di un gas nobile e quindi a completare l'ottetto (molto stabile).

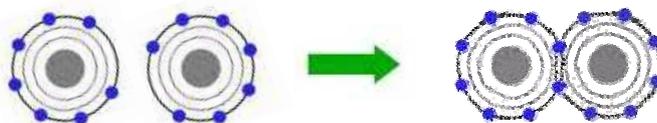


Fig. 1.3: Completamento dell'ottetto nel legame covalente

Composto ceramico	Atomi di legame	Differenza di elettronegatività	% di carattere ionico	% di carattere covalente
Ossido di magnesio, MgO	Mg - O	2.3	73	27
Ossido di alluminio, Al ₂ O ₃	Al - O	2.0	63	37
Diossido di silicio, SiO ₂	Si - O	1.7	51	49
Nitrato di silicio, Si ₃ N ₄	Si - N	1.2	30	70
Carburo di silicio, SiC	Si - C	0.7	11	89

Tab.1.1: Percentuale di carattere ionico e covalente nel legame di alcuni composti ceramici.

1.3 COMPOSIZIONE DELLA CROSTA TERRESTRE

La grandissima maggioranza degli elementi presenti sulla superficie del pianeta si trova in forma ossidata, in quanto vi è una grandissima abbondanza d'ossigeno. Risulta che la composizione della crosta terrestre è rappresentata da circa il 70% da ossido di silicio e dal 20% d'ossido di alluminio.

Il resto è costituito da ossidi di sodio, magnesio, potassio, calcio e ferro.

Tutto ciò gioca a vantaggio del settore ceramico in quanto la composizione media della crosta terrestre rappresenta quasi perfettamente quella di un impasto ceramico.

Gli elementi chimici di cui è composta la crosta terrestre non si trovano quasi mai in forma elementare, ma sono quasi sempre combinati tra loro per formare dei composti chimici naturali conosciuti come minerali.

Tutta la tecnologia di preparazione e di formatura degli impasti ceramici è stata sviluppata per sfruttare al meglio le caratteristiche di alcune famiglie di minerali che presentano le proprietà e la composizione chimica idonee a seconda del prodotto finito che si vuole sviluppare.

Le miscele di minerali naturali vengono genericamente classificate come "materie prime", ovvero le materie che vengono utilizzate all'inizio del processo tecnologico, per arrivare al prodotto finito.

1.4 LE MATERIE PRIME CERAMICHE

Volendo approfondire la conoscenza delle caratteristiche di un materiale ceramico tradizionale, è sicuramente necessario capire meglio la sua composizione chimica.

L'impasto di base di una piastrella, può con le opportune modifiche, generalizzare quello di tutti i materiali tradizionali; vengono inclusi:

- MATERIALI ARGILLOSI, che danno sufficiente plasticità per ottenere una forma definita. Essi apportano Al, Si, parte di Ca, Fe, Ti.
- MATERIALI FONDENTI (Feldspati, Nefelina, CaCO_3 .) che producono per cottura fasi liquide che agiscono come collante fra le particelle e promuovono le reazioni solido-solido; sono apportatori di Na, K, Al, Si.
- ALTRI MATERIALI detti "INERTI" (Talco, Silice, Pirofillite), che servono ad ottenere prestazioni particolari; essi apportano principalmente Ca, Mg, Si.
- ADDITTIVI, utili a migliorare la reologia⁵ delle sospensioni acquose, possono essere organici o inorganici e sono aggiunti in quantità inferiori all' 1%.

⁵ Reologia: scienza che studia gli equilibri raggiunti nella materia deformata per effetto di sollecitazioni, l'oggetto di studio è l'analisi delle deformazioni di strutture solide o fluide soggette a scorrimento.

QUARZO

Abbiamo visto come, sulla superficie terrestre, il composto chimico più abbondante sia l'ossido di silicio o silice (SiO_2).

Il più comune tra i cristalli che si sono formati durante il raffreddamento dei magmi, è il quarzo, presente in quasi tutte le rocce del pianeta; esistono inoltre altre due forme cristalline (tridimite, cristobalite) e una amorfa vetrosa.

Esso presenta proprietà molto interessanti, le quali sono dovute principalmente al fatto che il silicio, essendo nel quarto gruppo della tavola periodica, è in grado di fare legami molto forti.

Esso è il più duro tra i minerali comuni, non si sfalda ma si scheggia; nella sua struttura tridimensionale i legami hanno tutti la stessa forza in ciascuna direzione.

Proprio perché i legami sono forti, il quarzo possiede una temperatura di fusione molto alta e funziona egregiamente come scheletro negli impasti ceramici.

Purtroppo esso è anche responsabile della rottura dei pezzi in raffreddamento, a causa della nota transizione di fase tra quarzo α e quarzo β .

Questa transizione che avviene a 575°C porta ad una improvvisa variazione di volume che può provocare la rottura dei pezzi.

I legami forti di cui è costituito il quarzo si allungano pochissimo per effetto del riscaldamento, per cui l'aumento di volume non è provocato da uno stiramento dei legami ma da una variazione dell'angolo tra le unità strutturali.

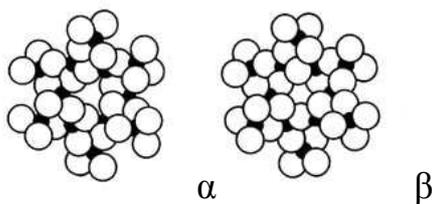


Fig.1.4 (a): Atomi di silicio (neri) e quelli di ossigeno (bianchi) legati in una struttura che cambia simmetria in funzione della temperatura

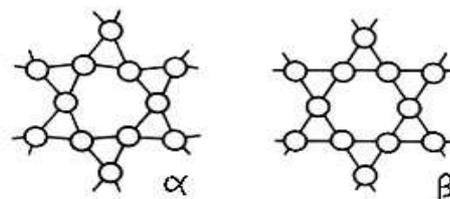


Fig.1.4 (b): Per semplicità sono riportati solo gli atomi di silicio; lo schema del cambiamento è lo stesso del disegno a lato; con una piccola variazione dell'angolo di legame si passa da una fase alfa a quella beta.

L'aggiunta della silice negli impasti ha come fine principale quello di "smagrire" le miscele favorendo anche la degasazione di eventuali impurità, derivanti dalla combustione di sostanze organiche presenti nelle materie prime, l'allontanamento dell'acqua durante il processo di essiccazione e garantiscono la resistenza meccanica in verde.

Inoltre si ottiene una riduzione del ritiro dimensionale e delle deformazioni (in cottura).

FELDSPATI

L'ossido di alluminio rappresenta, da solo, oltre il 20% della crosta terrestre, ma non si trova quasi mai da solo, come l'ossido di silicio.

Anzi, la sua esistenza è rimasta sconosciuta fino a due secoli fa.

L'ossido di alluminio si trova quasi tutto combinato insieme con l'ossido di silicio; grazie al fatto che l'atomo di alluminio è molto simile all'atomo di silicio esistono molte possibilità di scambio tra i due elementi.

L'alluminio prende il posto del silicio all'interno della stessa struttura ed da origine ad una immensa famiglia di minerali, chiamati silico-alluminati.

La sostituzione di un atomo di silicio con uno di alluminio comporta però uno squilibrio di cariche elettriche, che deve essere saturato; ogni atomo di alluminio, infatti, provoca la presenza di una carica elettrica negativa che deve essere bilanciata da una carica elettrica positiva.

Quest'ultima viene fornita da un atomo allo stato di ione positivo (atomi alcalini e alcalino terrosi): sodio, potassio, magnesio, calcio.

I minerali che si formano sono appunto i feldspati di sodio, di potassio, di calcio che sono componenti fondamentali degli impasti ceramici.

La presenza di atomi alcalini che formano legami di tipo ionico e quindi più deboli, aumentano molto la fusibilità del materiale; vengono infatti definiti come "fondenti" e servono ad abbassare le temperature di cottura dei manufatti.

Inoltre, per lo stesso motivo, è molto facile rompere un cristallo di feldspato; esso non risulta quindi difficile da macinare.

I materiali feldspatici trovano ampio impiego in tutti i settori ceramici ove si intenda raggiungere un elevato grado di vetrificazione del pezzo.

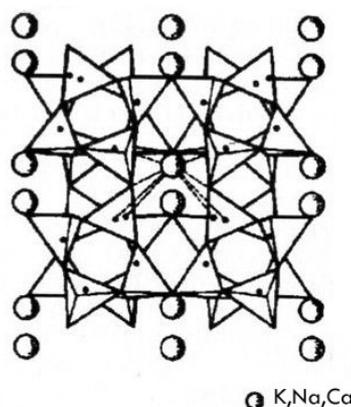


Fig.1.5: Cella elementare dei feldspati. La struttura base è un anello formato da quattro gruppi tetraedrici (nel caso del potassico e del sodico vi sono tre tetraedri di silicio e uno di alluminio, mentre in quello calcico i quattro gruppi sono dovuti metà al silicio e metà all'alluminio).

CARBONATI

Costituiscono un'altra importante famiglia di minerali importanti per gli impasti ceramici, in particolare quelli di calcio e magnesio.

Gli atomi di questi ultimi presenti nei magmi formano composti insieme al silicio e all'alluminio; quando queste rocce si trovano a contatto con gli agenti atmosferici, il calcio e il magnesio vengono disciolti nell'acqua.

Essi sono in grado di formare composti insolubili combinandosi con l'anidride carbonica.

È così che questi elementi passano prima nell'acqua, per poi separarsi sotto forma di carbonato di calcio (calcite) o carbonato di calcio e magnesio (dolomite), appena entrano in contatto con l'anidride carbonica presente nell'aria.

Questi minerali sono caratterizzati da legami ionici non molto forti, per cui si sfaldano facilmente e non sono particolarmente difficili da macinare.

I calcari e la dolomite sono materie prime fondamentali per la produzione di materiali ceramici a basso ritiro e consentono di produrre supporti con valori di assorbimento ideali.

ARGILLE

Le argille, materiali di primaria importanza nell'industria ceramica, sono rocce estremamente variabili, costituite da differenti minerali, di solito di natura silicatica, sedimentati sotto svariate forme – laminette, fibre, ecc. – ed associati ad altri minerali di origine alluvionale, i quali hanno a loro volta un ruolo molto importante.

La sua natura è dunque sedimentaria, sono prodotte dal trasporto di frazioni solide sospese in fluidi che le portano anche a considerevoli distanze, il processo completo di formazione prevede quindi, le fasi di alterazione dei materiali di provenienza, a cui segue l'erosione, il trasporto, ed infine la deposizione dei materiali; il risultato finale viene largamente influenzato anche dalle pressioni e dalle temperature a cui lo strato sedimentato è stato sottoposto.

Passando ad una analisi microscopica, la solubilizzazione degli atomi alcalini presenti nei minerali della famiglia porta inevitabilmente ad uno squilibrio di cariche elettriche, l'acqua entra dunque a far parte della struttura saturando le cariche elettriche con ioni idrogeno; si forma così una vasta famiglia di silico – alluminati idrati, chiamati minerali argillosi.

L'argilla, come molti altri materiali ceramici (tra cui il feldspato), contiene dunque dei silicati che sono strutture formate da atomi (ioni) di silicio e ossigeno legati in modi differenti.

Molti silicati sono utili come materiali tecnologici grazie alle loro caratteristiche di basso costo –l'ossigeno e il silicio sono i due elementi più abbondanti nella crosta terrestre -, reperibilità e proprietà fisiche.

Come accennato, i minerali argillosi sono generalmente, dei silicati idrati di alluminio più o meno complessi, la cui struttura molecolare prevede la combinazione di unità di ripetizione tetraedriche con un atomo di silicio circondato da 4 ossigeni, ed ottaedriche con un atomo di alluminio, circondato da 6 ossigeni.

L'elemento di base è il tetraedro SiO_4^{4-} . Il legame Si–O nella struttura SiO_4^{4-} è per il 50% covalente e per il 50% ionica.

Poiché ogni ossigeno del tetraedro dei silicati ha un elettrone disponibile per legarsi, possono essere prodotti molti tipi di strutture di silicato: struttura a isola (Nesosilicati), struttura a catena/ad anello (Inosilicati), struttura a strati (Fillosilicati), reticoli di silicati. In particolare nei Fillosilicati (argille), ogni tetraedro ha un ossigeno libero e quindi lo strato può legarsi con un altro tipo di strato (legami deboli che permettono lo scorrimento tra strati e quindi la plasticità dei silicati); mentre quando tutti e quattro gli angoli del tetraedro condividono atomi di ossigeno, si produce un reticolo SiO_2 chiamato tectosilicatico (ciò accade nel caso dei feldspati).

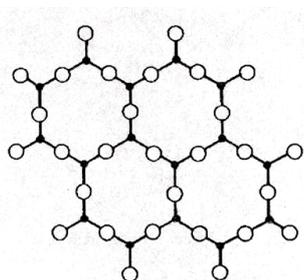


Fig.1.6: Struttura dei Fillosilicati

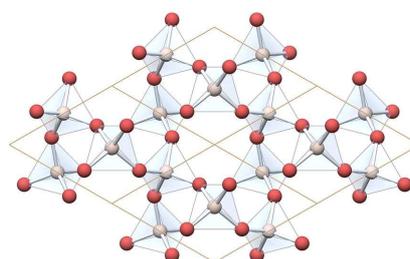


Fig.1.7: Struttura dei Tectosilicati.

Questi minerali rappresentano l'ultimo stadio di alterazione delle rocce originali e per la loro stessa natura sono costituiti da particelle molto fini; viene dunque agevolata la loro macinazione, che non risulta quindi particolarmente problematica.

I minerali argillosi possiedono una caratteristica unica tra tutti i silico – alluminati: contengono idrogeno, che legato all'ossigeno forma i gruppi O-H (gruppi ossidrilici). Quest'ultimo ha molte proprietà in comune con la molecola d'acqua H_2O e questo fatto li rende molto affini.

Le argille, infatti sono tutte fortemente igroscopiche, ovvero tendono ad assorbire e trattenere tenacemente l'acqua intorno ai cristalli, essa viene rilasciata solo in seguito a riscaldamento a temperature superiori a 100°C .

Questo comportamento conferisce al materiale la sua proprietà più importante e cioè la plasticità, ovvero la possibilità di plasmare l'argilla nella forma desiderata.

La famiglia dei minerali argillosi è davvero vastissima e spesso è difficile stabilire con certezza quali sono i minerali che costituiscono una argilla naturale.

Oltre a illite, clorite e talco, il minerale più frequente è la caolinite, il quale è il prodotto diretto dell'alterazione del feldspato ed è il costituente principale delle argille caolinitiche.

È caratterizzato da una percentuale molto alta di ossido di alluminio e di acqua e dalla totale assenza di alcali. Si tratta quindi di un minerale molto refrattario e molto plastico.

Data l'elevata quantità di acqua contenuta nella struttura cristallina, subisce forti variazioni dimensionali durante il riscaldamento.

CAPITOLO 2

LE TECNOLOGIE PRODUTTIVE CERAMICHE

2.1 EVOLUZIONE DELLE TECNOLOGIE PRODUTTIVE NEL SETTORE CERAMICO

A partire dalla fine della seconda guerra mondiale, il settore produttivo dei materiali ceramici tradizionali ha conosciuto uno sviluppo realmente forte.

È possibile parlare di una vera e propria "rivoluzione" produttiva e di mercato, indotta, da una parte, dall'incremento del mercato dell'edilizia residenziale ed industriale e, dall'altra, dagli sforzi continui per l'aumento dei livelli produttivi e qualitativi.

Ultimamente purtroppo, l'industria italiana della ceramica, incluso il segmento delle piastrelle, vive momenti di grande difficoltà, sia a causa della crisi del potere d'acquisto delle famiglie che per la competizione dei settori limitrofi, che per la crisi del settore edilizio.

L'unica notizia positiva è che la concorrenza proveniente dall'estero, soprattutto dalla Cina, è contenuta, e il prodotto italiano non solo è sufficiente a dominare il mercato interno ma anche a guadagnarsi una certa fetta di esportazioni.

A fronte di questo momento di crisi, l'industria ceramica ha risposto trasformando il processo produttivo, rendendolo sempre più meccanizzato, attraverso la razionalizzazione del lavoro e grazie all'applicazione di opportuni sistemi di automazione elettronica delle linee di produzione.

La conseguenza di tali operazioni di aggiornamento delle tecniche produttive sono stati le uniformità di produzione e la trasformazione del ruolo umano, risultato essenzialmente di supervisione e controllo di processi altamente automatizzati, se non, in alcuni casi, robotizzati.

Come è stato accennato, le piastrelle ceramiche hanno acquisito una diffusione particolare su scala mondiale non solo perché le materie prime sono più o meno reperibili in ogni parte del mondo e perché il processo di fabbricazione è considerabile relativamente semplice, ma soprattutto grazie all'affermarsi di tecnologie basate su macchine affidabili ed in grado di proporre prodotti di elevati standard qualitativi.

Oltre allo sviluppo della meccanizzazione e automazione dei processi, le associazioni di settore si sono trovate tutte d'accordo, anche nel puntare moltissimo sulla qualità e innovazione del prodotto, rispetto alle quali la concorrenza cinese non spaventa.

2.2 FORMULAZIONE DELL' IMPASTO

Le tecnologie di preparazione degli impasti e di formatura dei prodotti ceramici sono state sviluppate per sfruttare al meglio le caratteristiche di alcune famiglie di minerali che presentano le proprietà e la composizione chimica idonee alla realizzazione del prodotto ceramico finito che si intende sviluppare.

Le principali operazioni che compongono la prima fase produttiva sono:

- la formulazione dell' impasto,
- lo stoccaggio delle materie prime e la loro manipolazione,
- la prima macinazione (rottura delle zolle),
- la macinazione vera e propria,
- la regolazione del contenuto di acqua,
- eventuali altri trattamenti per conferire caratteristiche specifiche alle polveri.

Le famiglie di minerali adatte alla produzione di materiali ceramici tradizionali, precedentemente menzionate, si presentano spesso mescolate tra loro in miscele complesse, e sempre diverse da luogo a luogo.

La preparazione delle materie prime consiste dunque in una serie di operazioni finalizzate all' ottenimento di un materiale di composizione voluta ed omogenea (che viene definito con il termine impasto), con una distribuzione granulometrica e forma dei grani appropriata, e con un contenuto di acqua adatto al sistema prescelto.

La granulometria fine garantisce uno sviluppo della superficie specifica adeguato ai processi che si sviluppano durante l'essiccamento e la cottura; la forma dei grani e il grado di umidità sono di primaria importanza per ottenere un semilavorato pressato uniformemente e affinché si possa procedere senza inconvenienti nelle successive fasi del processo produttivo.

Se una sola materia prima è in grado di fornire tutte le sostanze richieste nelle proporzioni volute, l'impasto viene detto "naturale" (maiolica di Sassuolo, gres rosso), mentre nel caso che concorrano più materie prime si parla di impasto "artificiale".

Normalmente si ricorre ad impasti di questo tipo.

La loro formulazione è quindi oggi una fase importantissima nel processo ceramico. Appare piuttosto evidente che la composizione dell'impasto dipende primariamente dalla tipologia del prodotto ed è necessario tenere conto anche della disponibilità di materie prime locali (sempre più valorizzate al fine di ottenere prodotti "km zero"); perciò le composizioni effettivamente usate variano a seconda della zona di produzione.

GRES PORCELLANATO

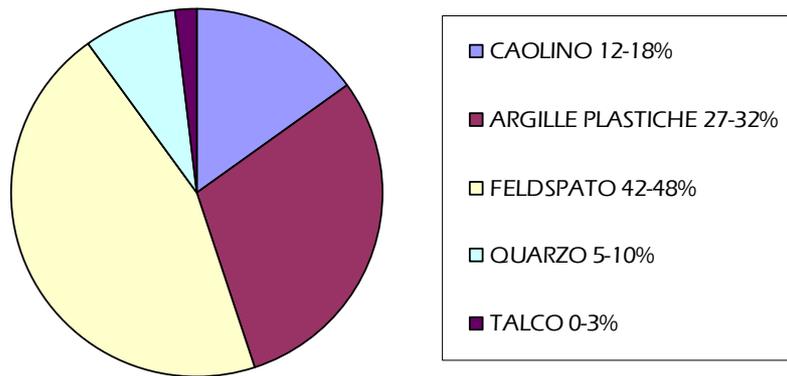


Fig.2.1: Composizione tipica del gres porcellanato.

Come mostra l'esempio vengono impiegati componenti aventi consistenza, durezza e resistenza meccanica notevolmente diverse tra loro.

Per quanto riguarda la frantumazione, queste differenze risultano essere di fondamentale importanza; per semplificare possiamo schematizzare l'impasto come un insieme di materiali teneri –materiali con durezza inferiore alla calcite (argille e simili) - e materiali duri – quelli con durezza superiore alla calcite (feldspati, silice, ecc).

2.3 LA MACINAZIONE

SCOPI

Quando si parla di macinazione vengono inclusi diversi obiettivi, tra cui:

- comminuzione, per il quale si intende tutta una serie di operazioni tendenti alla riduzione delle dimensioni dei materiali che vanno dalla prefrantumazione grossolana fino alla polverizzazione spinta;
- produzione di materiale con un determinato diametro medio delle particelle ed una distribuzione granulometrica adeguata per il prodotto che si vuole ottenere.

In generale gli scopi finali del processo di riduzione delle dimensioni dei solidi sono svariati, ma si può affermare che l'aumento della superficie specifica dei materiali permette il conseguimento di elevate omogeneità delle masse, ed l'ottenimento successivo di reazioni chimiche più velocemente.

PROPRIETA' DEI SOLIDI

Alcuni fattori e proprietà dei materiali influenzano in notevole misura l'efficienza della macinazione, i più importanti sono: dimensioni lineari della particella, dimensioni della superficie esterna, durezza, resistenza alla compressione, struttura del materiale, peso specifico, umidità, tendenza all'agglomerazione.

Tra tutte è il caso di approfondire l'importanza della superficie specifica, che risulta dal rapporto della superficie esterna e il volume reale della particella stessa.

La sua importanza nella polvere che si ottiene in macinazione è da ridurre al fatto che le reazioni chimiche e fisiche che riguardano il processo ceramico e che avvengono in cottura sono principalmente reazioni di superficie, nel senso che hanno luogo primariamente sulla superficie di contatto fra i grani.

Pertanto se la polvere ha un elevato valore di superficie specifica, le reazioni interessano un'area più ampia e si completano in tempi più brevi.

Dall'esperienza risulta che per ogni sostanza, quando la particella assume dimensioni inferiori ad un valore caratteristico, il difetto sul prodotto finito scompare, o per lo meno non è più visibile.

Esiste quindi una dimensione limite al di sotto del quale non conviene scendere poiché non si ottiene alcun ulteriore beneficio qualitativo, indicativamente viene assunta intorno ai 100 micron. Il valore preciso rimane comunque dipendente dalla natura chimica della sostanza, dalla composizione dell'impasto e dalle caratteristiche che si richiedono al prodotto finito.

AZIONI SVILUPPATE NELLA MACINAZIONE

La tecnologia attuale offre la possibilità di frantumare i materiali applicando diversi principi.

La maggior parte delle sostanze solide si presenta sotto forma di agglomerati di cristalli di dimensioni variabili, incollati tra loro a formare particelle di maggiori dimensioni.

La rottura di queste di queste congiunzioni richiede ovviamente una certa quantità di energia, che può essere considerata proporzionale all'estensione della superficie della frattura.

La frantumazione può avvenire per via meccanica (per urto/percussione, schiacciamento, taglio) o per via chimico- fisica.

- Per urto/ percussione: la frantumazione avviene in diversi modi, urto diretto tra particelle e corpi macinanti e tra le particelle, oppure percussione (urto indiretto) dell'organo della macchina sul materiale.

- Per schiacciamento: la frantumazione avviene per effetto della distribuzione delle tensioni che si vengono a generare nel corpo da frantumare a seguito dello schiacciamento (compressione) cui viene assoggettato.
- Per taglio: la frantumazione avviene a causa dell'azione meccanica dovuta alla generazione di sforzi di taglio nell'interno delle particelle.
- Azione chimico - fisica: la riduzione delle dimensioni delle particelle avviene per azione dissolutiva esercitata da una sostanza sul corpo da frammentare.

L'opera di comminazione può essere suddivisa in due fasi principali:

- frantumazione, il cui campo di applicazione si estende dai blocchi grossolani di materiale di cava sino a dimensioni dell'ordine di qualche millimetro. Solitamente questa fase viene eseguita subito dopo l'estrazione dalla cava, le materie prime giungono quindi già frantumate alle aziende ceramiche, pronte per la macinazione.
- macinazione, il cui campo di applicazione si estende sino a dimensioni microniche. Distinguiamo la macinazione primaria, sino a 0,5 mm da quella fine (decine di micron), dalla finale micronizzazione (qualche micron).

LA MISCELAZIONE

Appare chiaro quanto sia necessario effettuare una miscelazione di più materiali per ottenere l'impasto adatto, ciò deve quindi risultare la più omogenea possibile.

Le materie prime vengono dunque caricate in tramogge allineate (una per ogni materiale differente) e dosate rispettando le volute percentuali dei vari componenti; si ricorre dunque a dosatori veri e propri.

Ne esiste una vasta gamma, i più comuni sono costituiti da un nastro pesatore, controllato elettronicamente, che rileva in ogni istante, o ad intervalli molto brevi, la quantità di materiale presente su zone predefinite del nastro di trasporto.

Il dispositivo di controllo verifica che la quantità presente corrisponda a quella voluta, qualora così non fosse, esso comanda l'apertura o la chiusura del dispositivo di caricamento (tramoggia di stoccaggio) in modo da ripristinare il valore desiderato.

Attraverso l'elettronica e l'informatica si ottengono macchinari che permettono facile programmabilità e ripetibilità nel tempo, e quindi un'elevata flessibilità.

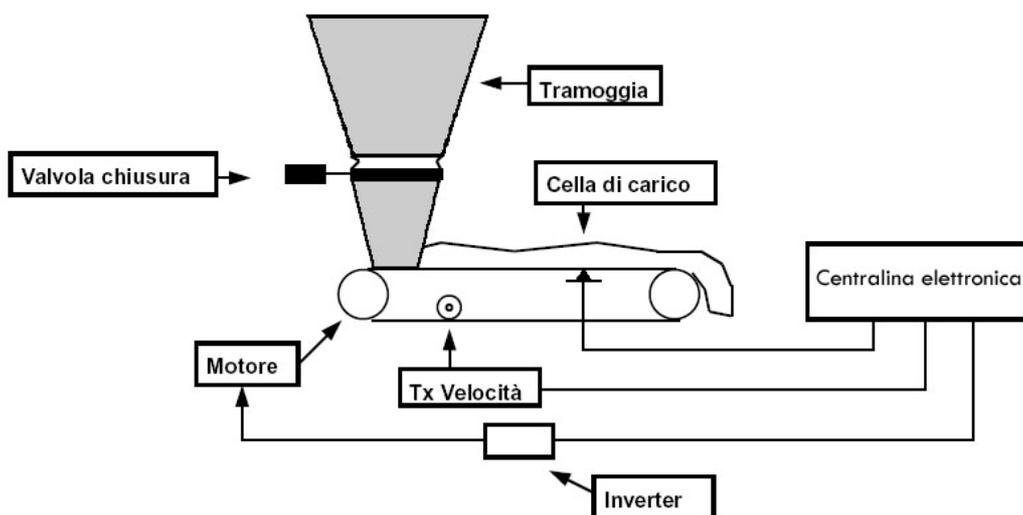


Fig.2.2: Schema di funzionamento di un impianto dosatore e nastri pesatori.

TECNICHE DI MACINAZIONE

La macinazione delle materie prime può essere eseguita per via secca o con una tecnologia ad umido. In linea generale la macinazione ad umido viene scelta nella maggior parte dei casi perché permette una riduzione granulometrica molto spinta dei materiali e una migliore omogeneizzazione, mentre la tecnologia a secco può essere utilizzata quando si dispone di materie prime molto omogenee sotto il profilo morfologico e della durezza o quando si devono produrre materiali di qualità non eccessivamente elevata.

MACINAZIONE A SECCO

Sebbene sia una tecnica sempre più in disuso nell'industria ceramica, è bene farne almeno un accenno per mettere in luce le maggiori differenze rispetto all'alternativa a umido.

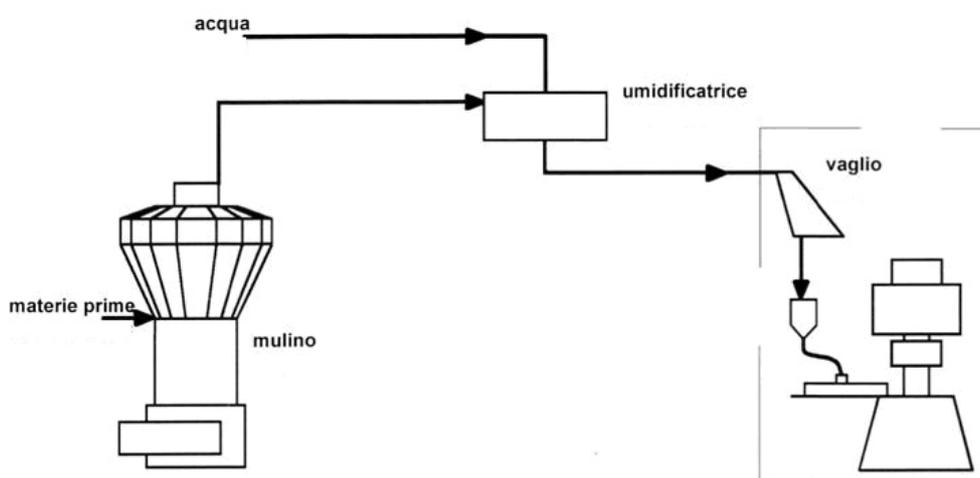


Fig.2.3: Schema del processo a secco.

Il processo a secco di tipo tradizionale consiste nella macinazione a secco (cioè con umidità inferiore al 2%) delle materie prime e nella successiva umidificazione delle polveri macinate, mediante apposite bagnatrici.

Questo procedimento viene adottato quando si impiegano argille direttamente estratte dalla cava con valori di umidità contenuti e che richiedono poche aggiunte di altri componenti.

Si utilizza prevalentemente il principio dello schiacciamento, accompagnato dalla presenza di sforzi di taglio; il dispositivo classico a cui si ricollegano i mulini utilizzati è rappresentato dal principio della cosiddetta molazza.

Una coppia di queste ultime affiancate sono sostenute da due perni orizzontali, fissati sul corpo centrale che gira attorno al proprio asse verticale, mentre le molazze, appoggiate sul piano su cui avviene la macinazione, ruotano attorno al proprio asse, coincidente con quello dei perni.

Trattandosi di mulini continui la durata dell'azione macinante su ogni particella dipende dalla dimensione raggiunta: quando essa è sufficientemente fine, può uscire dal mulino attraverso un sistema vagliatore, in caso contrario viene reintrodotta nel corpo del mulino per continuare la frantumazione.

Per quanto riguarda i mulini finitori, essi possono essere suddivisi in base alla metodologia di separazione fra il materiale macinato che ha raggiunto il grado di finezza e quello che non lo ha ancora raggiunto (separazione per gravità o tramite corrente di aria che si muove dal basso verso l'alto).

Questo processo porta ad una grandissima varietà di tagli granulometrici tra le particelle presenti nell'impasto, spesso non di forma tondeggianti bensì sotto forma di scaglie; tutto ciò abbassa il grado di compattazione durante la pressatura e quindi il raggiungimento di densità, resistenza e qualità inferiori.

MACINAZIONE A UMIDO

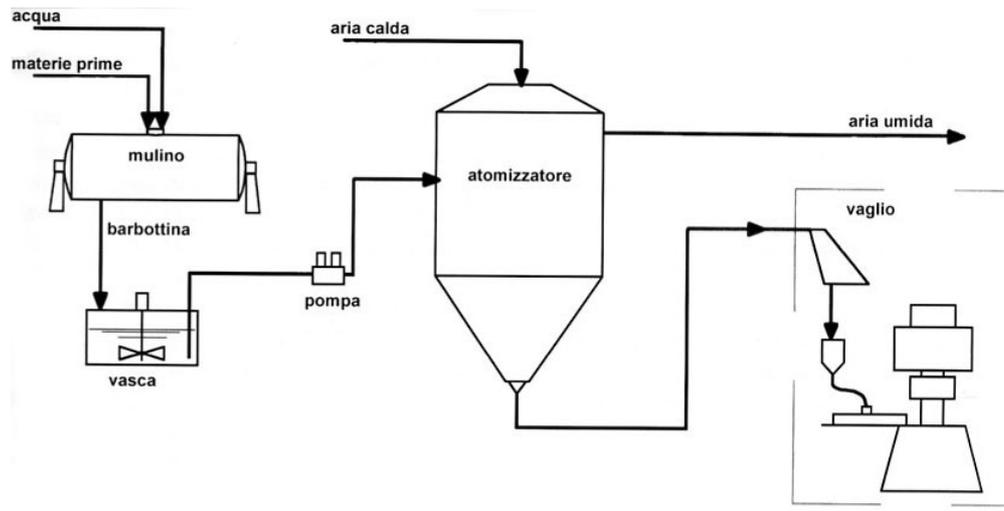


Fig.2.4: Schema del processo a umido.

Questo processo, seguito dal processo di essiccamento a spruzzo della barbottina, si è affermato nel tempo soprattutto perché consentiva di risolvere i problemi tecnologici della macinazione a secco tradizionale.

In processo ad umido, infatti, permette:

- di omogeneizzare un ampio spettro di materie prime, macinandole finemente;
- di ottenere polveri molto scorrevoli che assicurano un buon riempimento delle cavità dello stampo;
- di eliminare, o ridurre a dimensioni ininfluenti, eventuali impurezze contenute nelle materie prime usate.

Si ottiene quindi, una qualità molto elevata sia in termini di scorrevolezza che di compattabilità in pressatura.

Come mostra anche la fig. 2.4, il ciclo operativo consiste in:

- immergere in un mulino a palle le materie prime da macinare (impasto previsto), insieme ad una predefinita percentuale di acqua;
- immagazzinare in una vasca munita di agitatore, la sospensione liquida ottenuta al termine della macinazione (barbottina);
- convogliare la barbottina in un atomizzatore, dove sotto forma di minute goccioline, incontra una corrente di aria calda che fa evaporare l'acqua usata nella macinazione. Si ottiene così una polvere che può essere inviata alla pressatura.

Esistono due tipi di tecnologie per attuare la macinazione a umido: mulini discontinui (Alsing) e continui. Nei primi le fasi di riempimento, macinazione e scarico avvengono una dopo l'altra in tempi diversi e quindi durante il carico e lo scarico il mulino non

può macinare; nei secondi le tre fasi vengono svolte contemporaneamente e cioè tutto mentre il mulino ruota.

Tra i due tipi è ormai più diffuso il secondo, proprio perché è frutto della continua ricerca che ha permesso la messa a punto di sistemi precisi e molto affidabili nel tempo; tuttavia è necessario anche un breve accenno sulla prima categoria in quanto rappresentano il punto di partenza.

Dal punto di vista impiantistico il mulino a tamburo (o mulino Alsing o a palle) è costituito da un cilindro cavo di acciaio, disposto con l'asse orizzontale e chiuso alle estremità da fondi, rivestito internamente in materiali di natura opportuna (silice, allumina, gomma), che ruota attorno al proprio asse.

Il movimento del mulino è azionato da un motore elettrico munito di giunto idraulico che ne permette l'avviamento dolce, la trasmissione è assicurata da un certo numero di cinghie trapezoidali.

All'interno sono contenuti i corpi macinanti, costituiti normalmente da sfere di materiale ceramico o ciottoli di silice, che per effetto della rotazione del mulino, si rimescolano con urti e strisciamenti fra loro.

Per quanto riguarda invece la macinazione ad umido continua, dal punto di vista tecnologico i vantaggi più immediati sulla qualità del prodotto sono:

- maggiore costanza delle caratteristiche della barbottina, grazie ad una gestione automatizzata delle portate dei diversi materiali (materie prime, acqua, deflocculante⁶);
- possibilità di ottenere una barbottina con un minore contenuto di acqua, grazie al movimento continuo e al fatto che esce calda;
- maggiore efficienza dell'azione dei corpi macinanti, grazie all'ottimizzazione dell'assortimento dimensionale dei corpi nelle diverse camere;
- tempi di macinazione drasticamente ridotti, eliminazione dei tempi improduttivi necessari per le operazioni di carico e scarico
- migliori caratteristiche reologiche della barbottina, agevolazione della setacciatura;
- sostituzione dei corpi macinanti con frequenze inferiori, questo è uno dei fattori che porta ad un incremento della resa quantitativa.

Il mulino continuo è costituito da una struttura cilindrica in lamiera d'acciaio con boccaporti per l'ispezione, la manutenzione e l'alimentazione dei corpi macinanti, con

⁶ Deflocculante: Composto chimico che impedisce la flocculazione delle sostanze colloidali, cioè il processo di agglomerazione delle particelle di dimensioni ridotte di un precipitato in fiocchi che si depositano con facilità. L'aggiunta di una sostanza deflocculante ne aumenta la stabilità.

fondi dotati di bocche per l'alimentazione e lo scarico in continuo del materiale, un gruppo di motorizzazione, una serie di impianti per la lubrificazione degli organi di movimento, un quadro elettrico a PLC.

Il mulino è suddiviso in due o tre camere mediante setti, costituiti da griglie di forma tale da lasciare passare la barbotina e trattenere le biglie di dimensioni maggiori di un valore prefissato. Nelle camere sono alloggiati i corpi macinanti; la miscela entra da un lato ed esce macinata dall'altro.

Nella prima camera, vicino all'ingresso, sono alloggiati corpi macinanti di grandi dimensioni, che sono particolarmente indicati per frantumare grani grossi. Nelle camere adiacenti sono contenuti corpi macinanti a dimensioni sempre più piccole. L'impianto si presenta di dimensioni molto grandi, e se confrontato con quelli tradizionali presenta un maggior consumo specifico di energia elettrica, dovuto alla maggior complessità impiantistica derivante dall'automatizzazione delle operazioni continue di carico e scarico.

L'impianto è normalmente costituito da: sistema di pesatura e dosaggio in continuo automatico e computerizzato, un silo di precarica, un mulino cilindrico, come quello appena descritto.

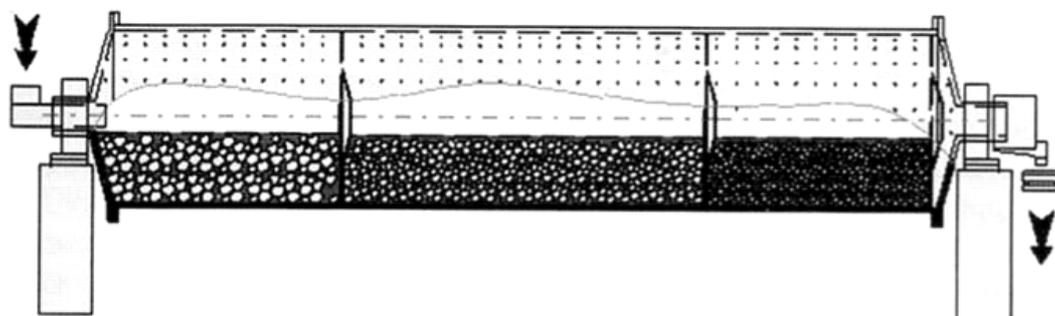


Fig.2.5: Rappresentazione schematica di sezioni di un mulino continuo.

A seconda della natura dei corpi macinanti e del rivestimento interno, si hanno differenti "coppie macinanti", con differente efficienza di macinazione e svariati effetti positivi e negativi.

Le coppie macinanti più frequenti (il primo termine si riferisce al rivestimento) sono allumina - allumina, allumina- silice, gomma- allumina, silice- silice, gomma- silice.

La scelta deve essere fatta in rapporto al tipo di impasto, alle caratteristiche del prodotto finito, al tipo di mulino utilizzato e ad altre valutazioni, per esempio riguardanti la facilità di manutenzione.

Nel caso di rivestimento in allumina, si sviluppa un attrito minore che comporta il raggiungimento di una temperatura minore e quindi meno usura; è comunque da

tenere in conto che il cambio del rivestimento richiede tempi lunghi e procedure piuttosto complesse.

Per quanto riguarda invece il rivestimento in gomma, viene sviluppato attrito più elevato, quindi temperature maggiori e ciò provoca una usura più veloce; la sua sostituzione è però molto più agevole e veloce.

Alla fine del processo di macinazione si ottiene una sospensione acquosa delle materie finemente macinate, detta barbottina ceramica, con contenuto variabile dal 30% al 40%, in funzione del tipo di materiale, densità compresa tra 1600 e 1800 g/l, e comportamento tissotropico.

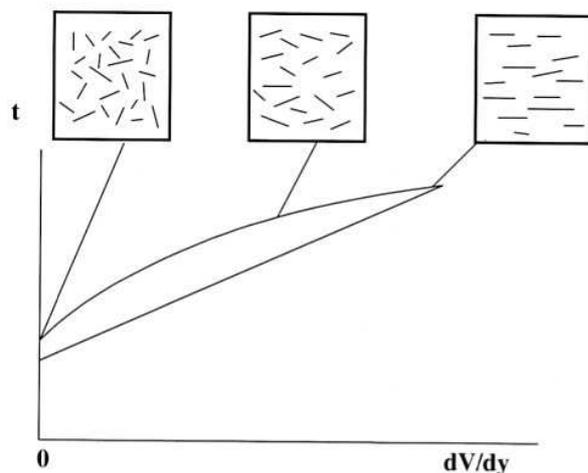


Fig.2.6: comportamento tissotropico di una barbottina. Quando il fluido non è in agitazione le parti solide (rappresentate dai bastoncini) sono disposti in modo casuale a formare come un reticolo che provoca una certa resistenza al moto. All'aumentare dell'agitazione, i bastoncini si orientano sempre di più riducendo la resistenza allo scorrimento. Al diminuire del gradiente di velocità essi non riprendono subito l'orientamento iniziale ma tendono a rimanere nelle configurazione assunta e ciò si manifesta con un minore valore di velocità apparente.

Per facilitare la sospensione delle particelle solide si ricorre spesso all'aggiunta al mulino di particolari additivi che impediscano la flocculazione (cioè l'aggregazione delle particelle e quindi facilita la loro sospensione nel fluido) ed aumenta la fluidità (cioè riduce la viscosità).

La barbottina così ottenuta è avviata ai vibro-setacci e successivamente alle vasche di stoccaggio, dove è tenuta in movimento da agitatori a pale.

2.4 L'ATOMIZZAZIONE

L'impasto sotto forma di barbottina non può essere utilizzato direttamente nella formatura a secco (pressatura), ma occorre un trattamento che ne limiti la quantità d'acqua a valori adatti alla lavorazione successiva.

La regolazione del contenuto d'acqua dell'impasto consiste in un'operazione di deumidificazione della barbottina che viene effettuata mediante processo d'essiccamento a spruzzo o atomizzazione, che ha sostituito molte fasi.

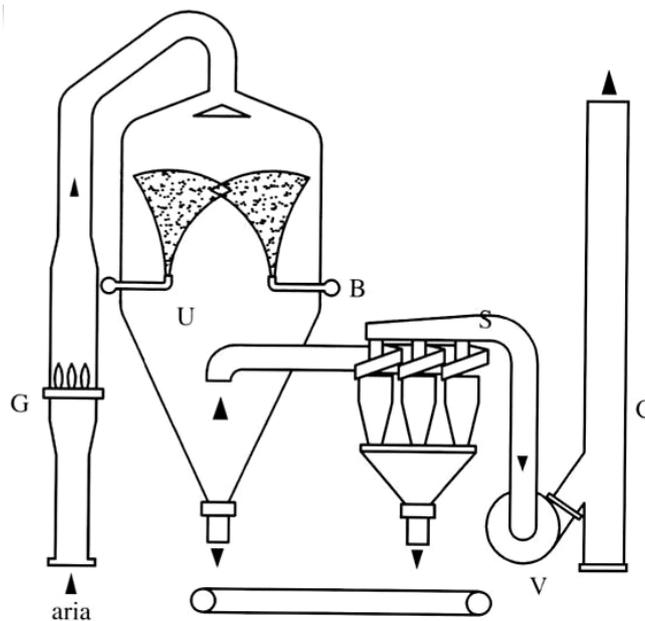


Fig.2.7: Schema del principio operativo dell'atomizzatore.

La barbottina viene iniettata ad alta pressione (25-30 bar) ed opportunamente nebulizzata all'interno di una camera di essiccamento (atomizzatore), ove viene a contatto con aria a 500-600°C proveniente da apposito generatore.

Ha quindi luogo un'evaporazione pressoché istantanea dell'acqua, dato l'elevato coefficiente di scambio termico dovuto al moto vorticoso e all'elevata superficie specifica delle gocce, e al notevole salto di temperatura tra aria e barbottina.

L'atomizzatore nelle sue configurazioni attuali è costituito da un grande cono rovesciato, con il vertice rivolto verso il basso, sormontato da un cilindro chiuso sull'estremità.

Dalla parte superiore (vedi fig. 2.7) entra aria calda proveniente da un apposito generatore (G). La barbottina viene prelevata dalle apposite vasche ove viene tenuta in agitazione continua e da qui inviata all'atomizzatore in modo continuo per mezzo dell'apposito circuito (B) munito di pompe che la mettono sotto pressione elevata (sui 30 bar), al fine di raggiungere una velocità d'efflusso che consenta poi la frantumazione in gocce.

All'interno dell'atomizzazione sono alloggiati degli ugelli (U), che nebulizzano la barbottina in arrivo, riducendola in gocce piccolissime che vengono lanciate verso l'alto, dove incontrano in controcorrente un flusso d'aria calda.

A seguito della progressiva evaporazione dell'acqua i componenti solidi contenuti inizialmente nella goccia tendono a formare grani che, avendo peso specifico

maggiore dell'aria, tendono a ricadere sul fondo dell'atomizzatore; la separazione dei grani di polvere dall'aria avviene quindi per gravità.

Sulla parte inferiore quindi, si raccoglie la polvere essiccata; l'aria ormai esausta (carica di umidità e a temperatura bassa) viene estratta in prossimità della parte inferiore e contiene una certa quantità di grani più fini, i quali vengono poi separati per mezzo di una batteria di cicloni e/o filtri (S).

I grani, contenenti ancora una certa umidità (5-6%), vengono a contatto con il fondo conico dell'atomizzatore e, a causa dell'inclinazione della parete, scorrono rotolando fino al punto centrale di raccolta, da cui escono attraverso l'apposito apparato.

Questo rotolamento contribuisce a rendere sferica la forma del grano che aveva già una forma arrotondata (derivando da una goccia). Per ottenere ciò è necessario che al momento del contatto il grano presenti una certa plasticità (deve contenere una certa quantità di acqua) ma non troppa, per evitare incrostazioni.

L'aria esausta carica di vapore acqueo viene poi avviata al camino (C) per mezzo di un ventilatore (V), per poi essere dispersa in atmosfera.

FORMAZIONE DEL GRANO

L'evaporazione che avviene sulla superficie esterna comporta una riduzione del volume della goccia, creando un arricchimento dei componenti solidi in prossimità della superficie esterna della goccia.

Attraverso gli spazi esistenti fra questi granelli l'acqua continua a giungere sulla superficie ed a evaporare; questo movimento e la successiva evaporazione producono un ispessimento della crosta, che riduce e ostacola la comunicazione tra interno ed esterno. La crosta esterna funge da scheletro su cui vanno ad aggregarsi le altre particelle, generando una cavità all'interno.

Come detto, la caduta del grano e il successivo rotolamento contro le pareti favoriscono il raggiungimento di una forma quasi sferica, che garantisce un'ottima scorrevolezza e quindi un buon riempimento dello stampo nella successiva fase di pressatura. Le dimensioni si aggirano nella fascia compresa tra 300 e 250 μm .

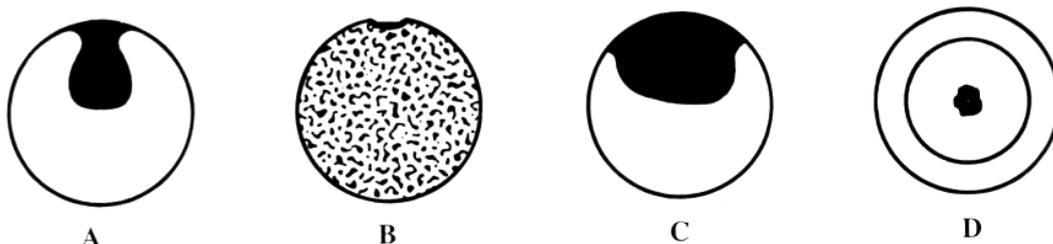


Fig.2.8: Forme tipiche dei grani atomizzati.

La forma tipica assunta dal grano in uscita è quella rappresentata in figura (lettera A); è caratterizzata da una forma esterna assimilabile ad una sfera con una cavità interna comunicante con l'esterno; qui si crea una depressione per effetto dell'evaporazione dell'acqua. Quando la depressione supera la resistenza della crosta, la zona più debole, cioè quella posteriore rispetto al senso del moto della goccia, ove il riscaldamento e l'evaporazione sono minori, cede e si schiaccia, dando origine alla forma rappresentata.

In taluni casi può accadere che la forma del grano non corrisponda a quella ottimale descritta.

Nella figura (B) è rappresentato un grano sferico ma privo della cavità tipica, con densità inferiore a quella voluta e molto secco.

Nella figura (C) invece è rappresentato il grano che si ottiene nel caso in cui il riscaldamento sia troppo rapido e nella parte interna si raggiunge una temperatura che provoca l'evaporazione dell'acqua nell'interno e quindi un aumento di volume fino allo scoppio del grano.

Infine nell'immagine (D) è rappresentato un grano che è stato sottoposto ancora una volta ad un riscaldamento troppo rapido, che però è portato ad un essiccamento della crosta esterna; la conseguente riduzione della porosità non permette la fuoriuscita dell'acqua dall'interno e ivi una eccessiva umidità.

2.5 FINITURA DELLE POLVERI

In questa parte sono riportate brevemente le lavorazioni complementari più importanti che vengono effettuate sulle polveri. La necessità di conferire al prodotto sempre maggiori caratteristiche tecniche ma anche estetiche ha fatto in modo di trasferire quest'ultima funzione sempre più alle polveri stesse piuttosto che al rivestimento di smalto, come accadeva in passato.

Quest'evoluzione ha generato nuove esigenze cui la tecnologia ceramica si è adeguata introducendo diversi sistemi di finitura, che possono essere ricondotti alle cosiddette operazioni di "colorazione" e "rigranulazione".

Le tecniche di colorazione sono normalmente applicate in combinazione con il processo a umido e viene ottenuta inserendo fra i componenti dell'impasto degli ossidi coloranti, che mantengono le loro proprietà estetiche anche dopo cottura.

Attualmente con queste tecniche è possibile riprodurre quasi tutti i colori del campo visibile.

È ovvia la necessità che l'impasto originario sia bianco o di colore molto chiaro, in modo da non contrastare o impedire l'azione colorante dell'ossido; bisogna inoltre tenere in conto anche la presenza di eventuali impurità, le quali attraverso reazioni con l'ossido, potrebbero contrastare l'azione colorante. Inoltre l'aggiunta di certi pigmenti, contenenti alte concentrazioni di alcuni tipi di ioni, ad esempio il calcio, può causare variazioni del comportamento reologico della barbottina (nel caso del calcio può comportare aumenti indesiderati della viscosità).

I metodi applicati in campo industriale per aggiungere i coloranti sono riconducibili ai seguenti modelli:

- colorazione al mulino: il colorante viene aggiunto al materiale da macinare al momento in cui lo si carica nel mulino, ottenendo pertanto una barbottina colorata.
- colorazione in vasca: il colorante disperso a concentrazione elevata in una sospensione argillosa, viene aggiunto alla barbottina nelle vasche di omogeneizzazione, dove essa viene raccolta prima dell'atomizzazione.
- colorazione in vena: il colorante, ancora una volta, viene iniettato per mezzo di dispositivi molto precisi nella barbottina poco prima della sua nebulizzazione.
- colorazione a secco: questo sistema consiste nel mescolare contemporaneamente, in quantità dosate, sia la polvere atomizzata che gli ossidi coloranti in polvere.

2.6 LA PRESSATURA

Dopo aver affrontato tutti gli aspetti tecnologici e produttivi inerenti alla preparazione degli impasti, passiamo all'analisi della formatura dei prodotti ceramici, in particolare delle piastrelle.

Per formatura si intendono quelle operazioni finalizzate a dare ai semilavorati una geometria propria ben definita; essa può avvenire attraverso diversi processi: formatura per colaggio, formatura a umido (es. estrusione), formatura a secco (es. pressatura).

La quasi totalità delle piastrelle è ottenuta con formatura a secco, utilizzando la pressatura per conferire al prodotto la sua forma desiderata.

I motivi di questa preferenza sono da ricercarsi nelle caratteristiche meccaniche ottenibili, nella maggior semplicità del ciclo tecnologico e nella convenienza economica.

Gli obiettivi principali da perseguire in questa fase sono:

- ottenere piastrelle di dimensioni prestabilite senza che le stesse evidenzino, né in crudo né in cotto, difetti che possono essere attribuiti a questa fase della lavorazione.
- contribuire a formare una microstruttura nella piastrella cruda tale da soddisfare caratteristiche meccaniche e fisiche idonee.

Per raggiungere tali obiettivi è necessario analizzare le caratteristiche delle polveri da pressare e quelle del ciclo di pressatura.

Tra le caratteristiche fisiche delle polveri risulta molto importante la densità, la quale è una caratteristica propria di ogni materiale; quelli usati negli impasti ceramici hanno valori intorno a $2,5 \text{ kg/dm}^3$, questa caratteristica deve essere riferita al volume realmente occupato dalla materia.

È evidente che, data la forma irregolare dei grani, tra essi rimangono degli interstizi occupati da aria.

Si indica come "volume apparente" il volume dello spazio occupato dall'insieme dei grani compresi gli interstizi, mentre per "volume reale" si intende la somma dei volumi dei singoli grani.

Poiché la densità dipende dal volume, è opportuno fare la stessa distinzione fra la densità del materiale e quella apparente, riferita al volume apparente.

Altri aspetti di rilievo sono la fluidità della polvere e la sua granulometria

Per comprendere la trasformazione provocata dalla pressatura si deve considerare che i componenti dell'impasto possono essere raggruppati in materiali plastici (che sotto carichi relativamente bassi si deformano), e quelli duri (che si rompono senza deformarsi). La riduzione del volume apparente avviene sostanzialmente per effetto dello scorrimento dei grani uno contro l'altro, della deformazione dei componenti plastici e della rottura dei vertici dei grani duri che provoca un grado di compattezza superiore.

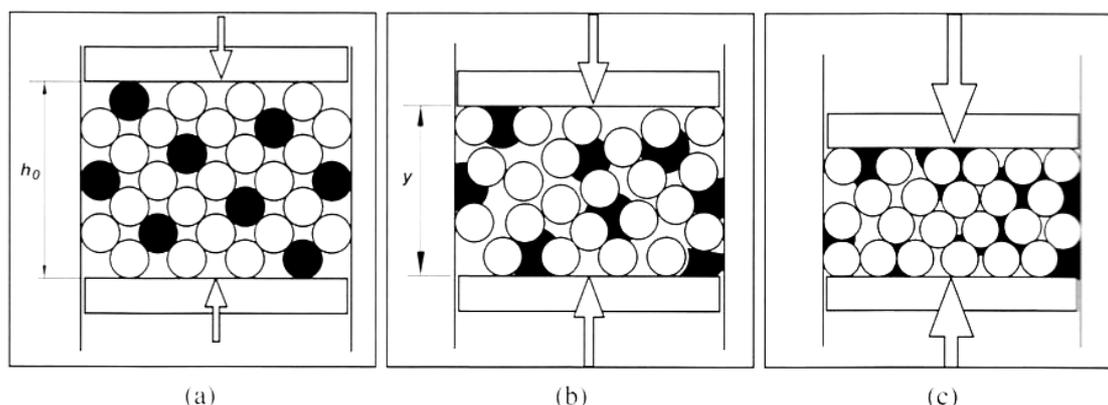


Fig. 2.9: Schema della pressatura delle polveri (grani duri di colore bianco, grani plastici di colore nero)

POTENZA DELLA PRESSA E PRESSIONE SPECIFICA

Le presse impiegate nella formatura a secco sono generalmente presse idrauliche, in cui la forza è generata da olio in pressione che agisce sul pistone del cilindro.

Il pistone la trasmette poi allo stampo, il quale a sua volta la trasmette alla polvere tramite la piastra e i tamponi; la pressione dell'olio idraulico viene così trasformata in pressione sulle piastrelle (pressione di formatura o pressione specifica esercitata sulla piastrella) e non coincide con la pressione idraulica presente sul pistone.

La compressione produce una compattezza del materiale, che si manifesta con un incremento della densità apparente nel prodotto formato.

La misura della densità apparente che risulta sul prodotto pressato ed umido (prodotto verde) rappresenta un valido mezzo per valutare il grado di compattezza, il quale è un fattore molto importante perché si correla con le caratteristiche che il prodotto ceramico presenterà al termine del ciclo produttivo (carichi di rottura sia in verde che in secco, che sinterizzato)

Inoltre ad un aumento della pressione specifica di formatura corrisponde anche una riduzione del valore del ritiro che si noterà nelle successive fasi del processo (essiccamento e cottura). Anche la sinterizzazione ad alta temperatura comporta una riduzione del volume degli interstizi fra le particelle dell'impasto; è intuibile che una maggior compattezza in fase di pressatura riduca il volume dei pori e quindi l'entità del ritiro.

Come già detto, la pressione specifica non ha una distribuzione uniforme fra i diversi alveoli dello stampo e nei punti dello stesso alveolo; il valore medio dipende dal valore su cui viene registrata la pressa.

Dovendo operare in condizioni che minimizzano le disuniformità nella pressione specifica e considerando anche molteplici fattori, la determinazione del valore ottimale della pressione specifica deve avvenire necessariamente per via sperimentale.

Da quanto esposto fino ad ora è evidente che maggiore è la pressione specifica migliore è la qualità del prodotto finito.

SISTEMI DI PRESSATURA

Il materiale da sottoporre a pressatura viene umidificato uniformemente al fine di conferire plasticità al sistema e facilitare quindi la coesione fra le diverse particelle

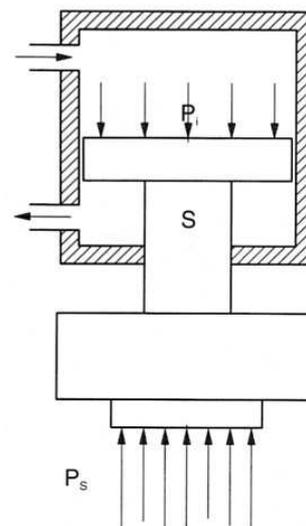


Fig. 2.10: relazione tra pressione idraulica e pressione specifica.

componenti l'insieme, in base alla percentuale d'acqua, la formatura può essere eseguita in diverse condizioni:

- allo stato plastico (percentuale d'acqua residua del 20- 25 %);
- allo stato semisecco (umidità residua nell'ordine del 10- 15%);
- allo stato secco e/o semisecco (umidità delle polveri dal 3 al 7%).

Oggigiorno nella produzione industriale con pressatura allo stato semisecco, sono impiegate presse idrauliche completamente automatizzate.

Queste ultime funzionano secondo un principio oleodinamico che utilizza l'azione di un fluido sotto pressione esercitata all'interno di un cilindro: quando la pressione esercitata da una sottile colonna di fluido viene messa in comunicazione con un cilindro munito di pistone e sezione molto maggiore, si ottiene un incremento di pressione.

Sul pistone si ottiene una forza totale il cui valore è tanto più grande, rispetto alla forza esercitata nel cilindro sottile, quanto più la sezione del cilindro grande supera quella del cilindro più piccolo.

Una centralina idraulica ha la funzione di fornire l'olio in pressione, che una volta introdotta nel cilindro di lavoro ha il compito di esercitare sul materiale la forza di compressione.

Nel corpo superiore della pressa è installato un gruppo cilindrico a semplice o a doppio effetto per trasmettere alla slitta gli spostamenti verticali e per esercitare al momento opportuno, la forza dell'alta pressione sui tamponi; in sintesi, l'azione di pressatura viene effettuata trasformando la pressione idraulica in forza di deformazione.

TIPI DI STAMPI

Gli stampi tradizionali usati per la formatura delle piastrelle si distinguono in base alle caratteristiche di funzionamento, in differenti tipologie quali stampi a punzoni rientranti, stampi a specchio e stampi isostatici. Nelle tecnologie odierne sono per lo più impiegati stampi isostatici, i quali permettono di ottimizzare la omogeneità di carico su tutta la superficie, e ciò ha notevolmente ridotto la difettologia.

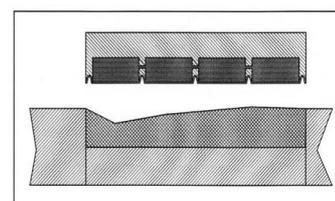


Fig. 6.a

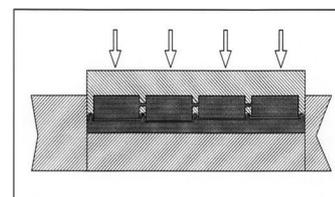


Fig. 6.b

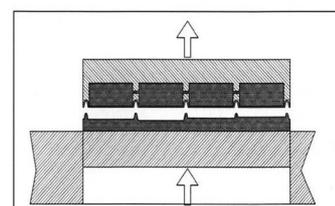


Fig. 2.11: Stampo isostatico – principio di funzionamento

L'azione di compressione viene esercitata da un tampone metallico rivestito da gomma vulcanizzata, nella quale sono ricavati piccoli incavi comunicanti tra loro e riempiti di olio idraulico. In questo modo la pressione specifica sulla polvere è esercitata da una membrana stesa su una camera piena di olio. Per l'equilibrio delle forze agenti sulla membrana durante la pressatura, la pressione dell'olio deve corrispondere al valore locale della pressione specifica esercitata sulla polvere.

FASI DELLA PRESSATURA

Il ciclo di pressatura si realizza in una sequenza ordinata di fasi rappresentata da:

- Caricamento degli alveoli: è il trasferimento delle polveri dalla tramoggia sottostante il silo di contenimento, alle cavità dello stampo per mezzo di un carrello dotato di una cavità a forma di parallelepipedo.
- La prima pressata: la traversa superiore scende, mossa dall'olio inviato nel cilindro, ed il tampone superiore inizia a penetrare nella cavità dello stampo. Quando il tampone superiore entra, esso dapprima espelle l'aria di questo spazio e poi inizia a comprimere la polvere; l'effetto di questa compressione è una parziale espulsione di aria contenuta nella polvere stessa ed una forzatura che avvicina i grani della polvere costringendoli a saldarsi tra loro.
- La disaerazione: al termine della prima pressata, la piastrina contiene ancora una quantità notevole d'aria al proprio interno, l'aria risulta soggetta ad una pressione notevole dell'ordine di 10 bar.

Nel momento in cui i tamponi superiori cessano di esercitare la pressione, si comanda una loro risalita di circa 2 mm e ciò fornisce all'aria in pressione dei percorsi laterali per la fuoriuscita dagli alveoli.

- La seconda pressata: si procede poi ad una ulteriore e rapida compressione; si riaprono le valvole di mandata dell'olio nella parte superiore del cilindro dove si raggiunge il valore massimo programmato di pressione.

La pressione massima (fino a 600 bar) deve essere mantenuta per una breve frazione di tempo per permettere al sistema di trasmettere la forza ai tamponi e da questi alle piastrelle che si sono formate all'interno della cavità.

I grani della polvere vengono forzati ad adattarsi gli uni agli altri, deformandosi leggermente per effetto della plasticità di alcuni componenti, derivante dall'umidità, e saldandosi reciprocamente.

Una parte dell'aria rimane intrappolata a valori di pressione elevati.

- Estrazione della piastrella: terminata la fase di pressatura, il ciclo prosegue con una risalita rapida della traversa superiore; quasi contemporaneamente viene attivato anche il sistema di sollevamento dei tamponi inferiori, che spingono la piastrella verso l'alto. Questa spinta provoca uno slittamento tra i bordi della piastrella e la superficie interna dello stampo, leggermente smussata per agevolare l'estrazione.

Sulla piastrella si presenta anche un fenomeno di espansione prodotto dall'aria compressa internamente.

Al termine dell'estrazione, il tampone inferiore si viene a trovare al livello superiore. L'allontanamento della piastrella dallo stampo viene eseguito durante la prima fase del ciclo successivo, quando il carrello si muoverà per eseguire il nuovo caricamento della polvere.

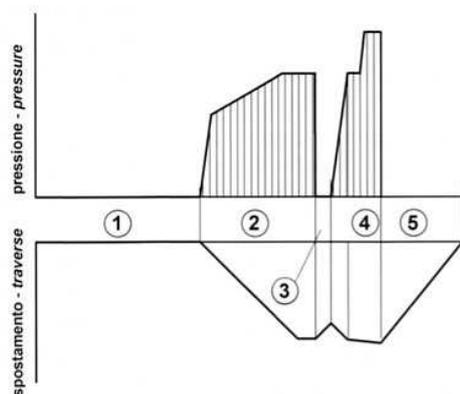


Fig. 2.12: Schema orientativo di ciclo di pressatura (diagrammi pressione + discesa/tempo)

2.7 L'ESSICCAZIONE

L'acqua, come tutte le sostanze liquide, ha una certa tendenza a passare allo stato di vapore, assorbendo energia.

Essenzialmente si può guardare all'essiccazione come ad un processo che avviene sotto il condizionamento di alcuni fattori, quali: il "potere essiccante" dell'ambiente, umidità relativa, velocità dell'aria, le forze che agiscono a livello capillare, le variazioni dimensionali dovute alla cessione di umidità.

Il processo di essiccazione, dunque, coinvolge sia il trasferimento di calore dall'ambiente circostante verso il corpo ceramico da essiccare, sia il simultaneo trasferimento di vapor d'acqua nella direzione opposta.

Il calore necessario per l'essiccazione viene più comunemente ricevuto dal pezzo per convezione, la quale si sviluppa nei seguenti stadi:

- trasferimento del calore dall'aria al pezzo;
- trasformazione dell'acqua da liquida a vapore;
- allontanamento del vapore dalla superficie del pezzo;

- trasporto di acqua allo stato liquido all'interno del pezzo alla superficie.

Quando la velocità di evaporazione alla superficie supera la capacità di trasferimento capillare dall'interno del pezzo, inizia un'ulteriore fase di essiccazione nel corso della quale il fronte di evaporazione si sposta verso l'interno del pezzo stesso.

ESSICCATOI AD ARIA CALDA

Lo stadio quindi che determina la velocità di essiccamento è la diffusione interna, capillare, dell'acqua.

All'inizio dell'essiccazione (ingresso essiccatoio) la sua temperatura interna è bassa e la diffusione è molto lenta, quindi occorre contenere la velocità di evaporazione per evitare di compattare lo strato superficiale; a tale proposito, negli essiccatoi convenzionali il materiale in ingresso viene messo in contatto con aria calda ma relativamente umida.

Il riscaldamento avviene per convezione fino all'interfaccia con il semilavorato, per conduzione all'interno di quest'ultimo, il quale solitamente presenta valori molto bassi della conducibilità termica.

La velocità di riscaldamento viene regolata tramite la temperatura dell'aria e la sua portata; il tempo necessario ad ottenere un riscaldamento uniforme dipende dallo spessore e dall'umidità del materiale.

Gli essiccatoi più utilizzati nel settore ceramico sono sia del tipo verticale che orizzontale; nonostante rimangano equivalenti i principi tecnologici di base inerenti l'essiccamento, la dinamica è differente, come lo sono le condizioni di lavoro della macchina e le condizioni fisiche dell'aria.

Essiccatoi verticali

Un essiccatoio verticale automatico è composto essenzialmente da una incastellatura verticale in cui si muovono, trascinati da due catene, dei cestelli composti da vari ripiani di rulli o da telai sui quali sono posizionate le piastrelle da essiccare.

Le piastrelle sono caricate automaticamente sui ripiani dei cestelli tramite la rotazione dei rulli che li compongono; il carico e lo scarico del materiale dal ripiano avvengono simultaneamente, senza urti tra le piastrelle.

L'essiccamento è realizzato tramite un flusso di aria calda, generato da ventilatori e bruciatori che, sfruttando lo scambio per convezione con le piastrelle, consente di ottenere un prodotto idoneo alle successive fasi di lavoro e quindi con bassa umidità, buona resistenza meccanica (circa il 70-80% della resistenza del prodotto cotto) e uniformità di temperatura.

La gestione delle condizioni di temperatura e umidità relativa dei flussi, è ottenuta con tre gruppi autonomi, che formano tre zone differenziate.

Nella prima zona (tratto ascendente dove entra il materiale) l'aria proveniente da un ventilatore e riscaldata dal generatore di calore, investe le piastrelle con moto parallelo alla loro superficie. L'aria dopo aver attraversato i cestelli, è aspirata attraverso la canalizzazione interna e ricircolata in gran parte del ventilatore, mentre una porzione viene espulsa. Nella seconda zona, percorso discendente delle piastrelle, si ha un circuito analogo al precedente, ma completamente indipendente da esso, in quanto realizzato con il secondo ventilatore, un bruciatore ed una propria serranda di aspirazione.

Un ulteriore ventilatore gestisce l'esercizio della zona di stabilizzazione, nella parte finale del ciclo di essiccamento.

Il ciclo di essiccamento normalmente porta ad investire subito le piastrelle con temperature elevate, mentre nella seconda zona, una temperatura più bassa e quindi più vicina a quella finale.

Si ottengono così la massima efficacia della stabilizzazione ed elevati valori di resistenza meccanica.

Essiccatoi orizzontali:

Vengono utilizzati nel caso dell'essiccamento di piastrelle formate con umidità residua molto bassa (4-7%).

Gli aspetti più rilevanti sono:

- la ventilazione deve risultare il più possibile con flusso parallelo alle facce del prodotto, rendendo omogeneo il riscaldamento e la sottrazione di vapore
- il ruolo fondamentale sulle velocità di evaporazione dell'aria d'essiccamento;
- l'influenza meno rilevante della velocità dell'aria e della sua umidità relativa sulla velocità di evaporazione dell'acqua.

Le piastrelle pressate passano, su uno più strati di rulli, attraverso un tunnel coibentato ed alimentato con aria calda prodotta da appositi bruciatori o recuperata dal camino dei forni.

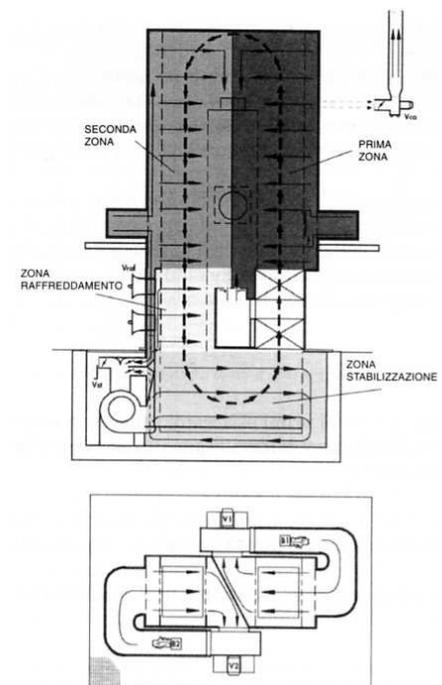


Fig. 2.13: Schema circolazione aria in essiccatoio verticale

2.8 APPLICAZIONE DEGLI SMALTI

L'operazione di smaltatura consiste nell'applicazione di un rivestimento vetroso sul supporto ceramico, allo scopo di rendere la superficie impermeabile o inassorbente, più dura e più resistente, più agevolmente pulibile, esteticamente più bella (per quanto concerne colore, brillantezza, decorazione ecc.).

Gli smalti vengono preparati grazie un apposito impianto provvisto di mulini macinatori, vasche con agitatori, pompe, vibrosetacci, bilance e sistemi di pesatura e i macchinari addetti alla sottrazione di impurità.

Gli smalti sono essenzialmente dei vetri e ne possiedono tutte le caratteristiche chimiche, fisiche e meccaniche.

Il componente fondamentale di uno smalto è rappresentato dalla cosiddetta fritta. Essa è un vetro silicatico ottenuto per fusione delle materie prime e successivi raffreddamento per colaggio in acqua, granulazione ed essiccazione (processo noto come frittaggio).

Per l'ottenimento degli smalti si utilizzano fritte di definite composizione e caratteristiche, in funzione degli effetti che si intende raggiungere, a cui vengono generalmente aggiunti altri componenti (minerali argillosi, pigmenti, opacizzanti, ossidi o composti inorganici in genere, ecc...); il tutto viene macinato e miscelato insieme all'acqua.

Gli smalti vengono applicati, nella maggior parte dei casi, nella forma di sospensione acquosa, con diverse tecniche.

Possono essere applicati su piastrelle crude (monocottura) o cotte (bicottura); la prima tecnica è sempre più diffusa, grazie alla possibilità di automazione, anche se è fortemente condizionata dalla resistenza meccanica in crudo del pressato, che deve essere sufficiente per sopportare senza danni applicazioni e decorazioni multiple.

LINEE DI SMALTATURA

L'applicazione dello smalto sulla superficie del pezzo ceramico avviene mediante un trattamento termico nel corso del quale lo smalto rammollisce, assumendo via via un'adeguata fluidità, onde assicurare una buona stesura, un completo e uniforme ricoprimento della superficie, un buon ancoraggio al supporto, nonché la possibilità di evoluzione dei gas e dei vapori sviluppatasi in cottura dal supporto o dallo smalto stesso.

In generale una linea di smaltatura è composta da un trasportatore a cinghie, delimitato agli estremi da un dispositivo di alimentazione di ingresso e uno di raccolta in uscita, lungo il quale sono disposte le macchine applicative.

Esistono vari dispositivi, ciascuno sfrutta tecniche diverse di applicazione (applicazione a campana, con iniezione pressurizzata, a gocce, attraverso nebulizzatore, ecc.).

Prima dello smalto, è utile l'applicazione di una composizione terrosa vetrificante (ingobbio) per evitare il contatto con lo smalto di sostanze inquinanti presenti nel supporto.

Negli ultimi anni sta sempre più prendendo piede una nuova tecnica che prevede la stampa del motivo decorativo sulla piastrella, in sostituzione del classico smalto.

Facendo passare i supporti ceramici sotto una apposita stampante a getto di inchiostro per ceramiche è possibile ottenere effetti impensabili, ad esempio l'effetto legno.

2.9 COTTURA

La cottura è l'operazione fondamentale del processo tecnologico in quanto da' origine al materiale ceramico trasformando le materie prime dell'impasto in nuovi composti cristallini e vetrosi che conferiscono al cotto particolari proprietà: la insolubilità e la solidità che garantiscono il mantenimento della forma, la resistenza meccanica, la porosità o la impermeabilità, la resistenza chimica, ecc..

Per quanto riguarda il rivestimento vetroso (smalto), la cottura ne provoca la fusione, la formazione di uno strato continuo vetrificato, ben ancorato e compenetrato col supporto, con particolari proprietà chimiche e fisiche e con determinate caratteristiche estetiche.

La cottura consiste nel trasferire energia al manufatto essiccato fino ad una data temperatura e per un tempo determinato, in modo che possano avvenire trasformazioni chimiche e fisiche che portano l'impasto e lo smalto ad acquisire le proprietà richieste.

Le apparecchiature oggi disponibili permettono di riprodurre in modo sempre più preciso le condizioni operative, realizzando delle cotture estremamente controllate.

LE TRASFORMAZIONI CHE AVVENGONO IN COTTURA

Il riscaldamento provoca la dilatazione dei manufatti, a causa dell'aumento dell'ampiezza delle vibrazioni degli atomi che li compongono; l'entità di questo fenomeno è legata alla natura chimica del materiale, alla sua struttura cristallina o vetroso e alle loro quantità relative.

Nel corso della cottura le materie prime subiscono trasformazioni che provocano la scomparsa di certi composti e la formazione di nuovi; si possono individuare zone termiche critiche, a causa delle reazioni di tipo chimico che possono avvenire.

TEMPERATURA	REAZIONI	EFFETTI
fino a poco oltre i 100°C	Eliminazione dell'umidità residua dopo un non perfetto essiccamento o assorbita in fase di smaltatura.	
Fino a 200°C	Eliminazione dell'acqua di cristallizzazione, le cui molecole sono legate alle strutture cristalline	
Fra 350°C e 850°C	Combustione delle sostanze organiche contenute nelle argille	Liberazione di anidride carbonica.
Fra 450°C e 650°C	Eliminazione dell'acqua di costituzione (deossidrilazione)	Distruzione del reticolo cristallino argilloso, ritiro.
A 573°C	Trasformazione allotropica del quarzo α in quarzo β .	Brusco aumento di volume durante il riscaldamento e contrazione durante il raffreddamento.
Da 900°C	Formazione di nuove fasi cristalline costituite da silicati e silico alluminati che conferiscono le caratteristiche fisico-meccaniche. Dissociazione dei sali presenti (solfati, fluoruri).	Aumento di volume che permane anche dopo il raffreddamento
Da 1000°C in su	Evaporazione di alcuni componenti degli impasti quali ossidi alcalini, ossido di piombo, di zinco, anidride borica.	Formazione della fase liquida grazie alla presenza dei feldspati, formazione di mullite

Una delle trasformazioni più importanti è la fusione dei fondenti e cioè dei feldspati ricchi di elementi alcalini; la fusione di queste miscele eutettiche permette di ottenere una fase liquida a temperature più basse di quelle necessarie a fondere i singoli materiali.

L'azione di fusione contrasta quella espansiva e provoca in successione una serie di trasformazioni correlate tra loro: diminuzione della porosità, aumento della densità, reazioni solido- solido e solido-liquido, ritiro, incremento delle proprietà tecnologiche. La fase liquida è inizialmente molto viscosa e ciò garantisce una certa tenuta della forma, poi la viscosità diminuisce con l'aumentare della temperatura più velocemente per le composizioni sodiche , più lentamente per quelle potassiche.

Si verifica un graduale rammollimento dell'insieme e una progressione di alcuni fenomeni legati alla fase liquida: infiltrazione del liquido nelle cavità, soluzione dei

granuli, diffusione del materiale disciolto nel resto della fase liquida, cristallizzazione del soluto una volta raggiunta la saturazione. Contemporaneamente aumentano anche gli inconvenienti legati alla riduzione della viscosità: difficile controllo della curva di greificazione ed alla possibilità di difetti di planarità dovuti alla non omogenea superficie di appoggio della piastrella.

Infine, raggiunta la saturazione del liquido, si separano cristalli aghiformi di mullite, (silicato di alluminio) che intrecciandosi tra loro nella matrice vetrosa, formano una struttura di notevole resistenza meccanica.

CURVE DI GREIFICAZIONE

Le curve di greificazione mostrano l'andamento del ritiro e dell'assorbimento di acqua in funzione della temperatura che si raggiunge in cottura.

Nel caso di prodotti poco porosi contenenti materie prime con fondenti feldspatici, come nel caso del gres porcellanato, a partire da 800°C si nota un progressivo aumento della compattazione, concomitante la comparsa di una fase liquida, di adeguata viscosità, sempre abbondante.

Queste fasi liquide favoriscono gradatamente la densificazione del materiale; alla progressiva e regolare vetrificazione si accompagna un ritiro dimensionale che aumenta con la temperatura fino ad un massimo, per poi diminuire.

La temperatura di cottura viene scelta in modo da raggiungere valori sufficientemente bassi dell'assorbimento d'acqua e normalmente corrisponde anche al massimo ritiro lineare percentuale.

Per ottenere condizioni ottimali di cottura si cerca di avere andamenti in cui si hanno tratti piani più estesi possibili, che prevedono quindi una certa stabilità alle temperature più elevate (no elevate e brusche variazioni della percentuale di ritiro). E' indispensabile che gli impasti utilizzati nelle produzioni industriali non presentino picchi o forti pendenze nel tratto centrale della curva perché le temperature che si raggiungono nei forni industriali non sono sempre costanti e quantificabili esattamente ma potrebbero essere sottoposte a oscillazioni dovute a mal funzionamento del macchinario o variabili dipendenti dalla quantità di piastrelle che vi transitano.

Avviare la produzione di piastrelle il cui il impasto preveda un intervallo di temperatura di stabilità dimensionale troppo ridotto, implicherebbe rischi elevati (le piastrelle fuori misura devono essere scartate) e l'impossibilità di tenere sotto controllo le dimensioni in cottura.

Il grafico si ottiene cuocendo i provini in un apposito forno a gradienti, descritto più dettagliatamente nei capitoli successivi.

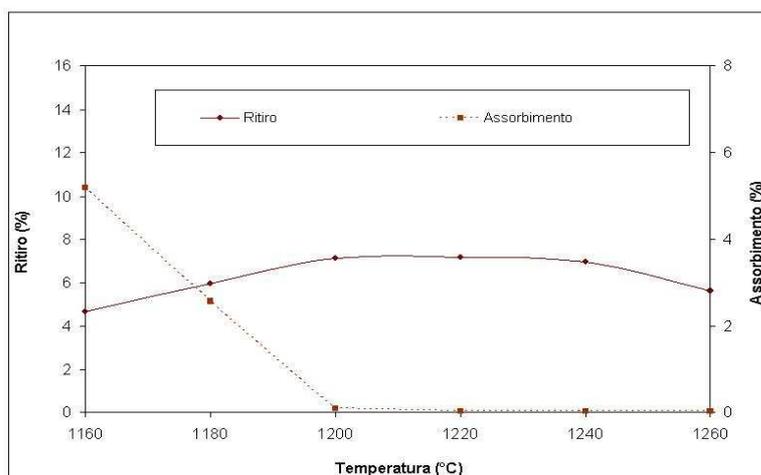


Fig. 2.14 : Modello di curva di greificazione del gres Porcellanato.

CICLO DI COTTURA

La successione dei valori di temperatura cui viene sottoposto un manufatto durante la cottura ed i tempi che ne regolano la crescita, costituiscono il ciclo termico della cottura. Un ciclo si compone, nel processo ceramico, di almeno tre fasi:

- 1) innalzamento della temperatura dal valore ambientale fino ad un valore massimo, riconosciuto sperimentalmente come ottimale per il conseguimento delle proprietà prefissate;
- 2) tempo di permanenza alla massima temperatura; questo dipende dalle dimensioni del manufatto e del forno;
- 3) diminuzione della temperatura fino ai valori ambientali, tenendo conto della sensibilità del corpo ceramico ai gradienti termici.

Per impostare correttamente il ciclo termico (curva temperatura- tempo) di una cottura, è quindi importante la conoscenza dei fenomeni che avvengono e delle temperature a cui si verificano.

FORNI PER LA COTTURA DELLA CERAMICA

Il forno è l'apparecchiatura per mezzo della quale si effettua la cottura; durante le varie fasi si attuano tra la sorgente di calore, i fluidi presenti, le strutture del forno, le piastrelle da cuocere e l'ambiente circostante, scambi termici per lo più convettivi e per mezzo dell'irraggiamento nelle zone ad alta temperatura.

Attualmente i forni più diffusi per la produzione di piastrelle ceramiche sono quelli monostrato, ove il materiale da cuocere, variamente movimentato, passa in un unico strato attraverso la struttura del forno.

Il materiale crudo avanza nel forno, incontrando settori sempre più caldi (zona di preriscaldamento), sino a raggiungere la temperatura massima (zona di cottura) che si estende per un certo tratto; il materiale continua il suo spostamento incontrando una zona di improvviso e forte raffreddamento, che viene di seguito leggermente addolcito e poi ripreso in maniera turbolenta sino all'uscita dal forno, a temperatura compresa tra 40°C e 60°C.

La velocità di avanzamento del materiale è generalmente costante.

Il riscaldamento viene garantito dai combustibili gassosi (metano o GPL) che vengono bruciati direttamente in camera di combustione per essere poi espulsi come fumi all'interno del forno, dove transitano le piastrelle.

Il corpo del forno monostrato, con trasporto del materiale su rulli, si compone normalmente di moduli di circa 2 metri, affiancati; costituita da telai tubolari e profilati metallici portanti e da una struttura muraria isolante, in mattoni e malte refrattarie.

In genere si realizzano, per la produzione massiva, forni da 60 a 120 m di lunghezza, suddivisi approssimativamente in:

- Preforno (10% della lunghezza totale): zona di entrata delle piastrelle, destinata all'eliminazione dell'acqua residua dopo l'essiccazione e la smaltatura e all'acqua zeolitica delle argille.

È interessato al campo di temperatura 200- 500°C, ma tenendo conto dell'evaporazione, il materiale presenta una temperatura di 50- 200°C. Non è dotato di attrezzatura autonoma di riscaldamento, cui provvedono i fumi in controcorrente provenienti dalla cottura, aspirati da un ventilatore.

- Preriscaldamento (31%): stadio del processo dedicato alla degassazione, indispensabile perché non si producano poi, in cottura, rigonfiamenti, bolle, porosità nello smalto.

Il campo di temperatura che gli compete finisce là dove si innesca la fusione (500- 1000°C). Altro compito è quello di accompagnare la trasformazione del quarzo α in quarzo β , senza che si producano rotture per eccesso di tensioni, durante il forte aumento di volume (variazioni lente per permettere l'assestamento delle diverse fasi).

È dotato di un robusto impianto di bruciatori alloggiati in parete, sopra e sotto il piano rulli.

- Cottura (19%): interessa il campo delle massime temperature , a partire da circa 1000°C. Le pareti sono rivestite da mattoni isolanti con spiccate caratteristiche refrattarie; tutta la zona di cottura è dotata di bruciatori in parete disposti sopra e sotto il piano rulli.

È indispensabile il controllo raffinato delle temperature perché in questa zona si imprimono le caratteristiche finali di dimensione, planarità, ecc..

- Raffreddamento rapido (6%): interessa il campo di temperatura compreso tra la massima temperatura di cottura ed i 600°C. E' destinato a raffreddare le piastrelle il più rapidamente possibile fino a temperature superiori a 573°C.

L'attrezzatura prevede tubi soffiatori inseriti sopra e sotto il piano rulli, che immettono aria fredda attraverso fori.

- Raffreddamento lento (20%): stadio del processo di cottura dedicato alla ritrasformazione allotropica del quarzo; ciò comporta una forte diminuzione del volume, che deve quindi svilupparsi con lentezza e gradualità affinché avvenga contemporaneamente in tutta la piastrella (è bene evitare che si creino tensioni che potrebbero provocare rotture).

Il campo di temperatura interessato è compreso tra 600 e 450°C, cui corrispondono reali temperature della piastrella tra 700 e 500°C.

L'attrezzatura è costituita da tubi scambiatori attraverso cui circola aria fredda aspirata in ambiente; il raffreddamento è perciò indiretto, cioè l'aria fredda non investe direttamente il materiale in transito.

- Raffreddamento finale (14%): ultimo stadio ed ha il compito di abbattere quanto più possibile il calore latente del prodotto che ormai ha superato la criticità della trasformazione del quarzo.

È attrezzato con un sistema di soffiatura di aria fredda direttamente sopra e sotto il materiale.

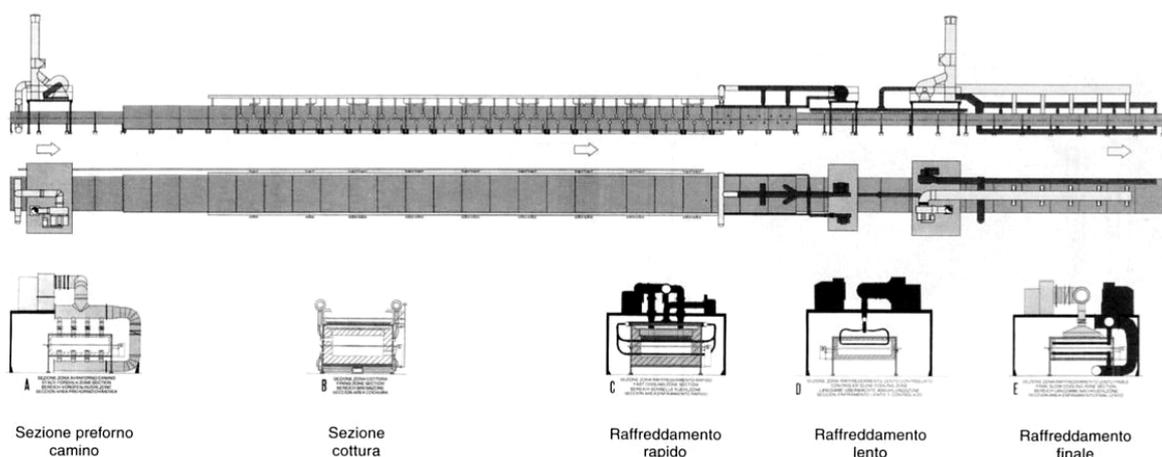


Fig. 2.15: Sezione longitudinale di un forno monostrato e particolare delle diverse sezioni

2.10 LINEE DI SCELTA, LUCIDATURA, CONFEZIONAMENTO

Il reparto scelta si colloca al termine della fase di lavoro quando la piastrella ha già acquisito tutte le caratteristiche fisiche e di presentabilità del prodotto. Il reparto scelta non va ad influenzare in alcun modo tali caratteristiche, soltanto può eseguire verifiche e classificazioni del prodotto. Funzione fondamentale del reparto è portare ad una suddivisione del prodotto, con relativo confezionamento, eseguita sulla base di parametri sia qualitativamente oggettivi che soggettivamente impostabili sulla base del rapporto che l'azienda ceramica intende mantenere con il mercato di consumo.

Le funzioni svolte in questo reparto sono generalmente poco automatizzate ed affidate principalmente alla perizia di operatrici umane, proprio per la difficoltà oggettiva di concepire e realizzare dei sistemi di "visione" artificiale efficienti e affidabili. Le linee di collegamento svolgono la duplice funzione di allacciamento alle macchine a monte e collegamento tra i vari dispositivi ausiliari quali sistemi di controllo (test di carico di rottura in cotto), sistemi di pulizia a spazzola e ventola, girapiastrelle (per orientare opportunamente le piastrelle rettangolari), sistemi di accumulo e molto importante, la postazione di scelta visiva.

Il banco scelta è la zona in cui avviene l'analisi qualitativa delle piastrelle ad opera di operatori umani. Le piastrelle giungono ad alimentare il banco scelta con flusso uniforme e continuo; si viene a creare davanti all'operatore una sorta di piano illuminato da luce diffusa che permette l'analisi e l'individuazione dei difetti.

All'uscita dal tratto controlli la piastrella è stata esaminata in tutti i suoi aspetti e classificata dall'operatore come tono e qualità.

Alcune linee di prodotti, prima del confezionamento subiscono ulteriori lavorazioni di levigatura e lucidatura con l'intento di aumentarne il valore estetico.

Queste lavorazioni avvengono su linee che avanzando a velocità costante fanno sì che il materiale trasportato sia sottoposto a fasi successive di calibratura, sgrossatura e lucidatura. Tutti i processi di levigatura avvengono ad umido producendo quantitativi molto elevati di sospensioni acquose.

Infine il confezionamento del prodotto può avvenire in modo automatico o semiautomatico; in quest'ultimo caso l'operazione è compiuta mediante l'interazione fra il dispositivo meccanico ed un operatore umano che coadiuva le operazioni.

Il confezionamento ha il compito di racchiudere il materiale preventivamente preparato in pile di omogenea composizione all'interno di un supporto in cartone che ne facilita il contenimento, la movimentazione e il trasporto sino al punto di posa finale.

CAPITOLO 3

IL SISTEMA DI VALUTAZIONE LEED

3.1 VANTAGGI NELLA REALIZZAZIONE DI UN EDIFICIO SECONDO I PRINCIPI DELL'ECOSOSTENIBILITA' (GREEN BUILDING)

L'impatto ambientale della progettazione, costruzione ed esercizio degli edifici è enorme: in Europa gli edifici sono responsabili, direttamente o indirettamente, di circa il 40% del consumo di energia primaria complessiva, inoltre, la trasformazione di microsistemi locali in spazi antropizzati impermeabili e privi di biodiversità, ha come ulteriore effetto negativo, quello di impoverire la varietà biologica dell'ecosistema globale.

L'enorme influenza negativa delle costruzioni richiede quindi specifiche azioni per mitigare gli effetti ambientali negativi sopra descritti.

Un progetto realizzato con criteri di sostenibilità ambientale può minimizzare o eliminare del tutto gli impatti ambientali negativi attraverso una scelta consapevole che passa attraverso pratiche progettuali, costruttive e di esercizio migliorative rispetto a quelle comunemente in uso.

Inoltre un progetto sostenibile consente di ridurre i costi operativi, aumentare il valore dell'immobile nel mercato e la produttività degli utenti finali.

3.2 IL PROTOCOLLO LEED

La certificazione LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) è stata sviluppata ed introdotta negli Stati Uniti nel 1999 dall'US Green Building Council, l'organizzazione che riunisce i rappresentanti del settore dell'edilizia, della ricerca e degli enti governativi nordamericani, con l'obiettivo di fornire a tutti gli operatori del settore uno strumento utile per la certificazione della sostenibilità edilizia.

Nel 2008 si è costituito il Green Building Council italiano, che già nell'anno seguente ha pubblicato il protocollo italiano di certificazione LEED, conforme a quello statunitense, contenente le regole da rispettare per il raggiungimento della certificazione.

La certificazione valuta e attesta la sostenibilità ambientale, sociale ed economica degli edifici, dalla fase di progettazione fino alla gestione quotidiana avvalendosi di un sistema flessibile che prevede formulazioni differenziate per le diverse tipologie di edifici pur mantenendo un'impostazione di fondo coerente. In particolare, il LEED NC riguarda la realizzazione dei nuovi edifici e le ristrutturazioni rilevanti delle strutture esistenti.

Si tratta pertanto di un programma di certificazione volontario, volto a potenziare e promuovere le alte performance proprie degli edifici sostenibili.

Il protocollo di certificazione prevede l'attribuzione di un punteggio all'edificio riconosciuto sulla base della verificata conformità dello stesso ai diversi pre-requisiti (obbligatorie) e crediti LEED, articolati in 6 aree tematiche:

- SS: Sustainable Sites (Siti sostenibili)
- WE: Water Efficiency (Efficienza nella gestione dell'acqua)
- EA: Energy and Atmosphere (Consumo energetico e impatto sull'atmosfera)
- MR: Materials and Resources (Materiali e risorse)
- EQ: Indoor Environmental Quality (Qualità dell'ambiente interno)
- ID: Innovation in Design (Innovazione nella fase progettuale)

Il punteggio finale si ottiene sommando i punteggi conseguiti all'interno di ogni area tematica e determina il diverso livello di certificazione ottenuta: Certificazione Base (40-49 punti conseguiti), Argento (50-59), Oro (60-79) e Platino (80 o più)

Il LEED è una certificazione di edificio e non di prodotto: i crediti fanno sempre riferimento al sistema edificio e non ai singoli materiali utilizzati nel progetto.

La piastrella non può garantire da sola il raggiungimento di un punteggio, ma può contribuire alla conformità ai requisiti LEED dell'edificio in cui è inserita.

La soglia indicata nei crediti si riferisce al parametro cui l'edificio dovrà conformarsi per l'attribuzione del relativo punteggio.

Di seguito è indicata la tabella in cui sono elencati, divisi in base alla categoria di appartenenza, il numero e il titolo di ogni credito/pre-requisito e il punteggio attribuito sulla base della conformità al credito.

SS	PR	1	Prevenzione dell'inquinamento da attività di costruzione				necessario
SS	C	1	Selezione del sito				1
SS	C	2	Densità di sviluppo e connessione alla collettività				1
SS	C	3	Recupero di aree industriali				1
SS	C	4	Trasporto alternativo	Accesso al trasporto pubblico			1
SS	C	4		Deposito biciclette			1
SS	C	4		Veicoli efficienti e poco inquinanti			1
SS	C	4		Parcheggi			1
SS	C	5	Valorizzazione del sito	Proteggere o ripristinare l'habitat			1
SS	C	5		Massimizzare lo spazio aperto			1
SS	C	6	Gestione dell'acqua piovana	Controllo quantitativo			1
SS	C	6		Controllo qualitativo			1
SS	C	7	Effetto "Isola di Calore"	Non-coperture			1
SS	C	7		Coperture			1
SS	C	8	Riduzione inquinamento luminoso				1
WE	C	1	Uso efficiente dell'acqua nelle aree verdi	Riduzione del 50% del fabbisogno			1
WE	C	1		Risparmio del 100%			1
WE	C	2	Tecnologie innovative per il recupero dell'acqua				1
WE	C	3	Riduzione del consumo idrico	Riduzione del 20%			1
WE	C	3		Riduzione del 30%			1
EA	PR	1	Verifica del funzionamento dei sistemi energetici dell'edificio				necessario
EA	PR	2	Performance energetica minima				necessario
EA	PR	3	Management dei sistemi refrigeranti				necessario
EA	C	1	Ottimizzazione delle performance energetiche				10
EA	C	2	Uso di fonti energetiche rinnovabili				3
EA	C	3	Ulteriori verifiche sul funzionamento dell'edificio				1
EA	C	4	Gestione avanzata dei sistemi refrigeranti				1
EA	C	5	Misure e controllo delle prestazioni				1
EA	C	6	Energia verde				1
MR	PR	1	Deposito e raccolta del materiale riciclabile				necessario
MR	C	1	Riutilizzo di edifici preesistenti	Mantenimento del 75% della struttura, solaio e tetti esistenti			1
MR	C	1		Mantenimento del 95% della struttura, solaio e tetti esistenti			1
MR	C	1		Mantenimento del 50% degli elementi interni non strutturali			1
MR	C	2	Gestione dei rifiuti di costruzione	Riciclo del 50% dei rifiuti prodotti			1
MR	C	2		Riciclo del 75% dei rifiuti prodotti			1
MR	C	3	Utilizzo di materiale di recupero	Riutilizzo del 5% del materiale			1
MR	C	3		Riutilizzo del 10% del materiale			1
MR	C	4	Utilizzo di materiale riciclato	Utilizzo del 10% di materiale riciclato			1
MR	C	4		Utilizzo del 20% di materiale riciclato			1
MR	C	5	Utilizzo di materiali regionali	Utilizzo del 10% di materiale regionale			1
MR	C	5		Utilizzo del 20% di materiale regionale			1
MR	C	6	Utilizzo di materiali rinnovabili rapidamente				1
MR	C	7	Utilizzo di legno certificato				1
EQ	PR	1	Rispetto delle performance minime sulla qualità dell'aria				necessario
EQ	PR	2	Controllo del fumo da tabacco negli ambienti				necessario
EQ	C	1	Monitoraggio della distribuzione dell'aria esterna				1
EQ	C	2	Incremento della ventilazione				1
EQ	C	3	Piano di gestione della qualità dell'aria interna	Durante la costruzione			1
EQ	C	3		Prima dell'occupazione			1
EQ	C	4	Materiali a bassa emissione	Adesivi e sigillanti			1
EQ	C	4		Pitture e rivestimenti			1
EQ	C	4		Sistemi di tappezzeria			1
EQ	C	4		Composti del legno			1
EQ	C	5	Controllo delle fonti inquinanti e chimiche interne				1
EQ	C	6	Controllabilità dei sistemi	Controllo illuminazione			1
EQ	C	6		Comfort termico			1
EQ	C	7	Comfort tecnico	Progetto			1
EQ	C	7		Verifica			1
EQ	C	8	Luce naturale e vista dell'esterno	Luce naturale 75% degli spazi			1
EQ	C	8		Luce naturale 90% degli spazi			1
ID	C	1	Innovazione nel progetto				1
ID	C	1					1
ID	C	1					1
ID	C	1					1
ID	C	2	Professionista accreditato LEED				1

Tab.3.1: Struttura crediti LEED NC

3.3 CREDITI LEED DERIVANTI DALL'AGGIUNTA DI MATERIALI RICICLATI [6]

L'aggiunta di materiale riciclato all'impasto ceramico contribuisce al raggiungimento di alcuni crediti della categoria Materiali e Risorse, in particolare:

- MR 4.1: Contenuto di materiale riciclato 10% (post-consumer+ ½ pre-consumer);
- MR 4.2: Contenuto di materiale riciclato 20% (post-consumer+ ½ pre-consumer);
- MR 5.1: Materiali regionali (10% estratti, lavorati e prodotti localmente);
- MR 5.2: Materiali regionali (20% estratti, lavorati e prodotti localmente).

CREDITO MR 4.1:

Contenuto di materiale riciclato 10% (post-consumer+ ½ pre-consumer)

Il rispetto del seguente criterio, riferito all'edificio, attribuisce 1 punto nel sistema LEED.

Obiettivo: aumentare la domanda di materiali da costruzione che contengono una componente di materiale riciclato, riducendo gli impatti derivati dall'estrazione e dalla lavorazione di materie prime vergini.

Requisiti: utilizzare materiali da costruzione che contengano una componente di materiale riciclato tale che la somma dei materiali post-consumo e di ½ di quelli pre-consumo costituisca almeno il 10% del valore economico totale dei materiali utilizzati nel progetto.

Il valore attribuito al materiale riciclato contenuto nei prodotti utilizzati, deve essere determinato in base al peso. La parte di materiale riciclato contenuto nel prodotto finito è poi moltiplicata per il valore del prodotto finito in modo da determinare il valore percentuale del contenuto di riciclato.

Definizioni:

Materiale POST-CONSUMO: materiale di scarto, generato da famiglie o da spazi commerciali, industriali e istituzionali nel loro ruolo di utilizzatori finali del prodotto, che non può più essere utilizzato per il proprio scopo. Sono inclusi i rifiuti da costruzione e demolizione (es. materiali provenienti da raccolte differenziate)

Materiale PRE-CONSUMO: Materiale distolto dai flussi dei rifiuti durante il processo produttivo. È escluso il riutilizzo di materiali derivanti dalla rilavorazione, rigranulazione oppure da scarti generati in un processo produttivo e riutilizzati all'interno dello stesso.

Possono essere considerati pre-consumer gli scarti, i rifiuti ed i prodotti finiti che, non potendo essere immessi nel mercato per difetti di produzione, vengono introdotti nel ciclo produttivo purché generati in un sito diverso da quello in cui avviene il riutilizzo (es. scarti cotti e crudi, fanghi e acque di depurazione, polveri da aspirazione, ecc).

Chiave interpretativa del parametro.

La piastrella di ceramica contribuisce al raggiungimento del credito se contiene materiale riciclato (calcolato come somma di post-consumo e pre-consumo). La percentuale del 10% di materiale riciclato, il cui raggiungimento è necessario per l'accredito dei punteggi relativi al MR4.1, fa riferimento alla percentuale di materiale riciclato complessivamente presente nell'edificio, non ai singoli materiali da costruzione utilizzati nel progetto. Quindi, la piastrella di ceramica potrà contribuire al credito, nella misura in cui contenga percentuale qualsiasi di materiale riciclato. Per l'azienda sarà sufficiente fornire una autodichiarazione, meglio se supportata da certificazioni rilasciate da laboratorio indipendenti, delle percentuali in peso del materiale pre e post consumo utilizzate nella propria produzione, sarà compito del progettista tradurre tale percentuale in peso nella relativa percentuale in valore economico, seguendo la formula sotto riportata

Valore del materiale riciclato (€) = (% di materiale post-consumo x costo del materiale) + 0.5 x (% di materiale pre-consumo x costo del materiale)

Percentuale in valore del materiale riciclato (%) = Valore del materiale riciclato (€) / Valore della fornitura (€) * 100

Esempio applicativo:

Piastrella 1

Quantità di piastrelle fornite	100m ²
Costo unitario delle piastrelle	10,57 €/ m ²
% in peso del materiale riciclato post-consumo	4,8 %
% in peso del materiale riciclato pre-consumo	17,9 %

$$(10,57 \times 4,8 \%) + 0,5 (10,57 \times 17,9 \%) = 0,50 + 0,94 = 1,44 \text{ €/m}^2$$

$$1,44 \times 100 = 144 \text{ € (valore del materiale riciclato utilizzato nelle piastrelle)}$$

$$\text{Valore della fornitura} = 10,57 \times 100 = 1057 \text{ €}$$

$$\text{Percentuale in valore del materiale riciclato} = 144 / 1057 \times 100 = 13,62\%$$

CREDITO MR 4.2:

Contenuto di materiale riciclato 20% (post-consumer+ ½ pre-consumer)

Il rispetto del seguente criterio, riferito all'edificio, attribuisce 1 punto aggiuntivo al credito MR 4.1 nel sistema LEED.

Requisiti: l'unica variante rispetto al credito MR 4.1, riguarda la percentuale minima di materiale riciclato – dato dalla somma di post- consumo e ½ pre- consumo, che in questo credito deve raggiungere il 20% (basato sul costo) dei valori totali dei materiali utilizzati nel progetto.

Tutti invariati gli altri punti.

CREDITO MR 5.1:

Materiali regionali 10% estratti, lavorati e prodotti localmente.

Il rispetto del seguente criterio, riferito all'edificio, attribuisce 1 punto nel sistema LEED.

Obiettivo: aumentare la domanda di materiali e prodotti da costruzione che siano estratti e lavorati in ambito regionale, sostenendo in tal modo l'uso di risorse indigene e riducendo gli impatti sull'ambiente derivanti dal trasporto.

Requisiti:

Opzione 1: Utilizzare materiali e prodotti da costruzione che siano stati estratti, raccolti o recuperati, nonché lavorati, entro un raggio di 350 km dal sito di costruzione per un minimo di 10% (percentuale basata sul costo) del valore totale dei materiali.

Se solo una frazione di prodotto/materiale è estratta, raccolta, recuperata o lavorata localmente, allora solo quella percentuale (in peso) contribuisce al valore regionale.

Opzione 2: Utilizzare materiali e prodotti da costruzione che siano stati estratti, raccolti o recuperati, nonché lavorati, entro un raggio di 1050 km dal sito di costruzione per un minimo di 10% (percentuale basata sul costo) del valore totale dei materiali trasportati via ferrovia o via mare.

Se solo una frazione di prodotto/materiale è estratta, raccolta, recuperata o lavorata localmente, allora solo quella percentuale (in peso) contribuisce al valore regionale.

Chiave interpretativa del parametro.

A differenza di quanto avviene per i crediti MR 4.1 e 4.2 dove viene presa in esame una caratteristica strutturale della piastrella di ceramica, i crediti MR5.1 e 5.2 premiano l'utilizzo nell'edificio di materiali e prodotti locali.

In particolare il credito richiede che i materiali da costruzione siano prodotti, estratti e lavorati entro un raggio di 350 (o 1050 km se trasportati via mare o ferrovia) dal luogo del progetto.

Valore componente regionale (€) = costo del materiale x % peso del materiale regionale.

Esempio applicativo (solo trasporto su gomma):

	<i>Dist.progetto – luogo di produz.</i>	<i>Dist.progetto – luogo di estrazione</i>	<i>% peso</i>	<i>% regionale</i>
FELDSPATI	100 km	300 km	30 %	30 %
SABBIA	100 km	200 km	20 %	20 %
ARGILLA	100 km	500 km	50 %	-
				Totale :50 %

Costo materiale = 30 000 €

30 000 x 50% = 15 000 € (valore componente regionale)

CREDITO MR 5.2:

Materiali regionali 20% estratti, lavorati e prodotti localmente.

Il rispetto del seguente criterio, riferito all'edificio, attribuisce 1 punto aggiuntivo al credito MR 5.1 nel sistema LEED.

Requisiti: l'unica variante rispetto al credito MR 5.1, riguarda la percentuale minima di materiali e prodotti da costruzione estratti, raccolti o recuperati e lavorati localmente, che nel credito in questione deve raggiungere il 20% (basato sul costo) del valore totale dei materiali utilizzati nel progetto.

Tutti invariati gli altri punti.

CAPITOLO 4

FINALITA' E IMPOSTAZIONE DELLA SPERIMENTAZIONE

4.1 L'OBIETTIVO DELLA SPERIMENTAZIONE

Date le premesse del capitolo introduttivo, è possibile ricondurre l'obiettivo di questa sperimentazione nell'esigenza di incrementare lo sviluppo industriale nel settore ceramico in maniera sostenibile per l'ambiente.

Nello specifico, attraverso numerose prove in laboratorio, abbiamo cercato di massimizzare il tenore di materiale riciclato negli impasti utilizzati per la produzione di piastrelle ceramiche.

Gli obiettivi sono dunque molteplici:

- riduzione della quantità di materiale di rifiuto da smaltire in discarica, con conseguente riduzione dell'impatto ambientale;
- riduzione del fabbisogno di materie prime naturali;
- riduzione complessiva dell'impatto ambientale associato al trasporto delle materie prime;
- riduzioni delle emissioni ad effetto serra.
- aumento dell'efficienza energetica in cottura;

4.2 COLLABORAZIONE CON L'AZIENDA CERDOMUS CERAMICHE S.p.a

Anche grazie alla preziosa collaborazione dell'azienda Cerdomus Ceramiche è stato possibile portare avanti le sperimentazioni.

L'azienda, fondata alla fine degli anni '60, ha la propria sede principale in via Emilia Ponente, 1000 a Castel Bolognese (RA) e si occupa di tutte le fasi della produzione di piastrelle ceramiche, dalla macinazione delle rocce che giungono direttamente dalle cave, al confezionamento del prodotto finito.

Ad oggi la produzione è costituita principalmente da gres porcellanato, bicottura rapida, monocottura in pasta bianca (piastrelle e pezzi speciali) e ceramica d'arte.

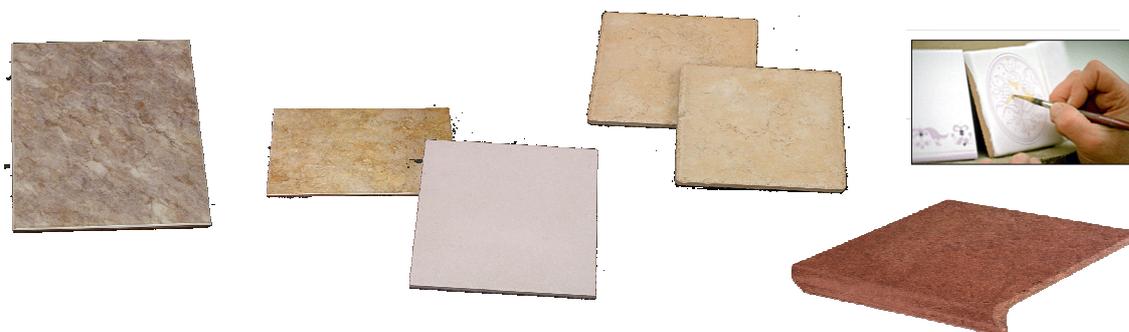


Fig. 4.1: Esempi di piastrelle prodotti da Cerdomus Ceramiche

Dispone di un moderno impianto, che comprende oltre a tutti i macchinari specifici per la produzione, anche un attrezzato laboratorio tecnologico, il quale garantisce un intenso lavoro di ricerca condotta dalla sua equipe specializzata.

La collaborazione è stata resa possibile dalla comune curiosità a sperimentare nuovi impasti ad elevata percentuale di materie seconde. Oltre al perseguimento di fini ambientali se ne sono aggiunti altri, altrettanto molto importanti per l'azienda:

- aumentando il tenore di materiale post-consumer si può attuare un risparmio economico sull'acquisto e trasporto delle materie prime,
- aumento del punteggio sui propri prodotti dato dalla certificazione LEED (marchio ecologico);
- diminuzione dei consumi energetici in cottura,
- possibilità di smaltire parte dei fanghi di scarto del ciclo di produzione.

L'obiettivo di aumento del tenore di materiale post-consumer è stato portato avanti cercando di mantenere inalterate le condizioni di cottura rispetto all'impasto standard, attualmente in produzione.

Sarebbe troppo complesso e soprattutto controproducente dover settare diversamente i parametri di cottura del forno utilizzato per la produzione standard, per cui si è cercato di ottenere un impasto che possa eventualmente entrare in produzione senza la necessità di installare una nuova linea.

Parallelamente sono state effettuate sperimentazioni per ottenere impasti che possano essere cotti in modo ottimale a temperature inferiori ed attuare anche la diminuzione dei consumi energetici.

4.3 COLLABORAZIONE CON CENTRO CERAMICO BOLOGNA

Oltre alla collaborazione con Cerdomus, è stato fondamentale il contributo dato dal Centro Ceramico di Bologna, nel quale sono state compiute molte delle prove meccaniche e chimiche che hanno permesso di ottenere risultati fondamentali per portare a termine la ricerca.

Il centro è un ente consortile, finanziato da diversi enti: Università di Bologna, l'Unione Regionale delle Camere di Commercio Emilia Romagna, Confindustria Ceramica, l'Associazione Nazionale Cooperative Produzione e Lavoro dell'Emilia Romagna, CNA e l'Agenzia Polo Ceramico.

Le attività di cui si occupa riguardano ricerca e trasferimento tecnologico, assistenza all'industria, normativa tecnica, didattica e divulgazione.

Sono stati messi a disposizione della mia sperimentazione, personale specializzato, laboratori e attrezzature.



Fig.4.2: Foto di uno dei laboratori del centro Ceramico

4.4 LINEE DELLA SPERIMENTAZIONE

Definiti gli obiettivi, è stato necessario definire i passi utili al raggiungimento degli stessi.

- a) Definizione dei materiali da riciclo da inserire , in diverse percentuali, nell'impasto ceramico.
- b) Preparazione di diversi provini (ognuno con percentuali o tipo di materiale di recupero diversi) da sottoporre al ciclo di cottura standard utilizzato in azienda e confronto delle caratteristiche ottenute (in particolare porosità, ritiro) con le piastrelle attualmente in produzione.
- c) Selezione del materiale di recupero che offre i migliori risultati e ottimizzazione della formula per ottenere le migliori caratteristiche.
- d) Selezione degli impasti più promettenti da sottoporre ad analisi più specifiche (curve di greificazione, carico di rottura a flessione, analisi microstrutturali).
- e) Valutazione dei risultati e avvio di una produzione semindustriale.
- f) Valutazione sugli aspetti di risparmio energetico nel caso della produzione industriale di piastrelle con temperatura di cottura inferiore.

CAPITOLO 5

1° PARTE DELLA SPERIMENTAZIONE: PREPARAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI IMPASTI CON L'AGGIUNTA DI MATERIALE RICICLATO

5.1 PREPARAZIONE IMPASTI PRESSO LABORATORIO TECNOLOGICO DI CERDOMUS

Dal punto di vista pratico, la preparazione dei campioni ha richiesto una serie di operazioni, le quali sono state possibili grazie alle materie prime, i laboratori, le attrezzature e il personale specializzato che l'azienda Cerdomus Ceramiche ha messo a disposizione.

Facendo riferimento alle linee guida, elencate nel capitolo dedicato alle finalità, verranno descritti di seguito i materiali, le metodologie seguite e i risultati ottenuti

5.1.1 MATERIALI

LA FORMULA STANDARD

Per valutare i miglioramenti o peggioramenti nelle caratteristiche e nei comportamenti degli impasti ottenuti con l'aggiunta di materiale riciclato, è stato prima necessario analizzare attentamente la composizione chimica delle piastrelle ad oggi in produzione (questo impasto verrà chiamato "standard").

Come accennato in precedenza la maggior parte della produzione si concentra su piastrelle di grès porcellanato, un prodotto con ottime caratteristiche tecniche, poiché presenta un'elevata resistenza meccanica e valori di assorbimento d'acqua estremamente contenuti.

La denominazione è sufficiente a richiamare le origini e le caratteristiche del prodotto; infatti con il termine grès, nella terminologia ceramica, si intendono materiali ceramici a struttura compatta, caratterizzati da una fase cristallina immersa in una matrice vetrosa (fase amorfa); mentre con il termine "porcellanato" si fa riferimento alle caratteristiche tecniche del prodotto che, sostanzialmente, richiamano quelle della porcellana (materiale ceramico più nobile).

Il grès porcellanato è fra i materiali ceramici per pavimentazione, quello che meglio si presta a sopportare usure di qualsiasi tipo, in virtù della sua elevata durezza superficiale; inoltre possiede ottime proprietà di resistenza meccanica a flessione e compressione, di resistenza all'attacco chimico e alle macchie.

Le materie prime usate per la composizione di impasti per il grès porcellanato possono essere ricondotte ad alcuni gruppi di minerali specifici, ciascuno dei quali esercita una propria funzione specifica: le materie prime argillose conferiscono plasticità all'impasto, mentre quelle complementari, non plastiche, comprendono i minerali fondenti e quelli a funzione smagrante -strutturale.

Alla prima famiglia appartengono i minerali argillosi di natura illitico- caolinitica, a caratteristiche plastiche più o meno evidenti in relazione alla propria struttura mineralogica e alla granulometria delle particelle.

I minerali fondenti sono rappresentati da feldspati e euriti, infine quelli a funzione strutturale sono il quarzo e le quarziti in genere.

A tutti i componenti è richiesta una bassa concentrazione di ossidi coloranti quali Fe_2O_3 e TiO_2 , onde evitare inquinamenti cromatici del colore naturale dell'impasto.

I rapporti quantitativi fra i componenti dipendono dalla natura mineralogica delle argille, dalla granulometria delle particelle argillose e, in ultima analisi, dalla loro reattività nei confronti dei minerali fondenti.

impasto >	STD		Argilla ucraina A		Argilla ucraina B		Feldspato sodico		Sabbia feldspatica potassica		Eurite (feldspato potassico)		Caolino		Scarto crudo	
	totale	100,0	quantità:	27,21	quantità:	11,88	quantità:	12,55	quantità:	18,78	quantità:	12,57	quantità:	12,57	quantità:	4,44
elementi	analisi chimica calcolata:	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati							
SiO ₂	70,37	63,81	17,36	65,80	7,82	72,81	9,14	79,10	14,85	73,50	9,24	70,80	8,90	68,89	3,06	
Al ₂ O ₃	18,14	23,50	6,39	22,77	2,71	16,30	2,05	11,00	2,07	14,95	1,88	17,20	2,16	20,01	0,89	
TiO ₂	0,63	1,35	0,37	1,10	0,13	0,26	0,03	0,06	0,01	0,15	0,02	0,20	0,03	0,89	0,04	
Fe ₂ O ₃	0,84	1,15	0,31	0,98	0,12	0,10	0,01	0,60	0,11	0,65	0,08	1,30	0,16	0,90	0,04	
CaO	0,55	0,30	0,08	0,34	0,04	0,48	0,06	0,80	0,15	1,30	0,16	0,30	0,04	0,43	0,02	
MgO	0,36	0,58	0,16	0,49	0,06	0,11	0,01	0,20	0,04	0,40	0,05	0,20	0,03	0,43	0,02	
K ₂ O	2,99	2,00	0,54	1,83	0,22	0,25	0,03	4,50	0,85	5,95	0,75	4,00	0,50	2,36	0,10	
Na ₂ O	2,07	0,47	0,13	0,24	0,03	9,20	1,15	3,20	0,60	0,20	0,03	0,80	0,10	0,83	0,04	
B ₂ O ₃	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Zr ₂ O	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Altro	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
P.F.	4,04	6,84	1,86	6,45	0,77	0,49	0,06	0,54	0,10	2,90	0,36	5,20	0,65	5,26	0,23	
	100,00	100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		

Tab. 5.1: Composizione chimica dell' impasto standard di riferimento.

Tra le materie prime riportate in tabella, è bene precisare che, secondo la normativa vigente, solo eurite, sabbia feldspatica potassica e caolino apportano punteggio per la certificazione Leed.

Questi tre prodotti di scarto (sottoprodotti della coltivazione di cave di granito) sono da considerare materiali pre-consumo, cioè materiali deviati dal flusso dei rifiuti durante il processo di fabbricazione del materiale principale (il granito) e non materiali di scarto generati da utilizzatori finali; apportano quindi solo la metà del punteggio rispetto ai materiale post-consumo (vedi paragrafo 3.3).

Prendendo in considerazione tutti gli aspetti riguardanti l'incremento del punteggio dato dalla certificazione LEED e da tutte le esigenze di diminuzione di impatto ambientale e aumento di risparmio energetico e quindi economico, sono stati presi in

esame tre tipi di materiali che potessero sostituire in parte le materie prime presenti nell'impasto standard.

Sono stati selezionati quindi i materiali sotto elencanti e aggiunti in percentuali crescenti nella formula di partenza.

- VETRO SODICO CALCICO (da raccolta differenziata), materiale post-consumo;
- VETRO BORICO (scarti da lavorazione industriale chimica), materiale pre-consumo;
- FANGHI CERAMICI; materiale pre- consumo.

VETRO SODICO CALCICO (DA RACCOLTA DIFFERENZIATA)

Il vetro è un materiale costituito da una miscela omogenea di varie sostanze, che assume una consistenza pastosa se riscaldata a una temperatura variabile fra i 1300 e i 1400 °C e che diventa lavorabile intorno ai 1500 °C. Componente essenziale della miscela è la silice, impiegata nella forma di sabbia silicea, mentre le altre sostanze vengono aggiunte per facilitare la fusione (fondenti), per rendere stabile la struttura del vetro, cioè per impedire la cosiddetta "devetrificazione" (stabilizzanti) e per conferire particolari caratteristiche al materiale stesso (affinanti, coloranti, opacizzanti); allo scopo di facilitare l'avvio del processo di fusione si aggiungono anche rottami di vetro. Il fondente usato per il vetro comune è l'ossido di sodio, nella forma di carbonato (soda), mentre per i vetri di maggior pregio, più brillanti, si usa il carbonato di potassio, anch'esso nella forma di carbonato (potassa).

Se tutti i componenti della miscela fossero puri il vetro sarebbe incolore e trasparente, ma normalmente alcuni di essi, specialmente gli ossidi, contengono impurità, costituite spesso da ossidi di ferro, che conferiscono un caratteristico colore verde più o meno intenso; per attenuarlo si aggiunge alla miscela un decolorante. L'aggiunta di quantità minime di talune sostanze conferisce un colore omogeneo a tutta la massa vetrosa.

Le materie prime che compongono il vetro sono molte, ma quelle in maggiore quantità sono le sabbie silicee. E' costituito per il 70 % da sabbia silice, addizionata ad un 30% di altre sostanze chiamate "fondenti" (soda e calce) sostanze che permettono durante la fusione di abbassare la temperatura ed ottenere un liquido omogeneo ed esente da bolle.

In particolare, il prodotto usato nelle sperimentazioni era costituita da sabbia fine di vetro: risultato del recupero e del trattamento degli scarti degli impianti di riciclaggio primario del vetro; materiale post – consumo, riciclato al 100% (come definito dalla norma UNI EN ISO 14021).

Il vetro da raccolta differenziata prima di essere riutilizzato viene sottoposto a lavaggi e calcinazione, che consiste in riscaldamento pilotato fino a 100 – 120°C per eliminare tutte le sostanze organiche volatili.

Provenienza: Brusnengo (Biella)

caratteristiche	
<i>Mineralogia</i>	Amorfo
<i>Granulometria >100 μm</i>	2%
<i>Umidità</i>	< 4,0%
<i>Durezza Mohs</i>	6,5
<i>ph</i>	7

Vetro da imballaggio	
elementi	%
<i>SiO₂</i>	<i>72,00</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>2,40</i>
<i>TiO₂</i>	<i>0,07</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>0,35</i>
<i>CaO</i>	<i>9,70</i>
<i>MgO</i>	<i>2,00</i>
<i>K₂O</i>	<i>1,00</i>
<i>Na₂O</i>	<i>12,20</i>
<i>L.O.I</i>	<i>0,15</i>

Tab. 5.2 e 5.3: Caratteristiche e composizione chimica (rilevata da spettrofotometria XRF) del vetro da imballaggio utilizzato.

VETRO BORICO

Il vetro borico o borosilicato è un materiale noto per le sue qualità di resistenza agli sbalzi termici e per il suo basso coefficiente di dilatazione. Viene prodotto mediante sostituzione degli ossidi alcalini da parte dell'ossido di boro nel reticolo vetroso della silice, ottenendosi così un vetro con un'espansione minore. Quando l'ossido di boro entra nel reticolo della silice, ne indebolisce la struttura (a causa della presenza di atomi di boro planari a tre coordinate) e ne abbassa considerevolmente il punto di rammollimento.

A differenza del vetro sodico calcico proveniente da raccolta differenziata, contiene percentuali di ossido di ferro bassissimo, per questo possiede un aspetto trasparente, biancastro e non apporta pigmenti coloranti all'impasto in cui viene aggiunto.

Il vetro borico utilizzato nella sperimentazione è un materiale pre – consumo, esso infatti non rappresenta un materiale di scarto alla fine del suo ciclo di vita, ma deriva dalle industrie che si occupano della produzione di attrezzature in vetro da laboratorio chimico.

Il materiale che si trova in forno all'inizio e alla fine del ciclo di fusione, quando ancora non sono raggiunte le temperature ottimali non può essere utilizzato in produzione e viene quindi scartato e riutilizzato (o viene rifiuto o venduto per altri utilizzi).

caratteristiche	
<i>Coeff. Dilatazione</i>	3,5* 10 ⁻⁶
<i>Granulometrie</i>	0-2 mm

Vetro borico	
elementi	%
<i>SiO₂</i>	<i>79,00</i>
<i>Al₂O₃</i>	<i>3,25</i>
<i>Fe₂O₃</i>	<i>0,05</i>
<i>CaO</i>	<i>0,50</i>
<i>K₂O</i>	<i>0,75</i>
<i>Na₂O</i>	<i>4,25</i>
<i>ZrO₂</i>	<i>1,24</i>
<i>B₂O₃</i>	<i>11,00</i>

Tab. 5.4 e 5.5: Caratteristiche e composizione chimica (rilevata da spettrofotometria XRF) del vetro borico.

FANGHI CERAMICI

I fanghi sono rifiuti/residui in sospensione colloidale, riconducibili alle diverse attività e fasi di produzione della ceramica e alla depurazione delle emissioni idriche.

In ambito ceramico la loro composizione è variabile, ma può inquadrarsi a metà strada tra quella degli smalti e quella degli impasti, prodotti e utilizzati dall'industria ceramica stessa. Per il loro smaltimento si rende spesso necessario ridurre i volumi con l'ausilio di filtropresse.

La filtropressa è una macchina industriale utilizzata per disidratare i fanghi mediante processi di separazione solido liquido. In altre parole, la filtro-pressatura è un sistema di riduzione volumetrica di sostanze liquide che presentano all'interno solidi sospesi.

La filtropressa è composta da una serie di piastre o piatti alternati a tele che, aderendo l'una all'altra formano delle camere, nelle quali si forma il pannello di fango disidratato. Il fango viene pompato ad elevate pressioni dentro il filtro. La fase solida viene trattenuta nelle intercapedini tra piatti e telai e dalla filtropressa esce la fase liquida, a basso contenuto di solidi sospesi. Il successivo recupero della fase solida avviene con l'apertura della filtropressa, quando i fanghi hanno colmato l'intercapedine (quindi il processo di filtro pressatura è un processo discontinuo).

	vetro borico	vetro sodico calcico	fanghi filtropressati	argilla ucraina A	argilla ucraina B	eurite (feldspato potassico)	caolino	sabbia feldspatica potassica	feldspato sodico	scarto
SiO ₂	79,00	72,00	composiz. variabile	63,81	65,80	73,5	70,80	79,10	72,81	68,89
Al ₂ O ₃	3,25	2,48		23,50	22,77	14,95	17,20	11,00	16,30	20,01
Fe ₂ O ₃	0,05	0,35		1,15	0,98	0,65	1,30	0,60	0,10	0,90
TiO ₂		0,07		1,35	1,10	0,15	0,20	0,06	0,26	0,89
K ₂ O	0,75	1,00		2,00	1,83	5,95	4,00	4,50	0,25	2,36
Na ₂ O	4,25	12,25		0,47	0,24	0,20	0,80	3,20	9,20	0,83
MgO		2,00		0,58	0,49	0,40	0,20	0,20	0,11	0,43
CaO	0,50	9,70		0,30	0,34	1,30	0,30	0,80	0,48	0,43
ZrO ₂	1,24									
B ₂ O ₃	11,00									
P.F.		0,15								
	100,0	100,0			100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Tab. 5.6: Riepilogo delle composizioni chimiche dei materiali utilizzati

5.1.2 METODI

1° PREPARAZIONE

Una volta selezionati i materiali da sperimentare (vetro sodico calcico, vetro borico da industria chimica e fanghi filtropressati) si è deciso di preparare per ognuno tre campioni, variando la percentuale di materiale di riciclo (2%, 4%, 6%), oltre che un campione dell'impasto standard.

Chiaramente l'aggiunta di un materiale non previsto dalla formula standard, ha provocato variazioni nelle percentuali di altre materie prime; nella prima fase è stato scelto di ridurre la quantità di feldspato sodico, visto il massiccio apporto di elementi alcalini e alcalino-terrosi (ad azione fondente) da parte di entrambe le tipologie di vetro.

Il feldspato sodico oltre a contenere la percentuale più elevata della somma degli ossidi fondenti (K_2O , Na_2O , MgO , CaO), contiene anche la minore quantità di silice (azione refrattaria) tra tutti i feldspati presenti nell'impasto.

Per ogni tipologia di impasto (numerato in ordine crescente) sono state realizzate due piastrelle utilizzando il procedimento descritto nelle pagine seguenti.

Riepilogando:

1° Preparazione		
N° campione	Materiale riciclato aggiunto	% di materiale riciclato
STD	-	-
1	Vetro sodico calcico	2
2	Vetro sodico calcico	4
3	Vetro sodico calcico	6
4	Vetro borico	2
5	Vetro borico	4
6	Vetro borico	6
7	Fanghi	2
8	Fanghi	4
9	Fanghi	6

Tab. 5.7: Riepilogo dei materiali e percentuali utilizzati nella prima preparazione

MATERIALE	STD	VETRO SODICO CALCICO			VETRO BORICO			FANGHI		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
argilla ucraina A	27,21	27,21	27,21	27,21	27,21	27,21	27,21	27,21	27,21	27,21
argilla ucraina B	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
feldspato sodico	12,55	10,55	8,55	6,55	10,55	8,55	6,55	10,55	8,55	6,55
feldspato potassico	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57
sabbia feldspatica potassica	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78	18,78
caolino	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57
scarto crudo	4,44	4,44	4,44	4,44	4,44	4,44	4,44	4,44	4,44	4,44
vetro sodico calcico (post consumer)		2	4	6						
vetro borico (pre consumer)					2	4	6			
fanghi da filtropressa (pre consumer)								2	4	6
TOTALE	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
fluidificante liquido	1	1	mix liquido al 50% prove 1 e 3	1	1	mix liquido al 50% prove 4 e 6	1	1	mix liquido al 50% prove 7 e 9	1
acqua	50	50		50	50		50	50		50

PESATE DA 500 GR

MATERIALE	STD	VETRO SODICO CALCICO			VETRO BORICO			FANGHI		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
argilla ucraina A	136,05	136,05	136,05	136,05	136,05	136,05	136,05	136,05	136,05	136,05
argilla ucraina B	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40
feldspato sodico	62,75	52,75	42,75	32,75	52,75	42,75	32,75	52,75	42,75	32,75
feldspato potassico	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85
sabbia feldspatica potassica	93,90	93,90	93,90	93,90	93,90	93,90	93,90	93,90	93,90	93,90
caolino	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85
scarto crudo	22,20	22,20	22,20	22,20	22,20	22,20	22,20	22,20	22,20	22,20
vetro sodico calcico (post consumer)	-	10,00	20,00	30,00	-	-	-	-	-	-
vetro borico (pre consumer)	-	-	-	-	10,00	20,00	30,00	-	-	-
fanghi da filtropressa (pre consumer)	-	-	-	-	-	-	-	10,00	20,00	30,00
TOTALE	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
fluidificante liquido	5,00	5,00	mix liquido al 50% prove 1 e 3	5,00	5,00	mix liquido al 50% prove 4 e 6	5,00	5,00	mix liquido al 50% prove 7 e 9	5,00
acqua	250,00	250,00		250,00	250,00		250,00	250,00		250,00

Tab. 5.8 e 5.9: Composizione campioni 1-9 e STD

1) Ogni quantità di materia prima, prescritta dalla formula (totale = 500g) è stata pesata sulla bilancia digitale (sensibilità= 0,1g).

Per le prove in laboratorio, il materiale utilizzato non era stato prefrantumato perché si è preferito farlo direttamente in laboratorio per ottenere una miscela più omogenea possibile.

Chiaramente è da tenere in considerazione che soprattutto le argille possono avere composizione molto variabile; lo stesso tipo può quindi presentare zolle con composizioni chimiche molto diverse.

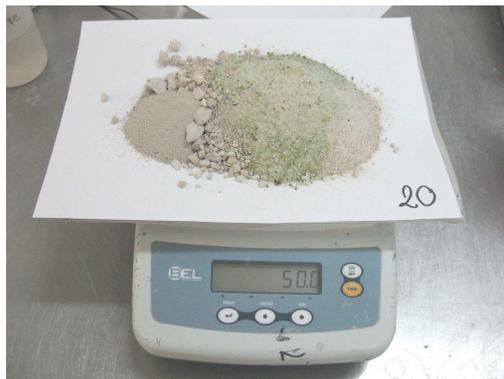


Fig. 5.1: Pesata materie prime

2) Presa la giara per la macinazione delle argille, contenente sferette di allumina appositamente pesate in modo da garantire una efficiente macinazione, si aggiunge al suo interno 250 g di acqua e 5 g di fluidificante (stando attenti a effettuare una misura precisa di quest'ultimo perché anche piccole variazioni influiscono molto sulla viscosità della barbottina).

Infine si aggiunge anche la miscela di materie prime, precedentemente pesate e si chiude la giara con l'apposito tappo.



Fig. 5.2: Giara per argille contenete biglie di allumina.



Fig. 5.3: Unione all'interno della giara delle materie prime con acqua e fluidificante.

3) La giara, opportunamente sigillata, viene posizionata dentro un apparecchio macinatore, si avvia la macinazione solo in seguito ad un necessario e attento fissaggio (la giara viene fatta ruotare ad alta velocità per 45 minuti).



Fig. 5.4 e 5.5: Posizionamento della giara all'interno dell'apparecchio macinatore

4) Passati 45 minuti, la giara viene prelevata e si effettuano i controlli sulla densità, viscosità della barbottina e percentuale di residuo.

Per la spiegazione in dettaglio della procedura si rimanda all'appendice A, in fondo al capitolo.

n. prova	DENSITA' (gr/l)	VISCOSITA (sec)	RESIDUO (%)
STD	1685	23	0,80
1	1685	23	0,66
2	1682	22	0,71
3	1679	21	0,75
4	1683	21	1,17
5	1681	22	0,93
6	1679	23	0,69
7	1687	22	0,72
8	1685	21	0,76
9	1683	20	0,79

Tab. 5.10: Densità, viscosità, residuo dei campioni STD, 1-9

(I valori evidenziati in giallo e cioè quelli relativi agli impasti con 4% di materiale riciclato sono stati ottenuti come media dei risultati ottenuti sui campioni con 2% e 6% con lo stesso materiale aggiunto).

5) La barbottina ancora calda viene versata in ciotola e messa ad essiccare in stufa (160°C) finché tutta l'acqua non è evaporata (per circa tre ore).



Fig. 5.6: La barbottina trasferita in una ciotola viene messa ad essiccare in stufa

6) Trascorso il tempo necessario al completo essiccamento, si stacca l'impasto dalla ciotola e lo si frantuma grossolanamente in un mortaio.



Fig. 5.7 e 5.8: Frantumazione grossolana

7) I pezzi grossolani vengono inizialmente macinati a secco, utilizzando una piccola mola e si ottiene una polvere fine.



Fig. 5.9: Particolare della mola



Fig. 5.10: Mola utilizzata



Fig. 5.11: Polvere ottenuta dopo la macinazione

8) Determinato il peso della polvere macinata, si aggiunge acqua distillata pari al 6% del peso; il tutto viene poi mescolato nel mixer per un paio di minuti. Successivamente, utilizzando una spatola, la polvere umidificata viene fatta passare in un setaccio con maglie da 1000 μm



Fig. 5.12: Umidificazione al 6%

Fig. 5.13: Passaggio nel mixer

Fig. 5.14: Setacciatura (1000 μm)

9) Prima di passare alla fase di pressatura è necessario pesare 82g della polvere umidificata perché questo è circa il peso del materiale che una volta pressato restituisce una piastrella con spessore simile a quelle prodotte industrialmente. Successivamente si procede con la fase di pressatura: si sistema la polvere dentro lo stampo e con passaggi successivi si fa in modo di fare entrare tutta la polvere dentro la cavità.

La prima pressata si esegue imprimendo una pressione di circa 100 bar per fare uscire l'aria, poi quella definitiva a 450 bar per il tempo necessario. È stata utilizzata per la sperimentazione una pressa idraulica manuale da laboratorio ceramico.

Al termine di questa fase sono stati prodotti due provini per ogni tipo di impasto.



Fig. 5.15: Pressa manuale utilizzata



Fig. 5.16: Sistemazione polveri nello stampo



Fig. 5.17: Pressatura

10) Si mettono i provini pressati (piastrelline di dimensioni circa 45x80 mm)ad essiccare in stufa a 160°C per circa 1 ora e successivamente si misurano la media delle lunghezze dei due lati più lunghi e quella riferita al peso (misure sull'essiccato).

11) Tutti i provini sono sottoposti allo stesso ciclo di cottura (durata: 46 minuti, temperatura massima: 1210°C), poiché sono stati inseriti direttamente in uno dei forni del reparto produttivo, sistemati su una lastra di materiale refrattario, con la superficie principale rivolta verso il basso.

Come descritto dettagliatamente nel capitolo relativo alle tecnologie produttive, le piastrelle sono state sottoposte ad un ciclo composto da varie fasi, ognuna caratterizzata da tempi di attraversamento e temperature differenti.

12) Dopo cottura i campioni sono stati sottoposti al controllo del ritiro di cottura, perdita al fuoco (per quantificare il calo di peso dovuto alla perdita di acqua di costituzione e delle sostanze organiche che si sono bruciate durante la cottura) e dell'assorbimento di acqua.

Per quanto riguarda il ritiro di cottura è bastato misurare le lunghezze dei due lati principali, farne una media e calcolare:

$$\%RITIRO = \frac{\text{dim.}ESSICCATO - \text{dim.}COTTO}{\text{dim.}ESSICCATO} * 100$$

Analogamente la percentuale di perdita al fuoco, è facilmente calcolabile dopo aver misurato il peso dei provini dopo la cottura:

$$\%PERDITA_FUOCO = \frac{\text{peso}ESSICCATO - \text{peso}COTTO}{\text{peso}ESSICCATO} * 100$$

Mentre per il calcolo dell'assorbimento d'acqua, una volta pesati i provini cotti, sono stati avvolti da pezze di stoffa, messi in posizione verticale dentro una pentola riempita di acqua e lasciati a bollire per un ora.

Trascorso questo tempo, dopo averli raffreddati in acqua fredda e asciugati con un panno di pelle di daino sono stati rimisurati i loro pesi (peso umido).

$$\%ASSORB_ACQUA = \frac{\text{peso}UMIDO - \text{peso}COTTO}{\text{peso}COTTO} * 100$$

RITIRO DI COTTURA											
n. prova	dimensioni in ESSICCATO (mm)					dimensioni in COTTO (mm)					ritiro di cottura %
	provino 1		provino 2		media	provino 1		provino 2		media	
	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4		lato 1	lato 2	lato 3	lato 4		
STD	10,071	10,070	10,070	10,069	10,070	9,287	9,291	9,306	9,306	9,298	7,67
1	10,068	10,066	10,070	10,068	10,068	9,300	9,298	9,285	9,285	9,292	7,71
2	10,063	10,067	10,066	10,068	10,066	9,284	9,277	9,292	9,298	9,288	7,73
3	10,063	10,061	10,064	10,063	10,063	9,293	9,296	9,299	9,298	9,297	7,61
4	10,068	10,069	10,070	10,074	10,070	9,309	9,311	9,293	9,296	9,302	7,63
5	10,068	10,070	10,070	10,070	10,070	9,307	9,307	9,321	9,322	9,314	7,50
6	10,069	10,068	10,071	10,072	10,070	9,331	9,330	9,316	9,316	9,323	7,42
7	10,072	10,068	10,071	10,068	10,070	9,282	9,283	9,295	9,298	9,290	7,75
8	10,068	10,070	10,070	10,073	10,070	9,288	9,290	9,277	9,271	9,279	7,85
9	10,070	10,068	10,071	10,074	10,071	9,280	9,282	9,278	9,279	9,280	7,85

Tab. 5.11: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di ritiro di cottura.

PERDITA AL FUOCO									
n. prova	peso ESSICCATO (gr)			peso COTTO (gr)			perdita al fuoco %		
	provino 1		provino 2	media	provino 1			provino 2	media
	lato 1	lato 2	lato 3		lato 4	lato 1		lato 2	
STD	77,312	77,397	77,355	74,731	74,801	74,766	3,35		
1	77,342	77,602	77,472	74,741	74,992	74,867	3,36		
2	77,436	77,799	77,618	75,149	74,807	74,978	3,40		
3	77,366	77,307	77,337	74,650	74,700	74,675	3,44		
4	77,397	77,445	77,421	74,673	74,731	74,702	3,51		
5	77,133	77,579	77,356	74,927	74,489	74,708	3,42		
6	77,610	77,410	77,510	74,910	74,801	74,856	3,42		
7	77,201	77,389	77,295	74,687	74,503	74,595	3,49		
8	77,290	77,354	77,322	74,549	74,575	74,562	3,57		
9	77,322	77,511	77,417	74,686	74,756	74,721	3,48		

Tab. 5.12: Riassunto dati riguardanti le percentuali di perdita al fuoco.

ASSORBIMENTO D'ACQUA									
n. prova	peso COTTO (gr)			peso UMIDO (gr)			assorbimento %		
	provino 1		provino 2	media	provino 1			provino 2	media
	lato 1	lato 2	lato 3		lato 4	lato 1		lato 2	
STD	74,73	74,80	74,766	74,807	74,735	74,771	0,007		
1	74,74	74,99	74,867	74,750	74,997	74,874	0,009		
2	75,15	74,81	74,978	74,805	75,153	74,979	0,001		
3	74,65	74,70	74,675	74,699	74,651	74,675	0,000		
4	74,67	74,73	74,702	74,681	74,743	74,712	0,013		
5	74,93	74,49	74,708	74,933	74,491	74,712	0,005		
6	74,80	74,91	74,856	74,918	74,815	74,867	0,015		
7	74,50	74,69	74,595	74,511	74,696	74,604	0,011		
8	74,55	74,58	74,562	74,562	74,589	74,576	0,018		
9	74,69	74,76	74,721	74,704	74,777	74,741	0,026		

Tab. 5.13: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di assorbimento d'acqua.

14) Infine, ma non meno importante, sono state determinate le coordinate cromatiche dei campioni cotti. Il colore è infatti un aspetto molto importante visto che la valutazione delle differenze di colore sono determinanti nel controllo della qualità dei prodotti e il valore estetico della piastrella è uno tra i parametri più importanti.

Inoltre più l'impasto base è scuro maggiore è il consumo di pigmenti sbiancanti coprenti, quali smalti, la cui aggiunta è necessaria per ottenere quei prodotti che prevedono toni molto chiari.

Per comprendere i principi che stanno alla base della tecnica di rilevamento dello spettrofotometro a riflettanza utilizzato per la sperimentazione, si rimanda alla lettura dell'Appendice B.

In breve, sono state rilevate numericamente tre coordinate : a (rosso- verde), b (giallo- blu), L (bianco – nero).

COLORIMETRIA			
n. prova	L	A	B
STD	67,84	4,00	13,07
1	66,27	4,15	12,09
2	65,89	4,02	12,87
3	64,80	4,13	13,00
4	66,93	4,23	12,59
5	67,07	4,25	12,73
6	67,15	4,29	12,39
7	65,75	4,06	12,16
8	65,10	3,83	11,90
9	64,98	3,58	11,54

Tab. 5.14: Risultati ottenuti dall'analisi spettrometrica sui campioni STD, 1-9.

Analizzando i risultati di ritiro, perdita al fuoco e assorbimento ottenuti è risultato che, pur aggiungendo fino al 6% di vetro non si sono ottenute variazioni di ritiro notevoli rispetto allo standard.

In particolare, negli impasti con l'aggiunta di vetro sodico calcico, la percentuale di ritiro era per tutti e tre i provini molto prossima a quella del campione standard.

Tenendo conto di queste valutazioni e dei buoni valori di assorbimento (tutti di gran lunga inferiore al limite dello 0,5% prescritto dalla norma UNI EN ISO 10545-3), è stato valutato che ci poteva essere la possibilità di ottenere impasti stabili con una percentuale superiore di vetro sodico calcico.

È stato pertanto messo da parte il vetro borico (pre-consumo) e portato avanti quello recuperato dalla raccolta differenziata, il quale, inoltre, apporta maggior punteggio per la certificazione LEED ed è sicuramente una materia prima molto economica.

Dal punto di vista del colore, come ci si aspettava, si sono ottenute piastrelle con toni un po' più scuri, sia a causa degli ossidi di ferro apportati negli impasti con l'aggiunta del vetro, sia a causa di pigmenti apportati con l'aggiunta dei fanghi, tuttavia la colorazione è risultata ancora accettabile.

2° PREPARAZIONE

Impasto 10:

Prima di procedere all'aumento dell'aggiunta di vetro sodico calcico negli impasti, è stata testata l'influenza del grado di macinazione di quest'ultimo sul ritiro e sull'assorbimento.

Il provino 10 è stato preparato con la stessa formula del provino 3, sostituendo il vetro sodico calcico grossolano con la stessa quantità di vetro sodico calcico macinato più finemente.

Impasto 11, 12, 13:

E' ben noto che l'aumento della quantità di vetro provoca una maggiore fluidità della miscela durante la cottura.

La causa di questo fenomeno è da attribuire ai minerali alcalini (Na, K) e alcalino – terrosi (Mg e Ca) presenti in cospicue quantità anche nei feldspati, i quali fondono ad una temperatura molto inferiore rispetto alla silice e all'allumina, creando quella matrice vetrosa che ingloba e intrappola le particelle delle materie più refrattarie presenti nella miscela, e riducendo anche l'ingombro complessivo (in cottura infatti le piastrelle ceramiche si ritirano).

Per aumentare quindi la percentuale di vetro (che innalza l'apporto di sodio, potassio, calcio e magnesio, e rende quindi l'impasto ancora più fondente), è stato eliminato completamente il feldspato sodico.

Dalla sola analisi della composizione chimica dei restanti feldspati (quello potassico e la sabbia feldspatica potassica), non è stato possibile scegliere con assoluta certezza quale dei due avrebbe garantito maggiore stabilità dimensionale all'impasto.

Facendo la somma delle percentuali di composti contenenti elementi fondenti si ottengono due risultati pressoché simili; inoltre, l'azione fondente varia anche in funzione di come questi elementi sono legati, dato che non sempre la conformazione del reticolo cristallino permette che questi elementi partecipino alle reazioni.

Nei campioni 11, 12, 13 si è scelto di testare l'effetto provocato dalla diminuzione di sabbia feldspatica potassica e il conseguente aumentato di feldspato potassico (eurite).

Tutti i provini sono stati preparati con lo stesso procedimento e sottoposti agli stessi controlli descritti precedentemente.

Riepilogando:

2° Preparazione		
N° campione	Materiale riciclato aggiunto	% di materiale riciclato
STD	-	-
10	Vetro sodico calcico	6 (macinato)
11	Vetro sodico calcico	10 (grossolano)
12	Vetro sodico calcico	10 (grossolano)
13	Vetro sodico calcico	10 (grossolano)

Tab. 5.15: Riepilogo 2° preparazione

MATERIALE	STD	VETRO SODICO CALCICO			
		10	11	12	13
argilla ucraina A	27,21	27,21	27,21	27,21	27,21
argilla ucraina B	11,88	11,88	11,88	11,88	11,88
feldspato sodico	12,55	6,55			
feldspato potassico	12,57	12,57	15,12	18,12	21,12
sabbia feldspatica potassica	18,78	18,78	18,78	15,78	12,78
caolino	12,57	12,57	12,57	12,57	12,57
scarto crudo	4,44	4,44	4,44	4,44	4,44
vetro sodico calcico (post consumer)			10	10	10
vetro sodico calcico (post consumer)		6			
TOTALE	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
fluidificante liquido	1	1	1	1	1
acqua	50	50	50	50	50

PESATE DA 500 GR					
MATERIALE	STD	VETRO SODICO CALCICO			
		10	11	12	13
argilla ucraina A	136,05	136,05	136,05	136,05	136,05
argilla ucraina B	59,40	59,40	59,40	59,40	59,40
feldspato sodico	62,75	32,75	-	-	-
feldspato potassico	62,85	62,85	75,60	90,60	105,60
sabbia feldspatica potassica	93,90	93,90	93,90	78,90	63,90
caolino	62,85	62,85	62,85	62,85	62,85
scarto crudo	22,20	22,20	22,20	22,20	22,20
vetro sodico calcico (post consumer) grossolano	-	-	50,00	50,00	50,00
vetro sodico calcico (post consumer) macinato	-	30,00	-	-	-
TOTALE	500,00	500,00	500,00	500,00	500,00
fluidificante liquido	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
acqua	250,00	250,00	250,00	250,00	250,00

Tab.5.16 (a) e 5.16 (b): Composizione campioni 10-13 e STD.

Dalle misurazioni effettuate sono stati ottenuti i dati sotto riportati.

n. prova	DENSITA' (gr/l)	VISCOSITA' (sec)	RESIDUO (%)
STD	1692	24	0,77
10	1685	25	0,73
11	1686	25	1,05
12	1685	26	0,92
13	1681	28	0,81

Tab. 5.17.: Densità, viscosità, residuo dei campioni.

RITIRO DI COTTURA												
n. prova	dimensioni in ESSICCATO (mm)					dimensioni in COTTO (mm)					ritiro di cottura %	
	provino 1		provino 2			media	provino 1		provino 2			media
	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4	lato 1		lato 2	lato 3	lato 4			
STD	10,066	10,065	10,064	10,068	10,066	9,306	9,310	9,302	9,299	9,304	7,57	
10	10,067	10,062	10,064	10,067	10,065	9,307	9,308	9,296	9,288	9,300	7,60	
11	10,064	10,068	10,063	10,070	10,066	9,383	9,379	9,385	9,391	9,385	6,77	
12	10,064	10,069	10,065	10,070	10,067	9,406	9,412	9,406	9,406	9,408	6,55	
13	10,072	10,065	10,067	10,076	10,070	9,411	9,416	9,435	9,438	9,425	6,41	

Tab. 5.18: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di ritiro di cottura.

PERDITA AL FUOCO							
n. prova	peso ESSICCATO (gr)			peso COTTO (gr)			perdita al fuoco %
	provino 1	provino 2	media	provino 1	provino 2	media	
STD	77,512	77,522	77,517	74,944	74,951	74,948	3,31
10	77,442	77,439	77,441	74,888	74,883	74,886	3,30
11	77,387	77,571	77,479	74,719	74,898	74,809	3,45
12	77,362	77,517	77,440	74,719	74,874	74,797	3,41
13	77,213	77,272	77,243	74,530	74,588	74,559	3,47

Tab.5.19: Riassunto dati riguardanti le percentuali di perdita al fuoco.

ASSORBIMENTO D'ACQUA							
n. prova	peso COTTO (gr)			peso UMIDO (gr)			assorbimento %
	provino 1	provino 2	media	provino 1	provino 2	media	
STD	74,94	74,95	74,948	74,956	74,966	74,961	0,018
10	74,89	74,88	74,886	74,889	74,885	74,887	0,002
11	74,72	74,90	74,809	74,720	74,898	74,809	0,001
12	74,72	74,87	74,797	74,721	74,874	74,798	0,001
13	74,53	74,59	74,559	74,532	74,588	74,560	0,001

Tab.5.20: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di assorbimento d'acqua.

COLORIMETRIA			
n. prova	L	A	B
STD	68,98	4,31	12,86
10	66,15	4,15	13,77
11	64,88	3,98	13,85
12	65,74	4,01	13,41
13	65,78	3,83	13,78

Tab.5.21: Risultati ottenuti dall'analisi colorimetrica sui campioni STD, 10-13.

I dati riguardanti il provino 10, in cui è stato aggiunto il 6% di vetro sodico calcico macinato, non mostrano particolari differenze rispetto al campione 9 in cui era stato addizionato lo stesso vetro, ma più grossolano.

In base a questi risultati si è valutato che fosse più opportuno e conveniente, anche dal punto di vista economico, continuare le sperimentazioni utilizzando vetro grossolano.

Per quanto riguarda i provini contenenti il 10% di vetro sodico calcico, i dati relativi alla percentuale di perdita al fuoco sono risultati paragonabili a quelli dello standard, quelli riguardanti l'assorbimento si sono rivelati addirittura migliori; ma quelli relativi alla percentuale di ritiro danno risultati troppo diversi.

In particolare, questi ultimi, sono risultati più bassi rispetto allo standard, in accordo con le supposizioni precedentemente fatte riguardo l'aumento di fluidità causata dai minerali alcalini e alcalino-terrosi

3° PREPARAZIONE

In questa serie di impasti sono stati temporaneamente messi da parte gli obiettivi fondamentali della ricerca ed è stata approfondita la possibilità di risparmio di pigmento nero utilizzando una miscela contenete fanghi.

Dai risultati ottenuti in precedenza sul campione 9 (contenente il 6% di fanghi) era risultato che la piastrella aveva una colorazione più tendente al grigio.

I provini 14 e 15 sono stati quindi prodotti con la stessa formula precedente (9), aggiungendo a fine macinazione, quantità inferiori di pigmento nero, rispetto alla dose normalmente utilizzata per la produzione di piastrelle scure.

Riepilogando:

3° Preparazione		
N° campione	Materiale riciclato aggiunto	% di materiale riciclato
STD	-	-
14	Fanghi	6
15	Fanghi	6

Tab. 5.22: Riepilogo 3° preparazione.

MATERIALE	STD	FANGHI	
		14	15
argilla ucraina A	27,21	27,21	27,21
argilla ucraina B	11,88	11,88	11,88
feldspato sodico	12,55	4,55	4,55
feldspato potassico	12,57	14,57	14,57
sabbia feldspatica potassica	18,78	18,78	18,78
caolino	12,57	12,57	12,57
scarto crudo	4,44	4,44	4,44
fanghi da filtropressa (pre consumer)		6	6
TOTALE	100,00	100,00	100,00
fluidificante liquido	1	1	1
acqua	50	50	50
pigmento nero (aggiunto a fine macinazione)	1,9	1,7	1,5

PESATE DA 500GR			
MATERIALE	STD	FANGHI	
		14	15
argilla ucraina A	136,05	136,05	136,05
argilla ucraina B	59,40	59,40	59,40
feldspato sodico	62,75	22,75	22,75
feldspato potassico	62,85	72,85	72,85
sabbia feldspatica potassica	93,90	93,90	93,90
caolino	62,85	62,85	62,85
scarto crudo	22,20	22,20	22,20
fanghi da filtropressa (pre consumer)	-	30,00	30,00
TOTALE	500,00	500,00	500,00
fluidificante liquido	5,00	5,00	5,00
acqua	250,00	250,00	250,00
pigmento nero (aggiunto a fine macinazione)	9,50	8,50	7,50

Fig.5.23 (a) e 5.23 (b): Composizione campioni 14-15 e STD.

I procedimenti adottati e le misurazioni compiute sui campioni sono gli stessi delle prove precedenti, con la sola differenza che la macinazione a secco non è stata effettuata utilizzando la mole, ma manualmente con pestello e mortaio, per non lasciare residui di polvere colorata negli interstizi della mole macinatrice, i quali avrebbero potuto inquinare le prove successive.

Dalle misurazioni effettuate sono stati ottenuti i dati sotto riportati.

n. prova	DENSITA' (gr/l)	VISCOSITA' (sec)	RESIDUO (%)
STD	1702	23	0,93
14	1705	24	0,66
15	1697	23	0,89

Tab. 5.24: Densità, viscosità, residuo dei campioni.

RITIRO DI COTTURA											
n. prova	dimensioni in ESSICCATO (mm)					dimensioni in COTTO (mm)					ritiro di cottura %
	provino 1		provino 2		media	provino 1		provino 2		media	
	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4		lato 1	lato 2	lato 3	lato 4		
STD	10,070	10,066	10,072	10,070	10,070	9,296	9,293	9,285	9,285	9,290	7,74
14	10,075	10,071	10,072	10,068	10,072	9,279	9,280	9,282	9,279	9,280	7,86
15	10,080	10,070	10,075	10,068	10,073	9,270	9,272	9,275	9,269	9,272	7,96

Tab.5.25: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di ritiro di cottura.

PERDITA AL FUOCO							
n. prova	peso ESSICCATO (gr)			peso COTTO (gr)			perdita al fuoco %
	provino 1		media	provino 1		media	
	provino 2	provino 2		provino 2	provino 2		
STD	77,069	77,488	77,279	74,645	75,045	74,845	3,15
14	77,199	77,201	77,200	74,598	74,596	74,597	3,37
15	77,584	77,117	77,341	74,899	74,470	74,685	3,43

Tab.5.26: Riassunto dati riguardanti le percentuali di perdita al fuoco.

ASSORBIMENTO D'ACQUA							
n. prova	peso COTTO (gr)			peso UMIDO (gr)			assorbimento %
	provino 1		media	provino 1		media	
	provino 2	provino 2		provino 2	provino 2		
STD	74,65	75,05	74,845	74,671	75,073	74,872	0,036
14	74,60	74,60	74,597	74,607	74,606	74,607	0,013
15	74,90	74,47	74,685	74,907	74,477	74,692	0,010

Tab.5.27: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di assorbimento d'acqua.

COLORIMETRIA			
n. prova	L	a	b
STD	42,84	0,61	0,87
14	42,37	0,74	1,34
15	43,60	0,80	1,51

Tab.5.28: Risultati ottenuti dall'analisi spettrometrica sui campioni.

Come ci si aspettava tutti i dati relativi alla densità, viscosità, residuo, ritiro, perdita al fuoco e assorbimento sono in linea con quelli ottenuti nella prova 9.

Per quanto riguarda la colorimetria, si è effettivamente riscontrato che l'aggiunta di fanghi, rendendo più scuro l'impasto, può determinare una riduzione nel consumo di pigmento nero: l'azienda ha in progetto la riformulazione dell'impasto tenendo presente questi risultati preliminari.

4° PREPARAZIONE

Ritornando agli obiettivi di partenza, valutando i dati del ritiro ottenuti dalle prove 11, 12, 13, si è scelto di diminuire ulteriormente la sabbia feldspatica fino alla sua completa eliminazione; con questi presupposti sono stati prodotti i campioni 16 e 17

Riepilogando:

4° Preparazione		
N° campione	Materiale riciclato aggiunto	% di materiale riciclato
STD	-	-
16	Vetro sodico calcico	10
17	Vetro sodico calcico	10

Tab. 5.29: Riepilogo 4° preparazione.

MATERIALE	STD	VETRO SOD.CAL	
		16	17
argilla ucraina A	27,21	27,21	27,21
argilla ucraina B	11,88	11,88	11,88
feldspato sodico	12,55		
feldspato potassico	12,57	27,51	33,9
sabbia feldspatica potassica	18,78	6,39	
caolino	12,57	12,57	12,57
scarto crudo	4,44	4,44	4,44
vetro sodico calcico (post consumer)		10	10
TOTALE	100,00	100,00	100,00
fluidificante liquido	1	1	1
acqua	50	50	50

PESATA DA 500GR			
MATERIALE	STD	VETRO SOD.CAL	
		16	17
argilla ucraina A	136,05	136,05	136,05
argilla ucraina B	59,40	59,40	59,40
feldspato sodico	62,75	-	-
feldspato potassico	62,85	137,55	169,50
sabbia feldspatica potassica	93,90	31,95	-
caolino	62,85	62,85	62,85
scarto crudo	22,20	22,20	22,20
vetro sodico calcico (post consumer)	-	50,00	50,00
TOTALE	500,00	500,00	500,00
fluidificante liquido	5,00	5,00	5,00
acqua	250,00	250,00	250,00

Fig.5.29 (a) e 5.29 (b): Composizione campioni 16-17 e STD

Tutti i provini sono stati preparati con lo stesso procedimento e sottoposti agli stessi controlli descritti inizialmente.

n. prova	DENSITA' (gr/l)	VISCOSITA' (sec)	RESIDUO (%)
STD	1695	23	0,82
16	1690	23	0,81
17	1681	24	0,76

Tab. 5.30: Densità, viscosità, residuo dei campioni.

RITIRO DI COTTURA												
n. prova	dimensioni in ESSICCATO (mm)					dimensioni in COTTO (mm)					ritiro di cottura %	
	provino 1		provino 2			provino 1		provino 2				media
	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4	media	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4	media		
STD	10,079	10,073	10,082	10,071	10,076	9,287	9,289	9,289	9,288	9,288	7,82	
16	10,059	10,061	10,060	10,061	10,060	9,559	9,567	9,543	9,549	9,555	5,03	
17	10,070	10,062	10,073	10,063	10,067	9,683	9,690	9,686	9,682	9,685	3,79	

Tab. 5.31: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di ritiro di cottura.

PERDITA AL FUOCO							
n. prova	peso ESSICCATO (gr)			peso COTTO (gr)			perdita al fuoco %
	provino 1	provino 2	media	provino 1	provino 2	media	
STD	78,261	78,187	78,224	75,655	75,585	75,620	3,33
16	77,210	77,065	77,138	73,995	73,861	73,928	4,16
17	77,128	77,241	77,185	74,204	74,339	74,272	3,77

Tab. 5.32: Riassunto dati riguardanti le percentuali di perdita al fuoco.

ASSORBIMENTO D'ACQUA							
n. prova	peso COTTO (gr)			peso UMIDO (gr)			assorbimento %
	provino 1	provino 2	media	provino 1	provino 2	media	
STD	75,66	75,59	75,620	75,676	75,615	75,646	0,034
16	74,00	73,86	73,928	74,000	73,858	73,929	0,001
17	74,20	74,34	74,272	74,205	74,340	74,273	0,001

Tab. 5.33: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di assorbimento d'acqua.

COLORIMETRIA			
n. prova	L	A	B
STD	68,03	4,03	12,62
16	66,17	3,68	12,86
17	68,59	2,91	12,39

Tab.5.34: Risultati ottenuti dall'analisi spettrometrica sui campioni.

I risultati hanno confermato che il feldspato potassico provoca un marcato effetto fondente; la percentuale di ritiro cala vertiginosamente, la differenza delle dimensioni rispetto alla piastrella standard è immediatamente visibile anche ad una semplice analisi ad occhio nudo.

Inoltre sulla superficie del campione 17 è stata riscontrata una rugosità superficiale piuttosto marcata, causata probabilmente dal fatto che il provino è andato in sovra cottura, cioè la temperatura del ciclo di cottura a cui è stato sottoposto è superiore alla temperatura di greificazione per quel tipo di composizione chimica.

I campioni 16 e 17 ci hanno pertanto confermato che l'eurite è sicuramente il minerale più fondente tra i due feldspati considerati.

Le cause di questa differenza sono da ricercare nella minor percentuale di silice presente, unito al fatto che si tratta di un feldspato puro mentre la sabbia è una miscela eterogenea.

5° PREPARAZIONE

Una volta dimostrato che il feldspato potassico provocava una eccessiva azione fondente durante la cottura, sono stati preparati i provini 18 e 19 in cui la quantità di eurite è stata progressivamente diminuita fino alla completa eliminazione, e sostituita da un aumento di sabbia feldspatica.

Riepilogando:

5° Preparazione		
N° campione	Materiale riciclato aggiunto	% di materiale riciclato
STD	-	-
18	Vetro sodico calcico	10
19	Vetro sodico calcico	10

Tab.5.35: Riepilogo 5° preparazione.

MATERIALE	STD	VETRO SOD.CALC	
		18	19
argilla ucraina A	27,21	27,21	27,21
argilla ucraina B	11,88	11,88	11,88
feldspato sodico	12,55		
feldspato potassico	12,57	6,285	
sabbia feldspatica potassica	18,78	27,615	33,9
caolino	12,57	12,57	12,57
scarto crudo	4,44	4,44	4,44
vetro sodico calcico (post consumer)		10	10
TOTALE	100,00	100,00	100,00
fluidificante liquido	1	1	1
acqua	50	50	50

Tab. 5.36 (a): Composizione campioni 18-19 e STD.

PESATA DA 500 GR			
MATERIALE	STD	VETRO SOD.CALC	
		18	19
argilla ucraina A	136,05	136,05	136,05
argilla ucraina B	59,40	59,40	59,40
feldspato sodico	62,75	-	-
feldspato potassico	62,85	31,43	-
sabbia feldspatica potassica	93,90	138,08	169,50
caolino	62,85	62,85	62,85
scarto crudo	22,20	22,20	22,20
vetro sodico calcico (post consumer)	-	50,00	50,00
TOTALE	500,00	500,00	500,00
fluidificante liquido	5,00	5,00	5,00
acqua	250,00	250,00	250,00

Tab. 5.36 (b): Composizione campioni 18-19 e STD.

Tutti i provini sono stati preparati con lo stesso procedimento e sottoposti agli stessi controlli descritti inizialmente.

n. prova	DENSITA' (gr/l)	VISCOSITA (sec)	RESIDUO (%)
STD	1683	22	1,01
18	1688	24	0,94
19	1681	23	0,96

Tab. 5.37: Densità, viscosità, residuo dei campioni.

RITIRO DI COTTURA											
n. prova	dimensioni in ESSICCATO (mm)					dimensioni in COTTO (mm)					ritiro di cottura %
	provino 1		provino 2			provino 1		provino 2			
	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4	media	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4	media	
STD	10,069	10,065	10,072	10,067	10,068	9,316	9,317	9,304	9,304	9,310	7,53
18	10,068	10,058	10,069	10,064	10,065	9,318	9,317	9,318	9,310	9,316	7,44
19	10,064	10,070	10,066	10,063	10,066	9,277	9,273	9,273	9,257	9,270	7,91

Tab. 5.38: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di ritiro di cottura.

PERDITA AL FUOCO							
n. prova	peso ESSICCATO (gr)			peso COTTO (gr)			perdita al fuoco %
	provino 1		provino 2	provino 1		provino 2	
			media			media	
STD	77,526	77,366	77,446	74,867	74,717	74,792	3,43
18	77,237	77,461	77,349	74,700	74,886	74,793	3,30
19	77,327	77,324	77,326	74,846	74,849	74,848	3,20

Tab. 5.39: Riassunto dati riguardanti le percentuali di perdita al fuoco.

ASSORBIMENTO D'ACQUA							
n. prova	peso COTTO (gr)			peso UMIDO (gr)			assorbim ento %
	provino 1	provino 2	media	provino 1	provino 2	media	
STD	74,87	74,72	74,792	74,880	74,740	74,810	0,024
18	74,70	74,89	74,793	74,702	74,889	74,796	0,003
19	74,85	74,85	74,848	74,848	74,851	74,850	0,003

Tab.5.40: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di assorbimento d'acqua.

COLORIMETRIA			
n. prova	L	A	B
STD	68,06	4,02	13,55
18	63,56	4,23	14,07
19	62,23	4,56	13,78

Tab. 5.41: Risultati ottenuti dall'analisi spettrometrica sui campioni.

I dati raccolti dalle misurazioni hanno confermato che la sabbia feldspatica provoca una azione fondente molto più contenuta, infatti i valori del ritiro percentuale sono ritornati in linea con quello dello standard.

Sono stati ottenuti anche buoni valori di assorbimento e la colorazione, sebbene leggermente più scura (i valori del parametro L sono più bassi), non ha subito marcate variazioni.

6° PREPARAZIONE

Per cercare di ottenere la percentuale di ritiro più vicina possibile a quella dello standard, visto che dai campioni 18 e 19 ne erano risultate rispettivamente, una minore e una maggiore, è stato preparato un ultimo impasto (20), con una composizione intermedia tra la prova 18 e 19.

Riepilogando:

6° Preparazione		
N° campione	Materiale riciclato aggiunto	% di materiale riciclato
20	Vetro sodico calcico	10

Tab. 5.42: Riepilogo 6° preparazione.

MATERIALE	STD	VETRO	MATERIALE	STD	VETRO
		20			20
argilla ucraina A	27,21	27,21	argilla ucraina A	136,05	136,05
argilla ucraina B	11,88	11,88	argilla ucraina B	59,40	59,40
feldspato sodico	12,55		feldspato sodico	62,75	-
feldspato potassico	12,57	3,1425	feldspato potassico	62,85	15,71
sabbia feldspatica potassica	18,78	30,7575	sabbia feldspatica potassica	93,90	153,79
caolino	12,57	12,57	caolino	62,85	62,85
scarto crudo	4,44	4,44	scarto crudo	22,20	22,20
vetro sodico calcico (post consumer)		10	vetro sodico calcico (post consumer)	-	50,00
TOTALE	100,00	100,00	TOTALE	500,00	500,00
fluidificante liquido	1	1	fluidificante liquido	5,00	5,00
acqua	50	50	acqua	250,00	250,00

Tab. 5.43(a) e 5.43(b): Composizione campione 20 e STD.

Per la preparazione e le misurazioni sono state seguite le stesse procedure descritte inizialmente.

n. prova	DENSITA' (gr/l)	VISCOSITA' (sec)	RESIDUO (%)
STD	1683	22	1,01
20	1685	22	0,95

Tab. 5.44: Densità, viscosità, residuo dei campioni.

RITIRO DI COTTURA											
n. prova	dimensioni in ESSICCATO (mm)					dimensioni in COTTO (mm)					ritiro di cottura %
	provino 1		provino 2		media	provino 1		provino 2		media	
	lato 1	lato 2	lato 3	lato 4		lato 1	lato 2	lato 3	lato 4		
STD	10,070	10,069	10,068	10,069	10,069	9,283	9,279	9,280	9,281	9,281	7,83
20	10,063	10,066	10,070	10,064	10,066	9,274	9,276	9,289	9,294	9,283	7,77

Tab. 5.45: Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di ritiro di cottura.

PERDITA AL FUOCO							
n. prova	peso ESSICCATO (gr)			peso COTTO (gr)			perdita al fuoco %
	provino 1	provino 2	media	provino 1	provino 2	media	
STD	77,515	77,719	77,617	75,043	75,117	75,080	3,27
20	77,667	77,735	77,701	75,151	75,302	75,227	3,18

Tab.5.46: Riassunto dati riguardanti le percentuali di perdita al fuoco.

ASSORBIMENTO D'ACQUA							
n. prova	peso COTTO (gr)			peso UMIDO (gr)			assorbimento %
	provino 1	provino 2	media	provino 1	provino 2	media	
STD	75,04	75,12	75,080	75,073	75,150	75,112	0,042
20	75,15	75,30	75,227	75,153	75,302	75,228	0,001

Tab.5.47 : Riassunto dei dati riguardanti le percentuali di assorbimento d'acqua.

COLORIMETRIA			
n. prova	L	A	B
STD	67,32	4,02	13,12
20	62,92	4,38	13,43

Tab. 5.48: Risultati ottenuti dall'analisi spettrometrica sui campioni.

I dati ottenuti mostrano un ulteriore avvicinamento del valore del ritiro al riferimento standard.

5.1.3 RISULTATI

La serie di prove portate a termine presso il laboratorio di Cerdomus Ceramiche ha permesso di ottenere i seguenti risultati:

- è stato dimostrato che il feldspato potassico provoca una azione fondente in cottura molto maggiore rispetto alla sabbia feldspatica potassica, ciò è causato dalla minore quantità di silice presente e dalla maggiore purezza della materia prima che rende quindi gli elementi fondenti (Na, Ca, K, Mg) più disponibili durante le reazioni ad alte temperature.
- Sono stati ottenuti impasti di gres porcellanato, contenenti significative quantità vetro sodico calcico riciclato (fino al 10%), mantenendo la differenza del ritiro in fase di cottura, rispetto allo standard, molto contenuta (entro i limiti di tolleranza). Si tratta in particolare dei campioni numero 3 (6%) e 20 (10%).
- E' stato ottenuto un impasto di gres porcellanato che dai dati relativi al ritiro e dall'analisi dell'aspetto superficiale, fanno ipotizzare un abbassamento della temperatura di cottura; si tratta del campione numero 17 (10%).

5.2 CARATTERIZZAZIONE DEGLI IMPASTI SELEZIONATI PRESSO CENTRO CERAMICO

Come accennato precedentemente, la fase successiva alla preparazione degli impasti presso Cerdomus, è stata la scelta di quelli che più facevano riscontrare risultati in linea con gli obiettivi della ricerca (campioni numero 3, 20, 17).

Successivamente questi impasti sono stati studiati in modo più approfondito, effettuando una serie di analisi riguardo il comportamento in fase di cottura (curve di greificazione e assorbimento), le caratteristiche meccaniche (determinazione della resistenza a flessione) e la porosità e composizione interna, attraverso l'osservazione al microscopio elettronico a scansione (SEM).

Queste analisi sono state effettuate presso i laboratori del Centro Ceramico di Bologna, il quale ha messo a disposizione attrezzature e personale specializzato.

5.2.1 MATERIALI

Per effettuare le prove precedentemente citate è stato necessario preparare presso il laboratorio tecnologico di Cerdomus:

- 1 kg circa di impasto macinato e umidificato al 6% per ognuno dei campioni selezionati (standard, 3, 20, 17). La preparazione di quest'ultimo è stata eseguita seguendo lo stesso iter descritto nelle pagine precedenti.
- 10 piastrelline cotte, per ognuno dei campioni selezionati (std, 3, 20, 17) di dimensioni circa 50x100 mm. Anche per la loro preparazione è stato seguito esattamente il procedimento descritto precedentemente.

impasto >	STD		Argilla ucraina A		Argilla ucraina B		Feldspato sodico		Sabbia feldspatica potassica		Eurite (feldspato potassico)		Caolino		Scarto crudo	
	totale	100,0	quantità:	27,21	quantità:	11,88	quantità:	12,55	quantità:	18,78	quantità:	12,57	quantità:	12,57	quantità:	4,44
elementi	analisi chimica calcolata:	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati							
SiO ₂	70,37	63,81	17,36	65,80	7,82	72,81	9,14	79,10	14,85	73,50	9,24	70,80	8,90	68,89	3,06	
Al ₂ O ₃	18,14	23,50	6,39	22,77	2,71	16,30	2,05	11,00	2,07	14,95	1,88	17,20	2,16	20,01	0,89	
TiO ₂	0,63	1,35	0,37	1,10	0,13	0,26	0,03	0,06	0,01	0,15	0,02	0,20	0,03	0,89	0,04	
Fe ₂ O ₃	0,84	1,15	0,31	0,98	0,12	0,10	0,01	0,60	0,11	0,65	0,08	1,30	0,16	0,90	0,04	
CaO	0,55	0,30	0,08	0,34	0,04	0,48	0,06	0,80	0,15	1,30	0,16	0,30	0,04	0,43	0,02	
MgO	0,36	0,58	0,16	0,49	0,06	0,11	0,01	0,20	0,04	0,40	0,05	0,20	0,03	0,43	0,02	
K ₂ O	2,99	2,00	0,54	1,83	0,22	0,25	0,03	4,50	0,85	5,95	0,75	4,00	0,50	2,36	0,10	
Na ₂ O	2,07	0,47	0,13	0,24	0,03	9,20	1,15	3,20	0,60	0,20	0,03	0,80	0,10	0,83	0,04	
B ₂ O ₃	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Zr ₂ O	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
Altro	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00	
P.F.	4,04	6,84	1,86	6,45	0,77	0,49	0,06	0,54	0,10	2,90	0,36	5,20	0,65	5,26	0,23	
	100,00	100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		

Tab. 5.49: Composizione chimica dell' impasto standard di riferimento.

impasto >	3		Argilla ucraina A		Argilla ucraina B		Feldspato sodico		Sabbia feldspatica potassica		Eurite (feldspato potassico)		Caolino		Scarto Crudo		VETRO SODICO CALCICO		
	totale	100,0	quantità:	27,21	quantità:	11,88	quantità:	6,55	quantità:	18,78	quantità:	12,57	quantità:	12,57	quantità:	4,44	quantità:	6,00	
elementi	analisi chimica calcolata:	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati						
SiO2	70,32	63,81	17,36	65,80	7,82	72,81	4,77	79,10	14,85	73,50	9,24	70,80	8,90	68,89	3,06	72,00	4,32		
Al2O3	17,31	23,50	6,39	22,77	2,71	16,30	1,07	11,00	2,07	14,95	1,88	17,20	2,16	20,01	0,89	2,48	0,15		
TiO2	0,61	1,35	0,37	1,10	0,13	0,26	0,02	0,06	0,01	0,15	0,02	0,20	0,03	0,89	0,04	0,07	0,00		
Fe2O3	0,85	1,15	0,31	0,98	0,12	0,10	0,01	0,60	0,11	0,65	0,08	1,30	0,16	0,90	0,04	0,35	0,02		
CaO	1,11	0,30	0,08	0,34	0,04	0,48	0,03	0,80	0,15	1,30	0,16	0,30	0,04	0,43	0,02	9,70	0,58		
MgO	0,48	0,58	0,16	0,49	0,06	0,11	0,01	0,20	0,04	0,40	0,05	0,20	0,03	0,43	0,02	2,00	0,12		
K2O	3,04	2,00	0,54	1,83	0,22	0,25	0,02	4,50	0,85	5,95	0,75	4,00	0,50	2,36	0,10	1,00	0,06		
Na2O	2,26	0,47	0,13	0,24	0,03	9,20	0,60	3,20	0,60	0,20	0,03	0,80	0,10	0,83	0,04	12,25	0,74		
B2O3	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
Zr2O	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
Altro	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
P.F.	4,02	6,84	1,86	6,45	0,77	0,49	0,03	0,54	0,10	2,90	0,36	5,20	0,65	5,26	0,23	0,15	0,01		
	100,00	100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00	

Tab. 5.50: Composizione chimica dell' impasto 3.

impasto >	20		Argilla ucraina A		Argilla ucraina B		Feldspato sodico		Sabbia feldspatica potassica		Eurite (feldspato potassico)		Caolino		Scarto Crudo		VETRO SODICO CALCICO		
	totale	100,0	quantità:	27,21	quantità:	11,88	quantità:	0,00	quantità:	30,76	quantità:	3,14	quantità:	12,57	quantità:	4,44	quantità:	10,00	
elementi	analisi chimica calcolata:	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati						
SiO2	70,98	63,81	17,36	65,80	7,82	72,81	0,00	79,10	24,33	73,50	2,31	70,80	8,90	68,89	3,06	72,00	7,20		
Al2O3	16,25	23,50	6,39	22,77	2,71	16,30	0,00	11,00	3,38	14,95	0,47	17,20	2,16	20,01	0,89	2,48	0,25		
TiO2	0,59	1,35	0,37	1,10	0,13	0,26	0,00	0,06	0,02	0,15	0,00	0,20	0,03	0,89	0,04	0,07	0,01		
Fe2O3	0,87	1,15	0,31	0,98	0,12	0,10	0,00	0,60	0,18	0,65	0,02	1,30	0,16	0,90	0,04	0,35	0,04		
CaO	1,44	0,30	0,08	0,34	0,04	0,48	0,00	0,80	0,25	1,30	0,04	0,30	0,04	0,43	0,02	9,70	0,97		
MgO	0,53	0,58	0,16	0,49	0,06	0,11	0,00	0,20	0,06	0,40	0,01	0,20	0,03	0,43	0,02	2,00	0,20		
K2O	3,04	2,00	0,54	1,83	0,22	0,25	0,00	4,50	1,38	5,95	0,19	4,00	0,50	2,36	0,10	1,00	0,10		
Na2O	2,51	0,47	0,13	0,24	0,03	9,20	0,00	3,20	0,98	0,20	0,01	0,80	0,10	0,83	0,04	12,25	1,23		
B2O3	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
Zr2O	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
Altro	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
P.F.	3,79	6,84	1,86	6,45	0,77	0,49	0,00	0,54	0,17	2,90	0,09	5,20	0,65	5,26	0,23	0,15	0,02		
	100,00	100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00	

Tab. 5.51: Composizione chimica dell' impasto 20.

impasto >	17		Argilla ucraina A		Argilla ucraina B		Feldspato sodico		Sabbia feldspatica potassica		Eurite (feldspato potassico)		Caolino		Scarto Crudo		VETRO SODICO CALCICO		
	totale	100,0	quantità:	27,21	quantità:	11,88	quantità:	0,00	quantità:	0,00	quantità:	33,90	quantità:	12,57	quantità:	4,44	quantità:	10,00	
elementi	analisi chimica calcolata:	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati	analisi chimica	elementi apportati						
SiO2	69,25	63,81	17,36	65,80	7,82	72,81	0,00	79,10	0,00	73,50	24,92	70,80	8,90	68,89	3,06	72,00	7,20		
Al2O3	17,47	23,50	6,39	22,77	2,71	16,30	0,00	11,00	0,00	14,95	5,07	17,20	2,16	20,01	0,89	2,48	0,25		
TiO2	0,62	1,35	0,37	1,10	0,13	0,26	0,00	0,06	0,00	0,15	0,05	0,20	0,03	0,89	0,04	0,07	0,01		
Fe2O3	0,89	1,15	0,31	0,98	0,12	0,10	0,00	0,60	0,00	0,65	0,22	1,30	0,16	0,90	0,04	0,35	0,04		
CaO	1,59	0,30	0,08	0,34	0,04	0,48	0,00	0,80	0,00	1,30	0,44	0,30	0,04	0,43	0,02	9,70	0,97		
MgO	0,60	0,58	0,16	0,49	0,06	0,11	0,00	0,20	0,00	0,40	0,14	0,20	0,03	0,43	0,02	2,00	0,20		
K2O	3,49	2,00	0,54	1,83	0,22	0,25	0,00	4,50	0,00	5,95	2,02	4,00	0,50	2,36	0,10	1,00	0,10		
Na2O	1,59	0,47	0,13	0,24	0,03	9,20	0,00	3,20	0,00	0,20	0,07	0,80	0,10	0,83	0,04	12,25	1,23		
B2O3	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
Zr2O	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
Altro	0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		0,00		
P.F.	4,51	6,84	1,86	6,45	0,77	0,49	0,00	0,54	0,00	2,90	0,98	5,20	0,65	5,26	0,23	0,15	0,02		
	100,00	100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00		100,00	

Tab. 5.52: Composizione chimica dell' impasto 17.

5.2.2 METODI

DETERMINAZIONE DELLE CURVE DI GREIFICAZIONE

Le curve di greificazione mostrano l'andamento del ritiro lineare e dell'assorbimento di acqua da parte della piastrella, in funzione della temperatura che si raggiunge in cottura.

Per ottenere condizioni ottimali di cottura si cerca di avere andamenti in cui si hanno, nella curva relativa ai ritiri, tratti piani più estesi possibili, che prevedono quindi una certa stabilità dimensionale alle temperature più elevate.

Il grafico si ottiene cuocendo i provini in un apposito forno elettrico a gradienti, programmabile e dotato di 6 celle in cui viene raggiunta in ognuna una temperatura diversa.

Procedimento:

- Pressatura di almeno 6 provini (piccoli dischetti di circa 40 mm di diametro e 8mm di spessore) partendo da impasto macinato e umidificato. Per la prova è stata utilizzata una pressa idraulica manuale per provini ceramici.

Pressione di pressatura: 45 MPa

- Numerazione e misurazione dello spessore (mm), dimensione nel diametro (mm) e del peso (g) con calibro e bilancia digitale.
- Essiccamento dei provini a 110 °C per almeno 3 ore.
- Misurazione del diametro e del peso di ogni provino essiccato e raffreddato.
- Posizionamento di 6 dischetti all'interno delle celle del forno a gradienti nell'ordine indicato dalla tabella sottostante.

N° cella	5	3	1	2	4	6
Temp.max raggiunta (°C)	1180	1220	1260	1240	1200	1160
N° provino	2	4	6	5	3	1

Tab. 5.53: Temperature e posizionamento dei provini nel forno a gradienti.

- Programmazione del ciclo di cottura (tempi, temperatura massima e differenza di temperatura tra una cella e l'altra) in modo che le celle intermedie raggiungano le condizioni di cottura del forno industriale, di cui dispone l'azienda. In questo caso i forni presenti in Cerdomus raggiungono 1210 °C.

CICLO N° 16

FASE	DURATA (min)	GRADI/MINUTO	TEMP.MAX. RAGGIUNTA(°C)
1	10	60	600
2	30	-	600
3	30	22	1260
4	40	-	1260

Tab. 5.54: Ciclo utilizzato per le prove su tutti gli impasti selezionati

- Avvio della cottura: essa richiede circa una giornata intera, non per il tempo necessario a raggiungere la greificazione (150 minuti) ma piuttosto per il tempo necessario al completo raffreddamento in condizioni naturali.
- A ciclo concluso, prelievo dei campioni e misurazione delle dimensioni del diametro e del peso
- Posizionamento dei dischetti sinterizzati all'interno di un becker di vetro, si ricopre il fondo con uno strato di biglie; si riempie il contenitore con acqua distillata e si lascia bollire per almeno due ore.
- Asciugatura dei dischetti con panno di pelle di daino, dopo averli fatti raffreddare in acqua, fino a temperatura ambiente.
- Misurazione del peso umido (g).
- Misura del ritiro lineare e assorbimento d'acqua per ogni campione e tracciamento degli andamenti.



Fig. 5.18: Forno a gradienti.



Fig. 5.19: Disposizione dei dischetti pressati nelle celle del forno a gradienti.



Fig. 5.20: Particolare di una cella del forno a gradienti

DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA A FLESSIONE E DELLA FORZA DI ROTTURA (UNI EN ISO 10545- 4)

Per la determinazione della resistenza a flessione è stato necessario attenersi alle disposizioni previste dalla norma EN ISO 10545- 4; è stato possibile determinare:

- *Carico di rottura (F)*: forza, espressa in newton, necessaria per provocare la rottura del provino, come rilevata dal manometro.
- *Sforzo di rottura (S)*: forza, espressa in newton, ottenuta moltiplicando il carico di rottura per il rapporto (distanza fra i rulli di supporto)/(larghezza del campione).

$$S = \frac{FL}{b}$$

- *Modulo di rottura (resistenza a flessione- R)*: quantità, espressa in N/mm², ottenuta dividendo lo sforzo di rottura calcolato per il quadrato dello spessore minimo misurato lungo il bordo della rottura.

$$R = \frac{3FL}{2bh^2} = \frac{3S}{2h^2}$$

La prova ha previsto la determinazione delle caratteristiche meccaniche sopra citate, per mezzo di una forza applicata , con incremento predefinito, al centro della piastrella, con il punto di applicazione in contatto con la superficie di esercizio della stessa.

Il macchinario utilizzato come prevede la norma, è dotato di:

- due rulli di supporto cilindrici, di metallo, aventi le parti a contatto col campione di prova ricoperte di gomma (uno di questi deve potersi inclinare leggermente e l'altro deve poter ruotare leggermente attorno al proprio asse)
- rullo centrale cilindrico, dello stesso diametro dei rulli di supporto e ricoperto con la stessa gomma, che trasmette il carico F (anche questo rullo deve potersi inclinare leggermente)

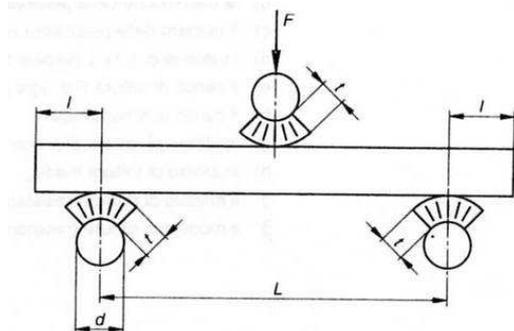


Fig. 5.21 :Condizioni di appoggio della piastrella.

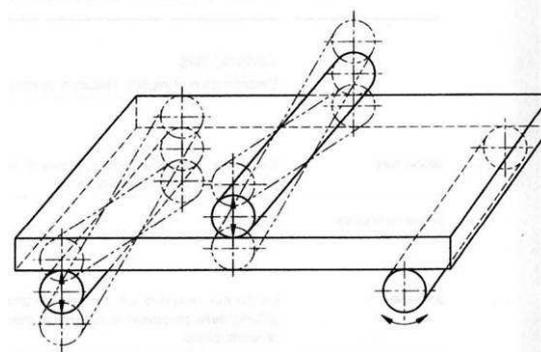


Fig. 5.22: Fissaggio dei rulli

Sono stati scelti i provini in modo casuale all'interno del lotto da testare, il numero minimo di piastrelle di prova ci è stato fornito dalla norma, la quale prevede minimo 7 piastrelle se le sue dimensioni superano i 48 mm, 10 se le dimensioni sono inferiori.

Dopo aver rimosso le particelle residue aderenti al retro di ogni provino, sono stati posti, uno alla volta, sui rulli di supporto con la superficie di esercizio verso l'alto, in modo che sporga della lunghezza /all'esterno di ogni rullo di supporto.

Successivamente è stato collocato il rullo centrale a distanza uguale da ciascuno dei rulli di supporto. Dopo aver programmato il dispositivo attraverso l'inserimento dei valori riferiti a lunghezza, larghezza media dei campioni e distanza tra i punti di appoggio, è stata avviata la prova.

Il carico viene applicato in maniera uniforme in modo da ottenere un incremento del carico di 1 N/mm^2 al secondo; dopo la rottura della piastrella è possibile annotare il valore del carico F , visibile sul display.

Per calcolare lo sforzo di rottura medio e la resistenza a flessione media, la norma prevede di considerare solo i risultati ottenuti per i campioni che si sono rotti in una posizione centrale, e di calcolare il valore medio utilizzando un numero minimo di cinque risultati validi.

Tutti i provini sottoposti alla prova hanno dato esiti positivi quindi i valori medi sono stati calcolati utilizzando tutti i 7 valori ottenuti.

Secondo la norma, i criteri di accettabilità prevedono che la media dei valori ottenuti dalla prova sia superiore a 35 MPa e che nessuna delle piastrelle testate faccia rilevare resistenze inferiori a 32 MPa.



Fig.5.23 e 5.24: Foto dello strumento utilizzato per le prova di resistenza a flessione.

OSSERVAZIONE AL MICROSCOPIO ELETTRONICO A SCANSIONE (SEM)

La microscopia elettronica è una tecnica che permette l'osservazione di campioni con ingrandimenti e risoluzione 1000 volte superiore alla microscopia ottica ordinaria. Il Microscopio Elettronico a Scansione sfrutta la generazione di un fascio elettronico ad alta energia nel vuoto.

Il fascio è prodotto da una sorgente di elettroni; essa in genere è costituita da un filo metallico portato ad alta temperatura. L'emissione di elettroni in questo caso avviene per effetto termoionico (emissione indotta termicamente di particelle cariche da parte del materiale).

Gli elettroni espulsi vengono accelerati in una direzione con l'applicazione di una differenza di potenziale e successivamente il fascio viene focalizzato da un sistema di lenti e deflesso per scandire una area del campione.

L'interazione fascio-campione genera vari segnali che vengono acquisiti da opportuni rivelatori e successivamente elaborati fino a formare una immagine a livelli di grigio.

L'immagine ottenuta ha carattere tridimensionale, ovvero ad ogni coppia di coordinate x, y esplorata dal fascio elettronico (che individuano un punto sulla superficie del campione) viene associato un valore z direttamente collegato all'ampiezza del segnale percepito dal rivelatore utilizzato.

L'osservazione al SEM dà indicazioni su: morfologia della superficie del campione, composizione chimico fisica, difettosità elettriche, contaminazione delle superfici. Ulteriori pregi del SEM sono: alta risoluzione (limite 2nm), alti ingrandimenti (fino a 100000x), alta profondità di campo⁷.

La preparazione del campione prevede alcune fasi:

- taglio di una piccola porzione del materiale;
- inglobamento: il campione viene inserito in un contenitore plastico e successivamente immerso in una resina, la quale solidifica e permette di creare una superficie di attacco per le successive lavorazioni;
- levigatura e lappatura della superficie da osservare per eliminare le asperità che non permetterebbero una visione ottimale.

Per l'osservazione al SEM sono stati utilizzati frammenti delle piastrelle recuperate da quelle rotte durante la prova di flessione, svolta precedentemente.

⁷ Profondità di campo: intervallo, misurato lungo l'asse ottico (asse z nel microscopio), entro il quale si può spostare il campione senza che la sua immagine appaia fuori fuoco.

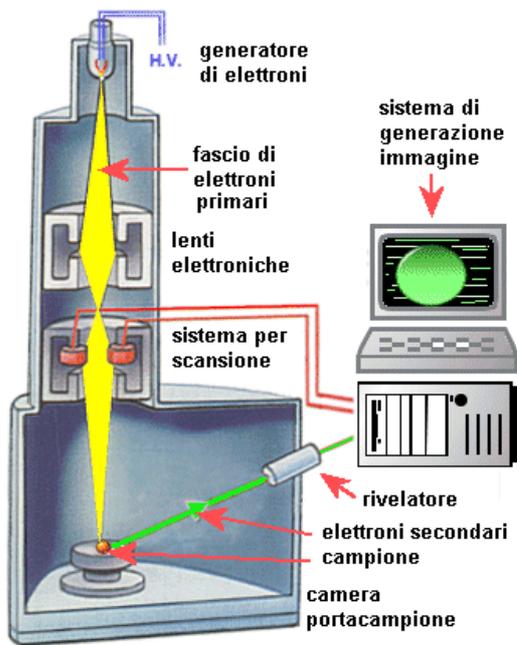


Fig. 5.25 :Schema del funzionamento del microscopio elettronico a scansione



Fig. 5.26 :Foto del microscopio elettronico a scansione presente nel laboratorio del Centro Ceramico.

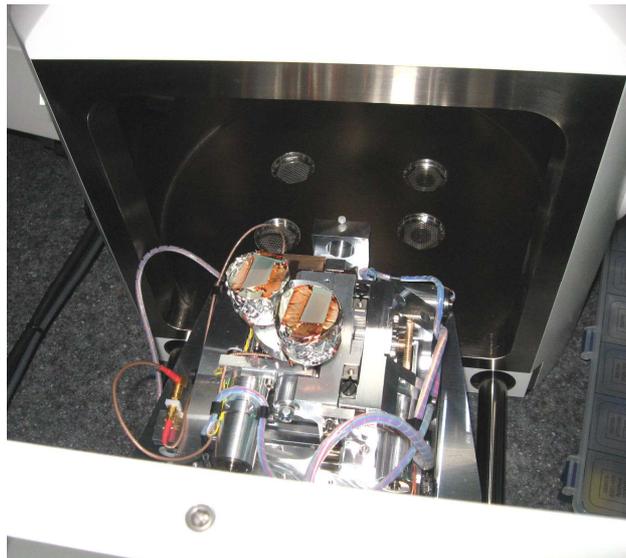


Fig. 5.27 :Posizionamento dei campioni all'interno del microscopio elettronico

5.2.3 RISULTATI

Come è stato spiegato anche precedentemente, le sperimentazioni si sono svolte procedendo su due binari paralleli.

Con i campioni 3 e 20 si è cercato di ottenere un impasto con caratteristiche e comportamento in cottura simili a quello standard, attualmente in produzione; mentre con l'impasto 17 si è voluto sperimentare un gres porcellanato che greificasse a temperature inferiori, che permetta quindi di ridurre la spesa energetica in cottura.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti.

RISULTATI SUGLI IMPASTI 3 E 20

Dati raccolti in fase di pressatura.

STD	VERDE (PRESSATO)			
	Spess. (mm)	diametro (g)	peso (g)	densità (g/cm ³)
N ^o camp				
1	8,13	40,33	20,74	2,00
2	7,80	40,33	19,98	2,01
3	7,39	40,32	18,97	2,01
4	7,86	40,31	20,18	2,01
5	7,60	40,32	19,52	2,01
6	7,34	40,32	18,88	2,02

3	VERDE (PRESSATO)			
	Spess. (mm)	diametro (g)	peso (g)	densità (g/cm ³)
N ^o camp				
1	7,92	40,35	20,03	1,98
2	7,50	40,34	18,93	1,98
3	7,64	40,34	19,42	1,99
4	7,62	40,35	19,26	1,98
5	7,94	40,35	20,13	1,98
6	7,74	40,35	19,57	1,98

20	VERDE (PRESSATO)			
	Spess. (mm)	diametro (g)	peso (g)	densità (g/cm ³)
N ^o camp				
1	7,80	40,32	19,84	1,99
2	7,88	40,29	20,02	1,99
3	7,94	40,32	20,17	1,99
4	8,01	40,32	20,28	1,98
5	8,12	40,32	20,72	2,00
6	8,04	40,31	20,53	2,00

Tab. 5.55, 5.56, 5.57 : Dati ottenuti dopo la pressatura

I dati mostrano che tutti i campioni appartenenti alla stessa tipologia hanno subito le stesse condizioni di pressatura, ciò è desumibile dai valori della densità che non fa registrare valori anomali.

I valori della densità tra le diverse tipologie mostrano lievi differenze tra loro perché l'espansione post-pressatura varia leggermente a causa della presenza in percentuale diverse delle materie prime.

Tutti i dati raccolti confermano la validità di questa fase per ogni dischetto ottenuto.

Dati raccolti dalla cottura dei provini nel forno a gradienti e dopo la verifica dell'assorbimento.

STD	Temp. °C	ESSICCATO		COTTO			Ritiro %	Assorbimento %
		diametro (mm)	peso (g)	diametro (mm)	peso (g)	peso umido (g)		
1	1160	40,34	19,84	37,64	19,17	19,48	6,7	1,62
2	1180	40,33	19,10	37,40	18,46	18,54	7,3	0,43
3	1200	40,33	18,09	37,32	17,47	17,47	7,5	0,00
4	1220	40,33	19,26	37,48	18,61	18,61	7,1	0,00
5	1240	40,33	18,67	37,73	18,04	18,04	6,4	0,00
6	1260	40,33	18,01	38,76	17,39	17,40	3,9	0,06

Tab. 5.58: Dati ottenuti dopo la cottura e verifica dell'assorbimento del campione STD.

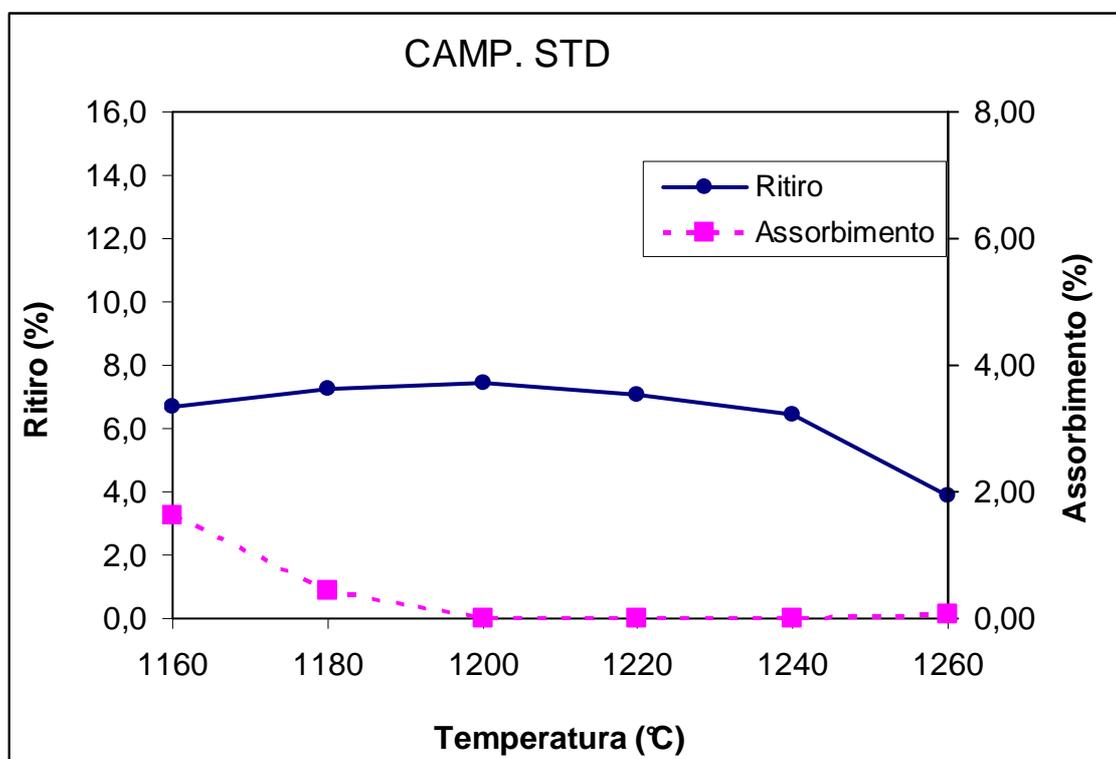


Fig. 5.28: Curva di greificazione del campione STD

3	Temp. °C	ESSICCATO		COTTO			Ritiro %	Assorbimento %
		diametro (mm)	peso (g)	diametro (mm)	peso (g)	peso umido (g)		
N°camp								
1	1160	40,32	19,15	37,61	18,50	18,83	6,7	1,78
2	1180	40,32	18,13	37,31	17,47	17,57	7,5	0,57
3	1200	40,32	18,55	37,29	17,89	17,89	7,5	0,00
4	1220	40,32	18,43	37,55	17,76	17,76	6,9	0,00
5	1240	40,32	19,24	38,04	18,55	18,55	5,7	0,00
6	1260	40,32	18,71	40,26	18,06	18,09	0,1	0,17

Tab. 5.59 : Dati ottenuti dopo la cottura e verifica dell'assorbimento del campione 3.

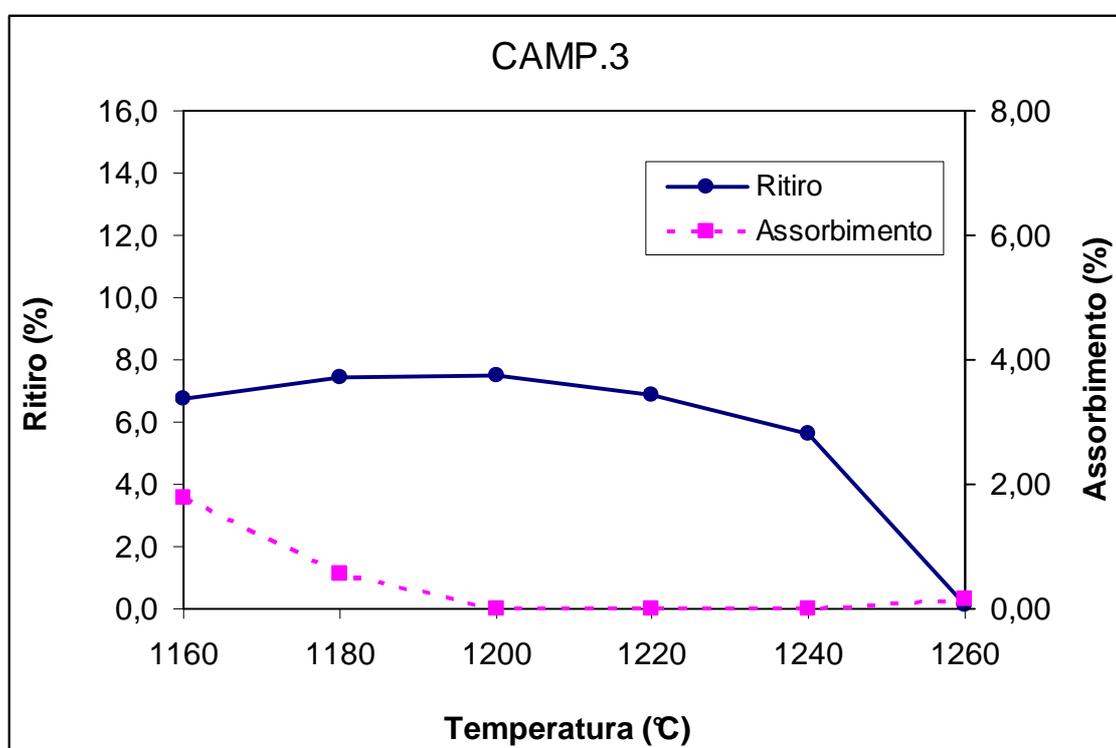


Fig. 5.29: Curva di greificazione del campione 3.

20	Temp. °C	ESSICCATO		COTTO			Ritiro %	Assorbimento %
		diametro (mm)	peso (g)	diametro (mm)	peso	peso umido (g)		
N°camp								
1	1160	40,29	18,88	37,59	18,26	18,56	6,7	1,64
2	1180	40,29	19,08	37,35	18,46	18,58	7,3	0,65
3	1200	40,29	19,23	37,43	18,60	18,60	7,1	0,00
4	1220	40,29	19,33	37,64	18,70	18,70	6,6	0,00
5	1240	40,29	19,74	37,96	19,10	19,10	5,8	0,00
6	1260	40,30	19,54	39,09	18,91	18,92	3,0	0,05

Tab. 5.60: Dati ottenuti dopo la cottura e verifica dell'assorbimento del campione 20.

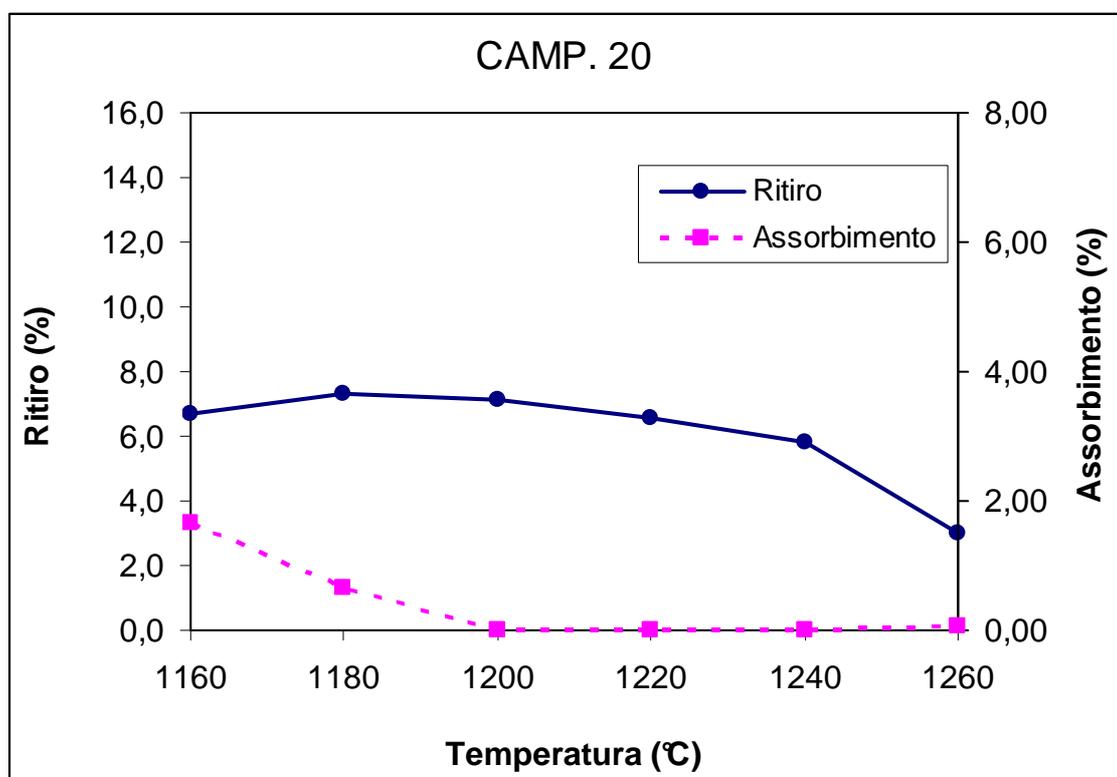


Fig. 5.30: Curva di greificazione del campione 20

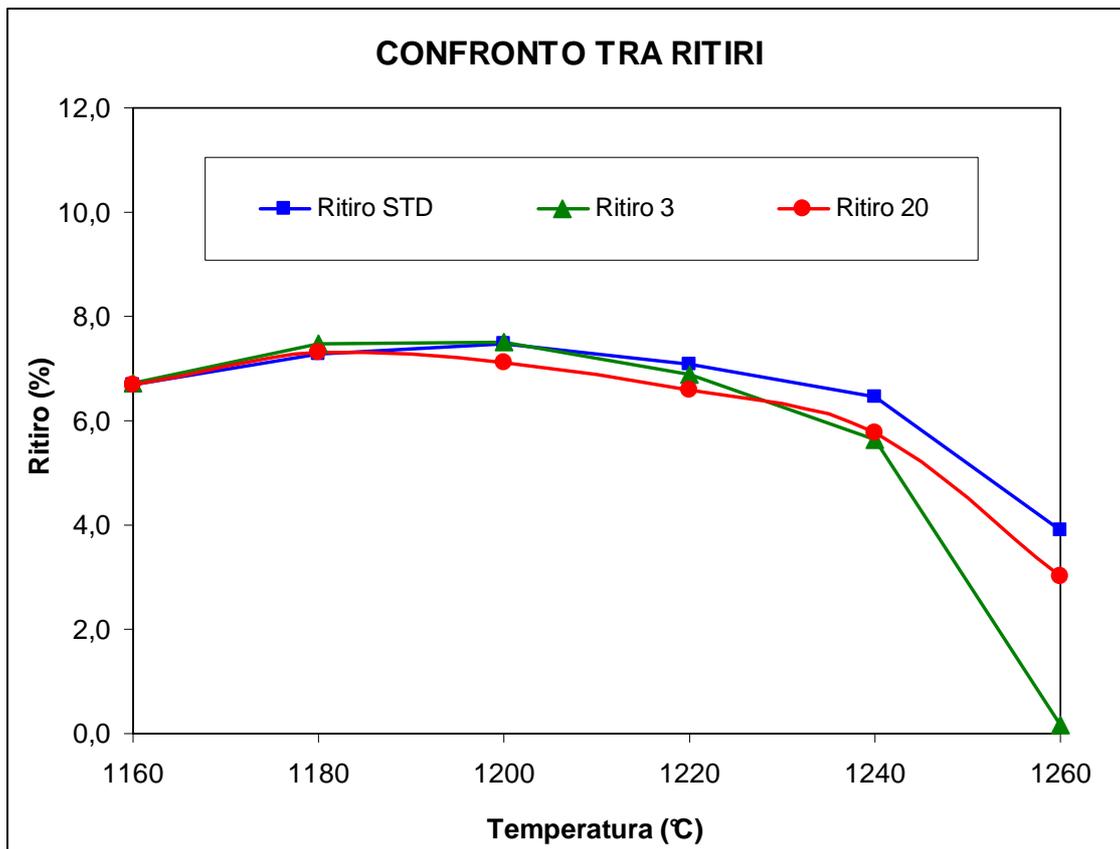


Fig. 5.31: Confronto tra i ritiri.

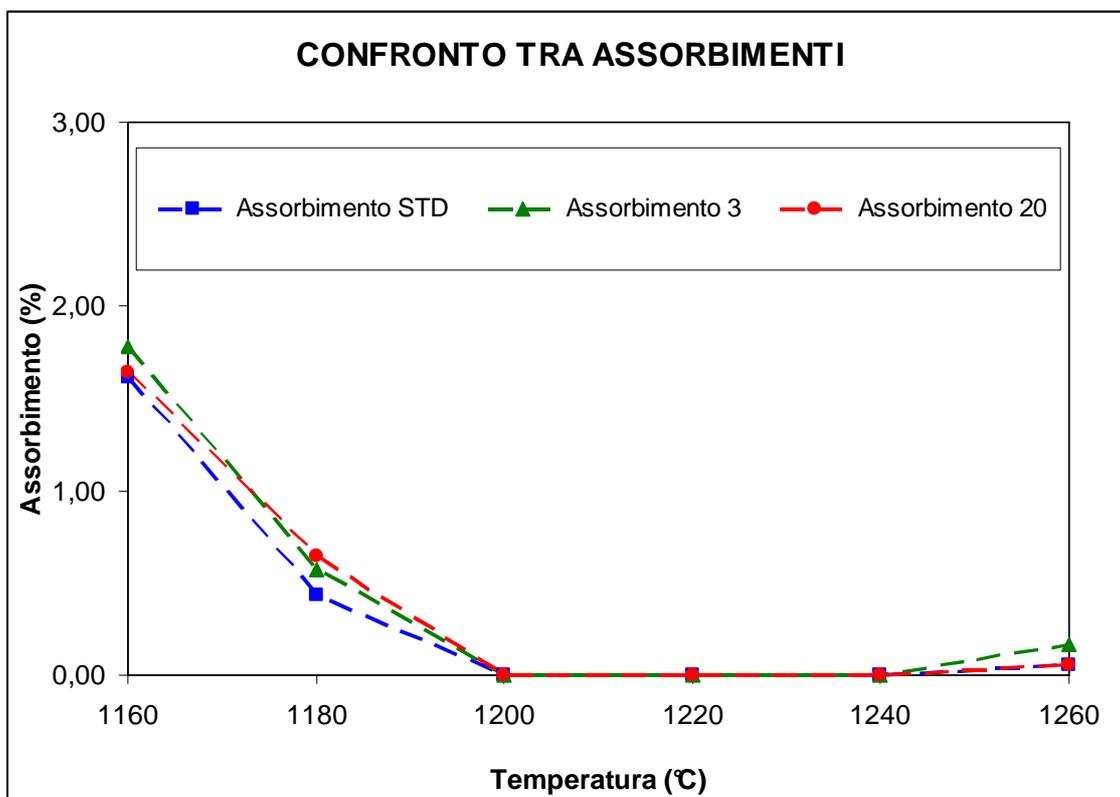


Fig. 5.32: Confronto tra gli assorbimenti.

Le curve ottenute dalle percentuali di ritiro e assorbimento dei campioni contenenti vetro, sono quasi sovrapponibili con quelle dell'impasto standard.

Inoltre, alle alte temperature mostrano piccole variazioni del ritiro (piccole pendenze) e assorbimento nullo.

Con queste prove si è quindi giunti all'ottenimento di impasti contenenti vetro riciclato (in particolare il numero 20), con comportamenti in cottura molto simili allo standard, conseguendo uno degli obiettivi richiesti dall'azienda.

Dati raccolti dalla prova per la determinazione della resistenza a flessione.

DATI	
d(Diametro dei rulli)	10 mm
t (Spessore del rivestimento in gomma dei coltelli)	2,5±0,5 mm
l (Distanza fra il punto di appoggio e il bordo del campione)	7,5 mm
L (Distanza fra i punti di appoggio)	78 mm
Lunghezza dei campioni (per il calcolo della distanza dai bordi)	93 mm
b (Larghezza media dei campioni)	46 mm

Tab.61: Dati tecnici di impostazione della macchina e dei provini

STD							
N° campione	1	2	3	4	5	6	7
F - CARICO (daN)	130,7	134,1	135	134,8	141,2	147,6	130,2
SPESSORE MIN(mm)	7,3	7,3	7,3	7,3	7,4	7,3	7,3
S - SFORZO DI ROTT. (N)	2216,22	2273,87	228,91	2285,74	2394,26	2502,78	2207,74
R- RESIST. A FLESSIONE (N/mm ²)	62,38	64,00	64,43	64,34	65,58	70,45	62,14
CARICO MEDIO (N)	136,23						
SFORZO MEDIO (N)	2015,65						
RESIST. A FLESS. MEDIA (N/mm ²)	64,76						

Tab. 5.62: Dati ottenuti dalla prova di flessione sull'impasto STD

3							
N° campione	1	2	3	4	5	6	7
F - CARICO (daN)	141,9	126,4	140,0	125,2	123,6	117,1	149,7
SPESSORE MIN(mm)	7,4	7,4	7,4	7,4	7,3	7,4	7,4
S - SFORZO DI ROTT. (N)	2406,13	2143,30	237,39	2122,96	2095,83	1985,61	2538,39
R- RESIST. A FLESSIONE (N/mm ²)	65,91	58,71	65,03	58,15	58,99	54,39	69,53
CARICO MEDIO (N)	131,99						
SFORZO MEDIO (N)	1932,80						
RESIST. A FLESS. MEDIA (N/mm ²)	61,53						

Tab. 5.63: Dati ottenuti dalla prova di flessione sull'impasto 3

20							
N° campione	1	2	3	4	5	6	7
F - CARICO (daN)	132,9	136,2	117,0	126,6	115,8	133,7	109,1
SPESSORE MIN(mm)	7,4	7,4	7,4	7,5	7,5	7,5	7,4
S - SFORZO DI ROTT. (N)	2253,52	2309,48	198,39	2146,70	1963,57	2267,09	1849,96
R- RESIST. A FLESSIONE (N/mm ²)	61,73	63,26	54,34	57,25	52,36	60,46	50,67
CARICO MEDIO (N)	124,47						
SFORZO MEDIO (N)	1855,53						
RESIST. A FLESS. MEDIA (N/mm ²)	57,15						

Tab. 5.64: Dati ottenuti dalla prova di flessione sull'impasto 20

Come ci si aspettava l'aggiunta del vetro provoca un calo della resistenza meccanica della piastrella e soprattutto una maggiore dispersione dei risultati.

Il vetro infatti apportando minerali fondenti, contribuisce ad incrementare la quantità di matrice vetrosa, la quale rende fragile il supporto ceramico.

Tuttavia il valore medio registrato è in entrambi i casi (impasto 3 e 20) è molto al di sopra del limite minimo di 35 N/mm², imposto dalla norma UNI EN ISO 10545-4.

STANDARD

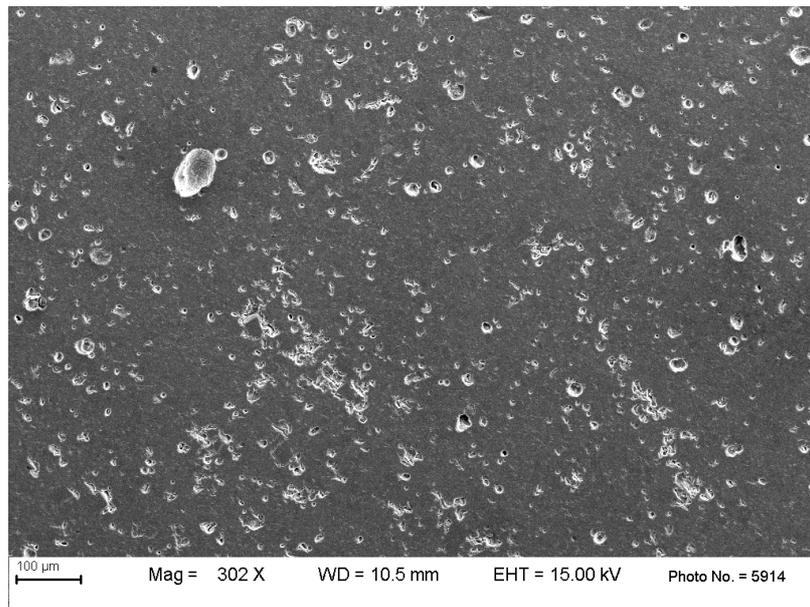


Fig. 5.33: Ingrandimento 300X (STD): porosità chiusa diffusa ma non interconnessa

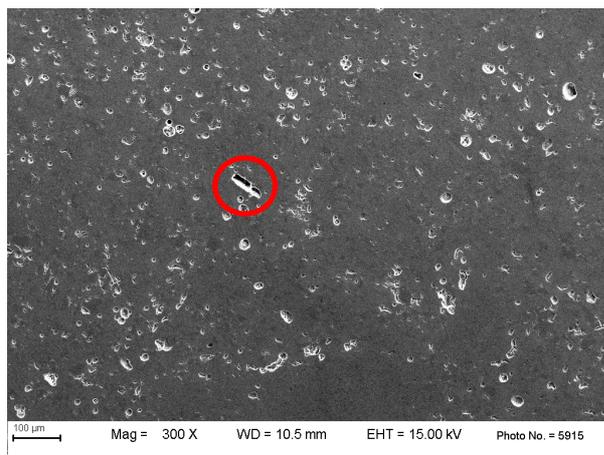


Fig. 5.34: Ingrandimento 300X (STD).

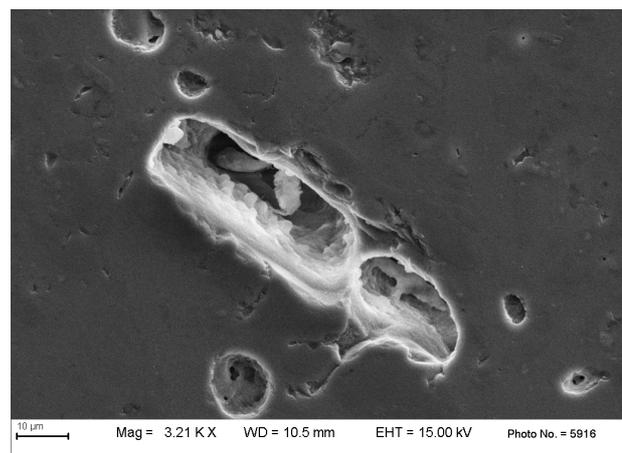


Fig. 5.35: Ingrandimento a 3200X (STD) di una porosità chiusa.

È stata anche osservata la distribuzione degli elementi e composti contenuti nell'impasto in base al numero atomico, nella foto sottostante le zone più chiare rappresentano i composti con numero atomico più alto, man mano che il colore diventa scuro il numero atomico si abbassa (le macchie nere indicano infatti le porosità).

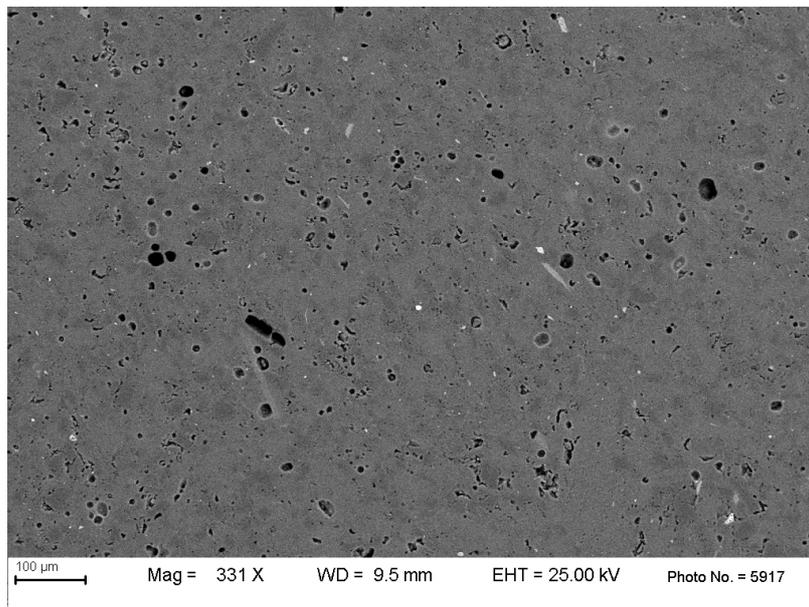


Fig. 5.36: Ingrandimento 330X (STD) in cui viene messa in evidenza la distruzione degli elementi e composti in base al numero atomico

IMPASTO 3

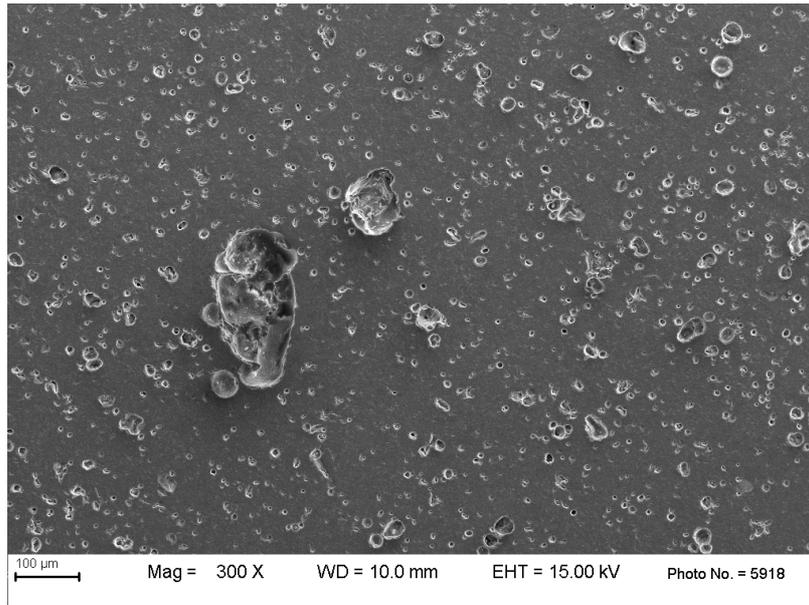


Fig. 5.37: Ingrandimento 300X (impasto 3).

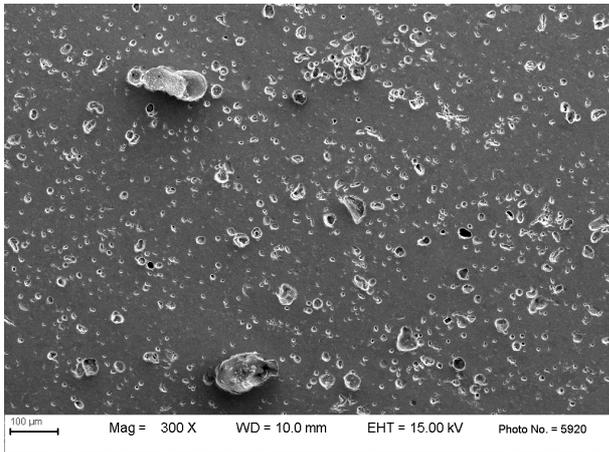


Fig. 5.38: Ingrandimento 300X (impasto 3).

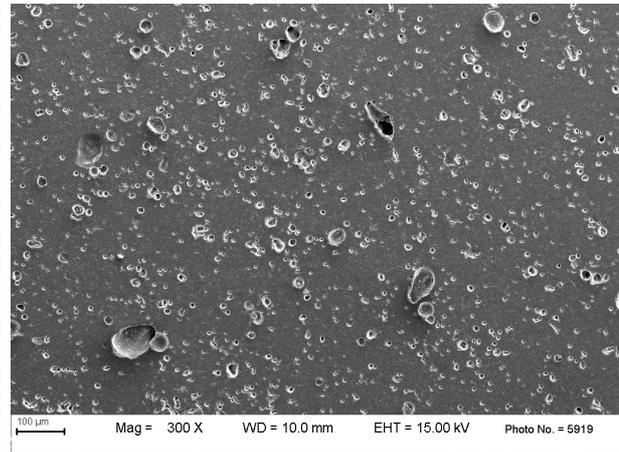


Fig. 5.39: Ingrandimento 300X (impasto 3).

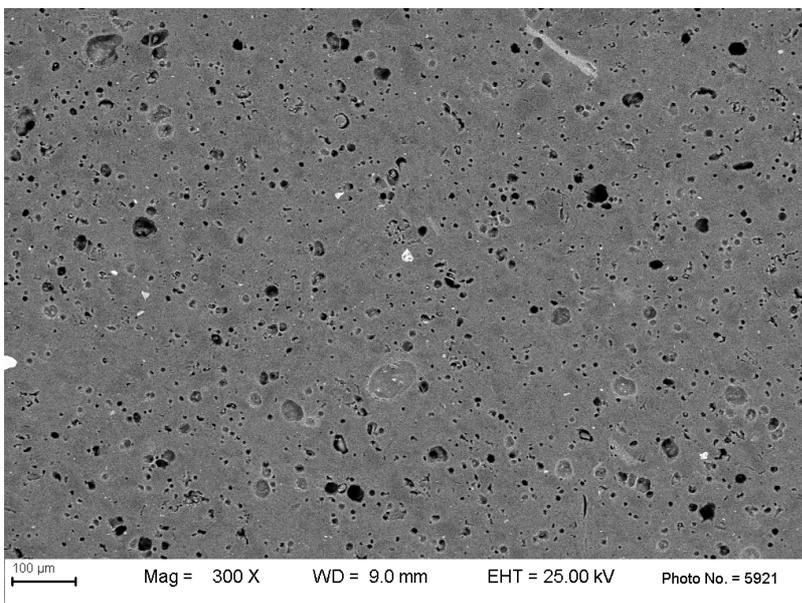


Fig. 5.40: Ingrandimento 300X (impasto 3) in cui viene messa in evidenza la distruzione degli elementi e composti in base al numero atomico

IMPASTO 20

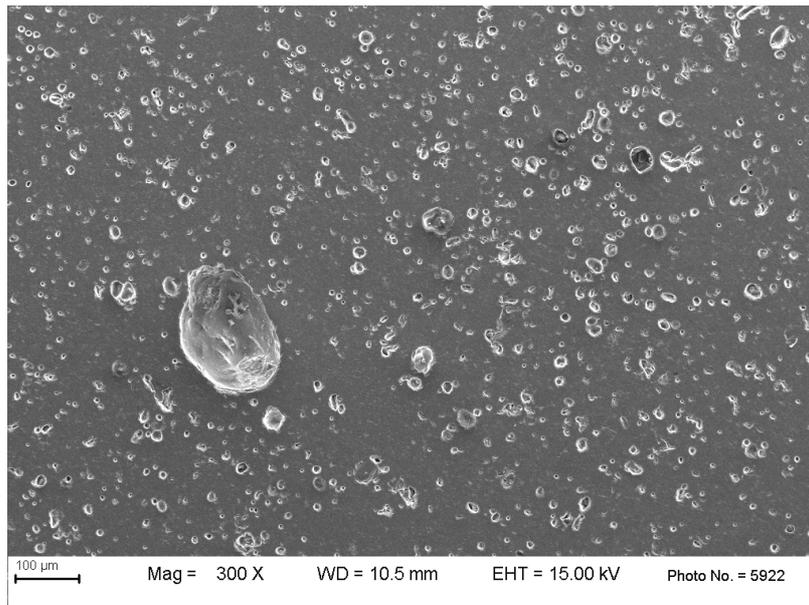


Fig. 5.41: Ingrandimento 300X (impasto 20).

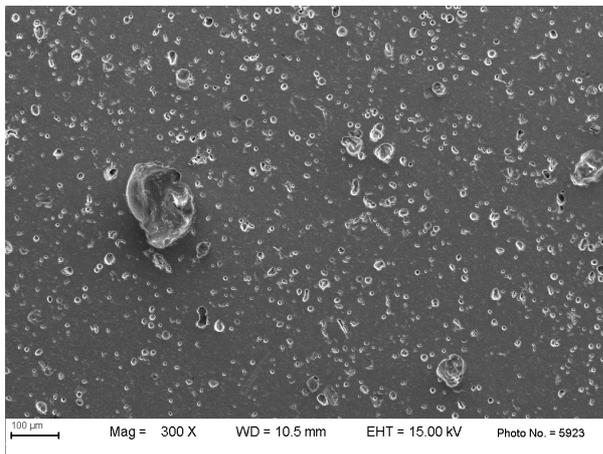


Fig. 5.42: Ingrandimento 300X (impasto 20).

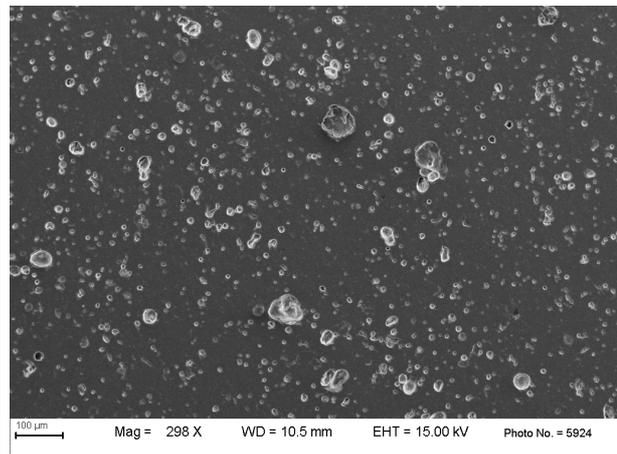


Fig. 5.43: Ingrandimento 300X (impasto 20).

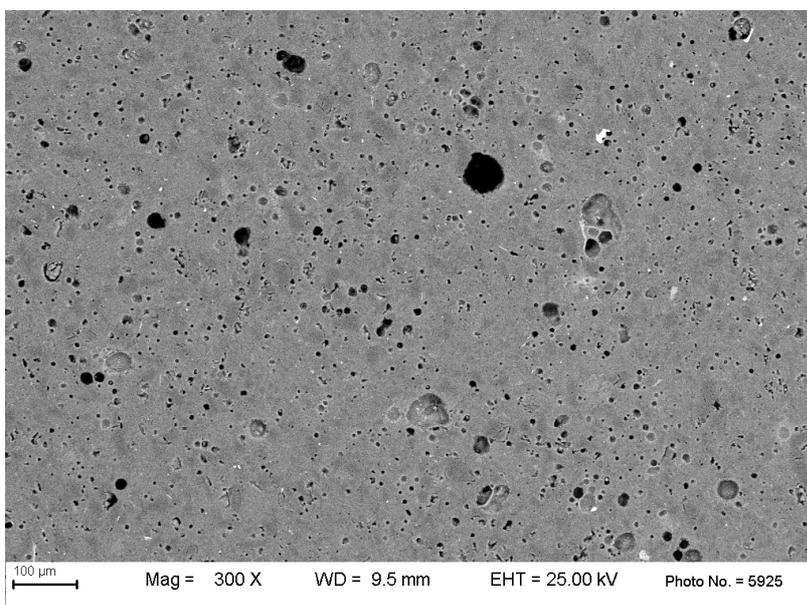


Fig. 5.44: Ingrandimento 300X (impasto 20) in cui viene messa in evidenza la distruzione degli elementi e composti in base al numero atomico

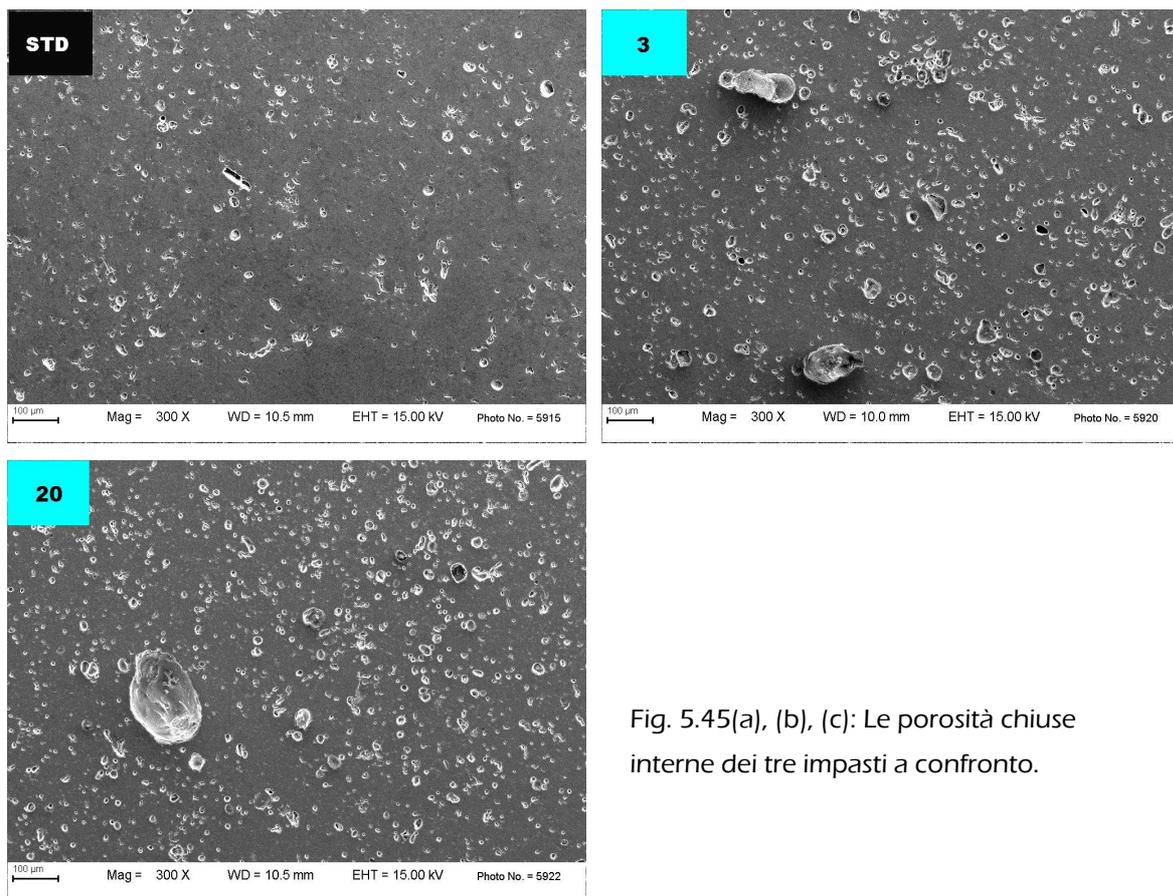


Fig. 5.45(a), (b), (c): Le porosità chiuse interne dei tre impasti a confronto.

Le osservazioni hanno messo in luce che il numero e le dimensioni delle porosità aumentano al crescere della percentuale di vetro sodico calcico.

A causa della precoce fusione degli ossidi di potassio, sodio, magnesio e calcio, viene incrementata la fusibilità dell'impasto e il conseguente aumento di porosità interna.

Quest'ultima, insieme alla maggiore percentuale di fase vetrosa, vanno ad influenzare in modo negativo le proprietà meccaniche, che infatti sono risultate inferiori.

In conclusione si può comunque affermare che nonostante si siano riscontrate porosità in numero e dimensioni maggiori, esse rimangono comunque non interconnesse tra, e ciò è fondamentale per far sì che la piastrella mantenga una resistenza a flessione superiore a quella minima prevista dalla norma UNI.

RISULTATI SULL' IMPASTO 17

Anche questo impasto è stato sottoposto alle medesime prove ad esclusione dell'osservazione al microscopio elettronico a scansione.

Inoltre, dalla prima cottura effettuata nel forno a gradienti, in cui il provino è stato sottoposto al ciclo a cui erano stati sottoposti gli altri impasti, è risultata una curva molto spostata verso sinistra ed è stato quindi necessario pressare altri 6 dischetti (dal numero 7 al 12) e successivamente sottoporli ad un ciclo di cottura diverso, più precisamente partendo da temperature più basse.

CICLO N°71

FASE	DURATA (min)	GRADI/MINUTO	TEMP.MAX. RAGGIUNTA(°C)
1	10	60	600
2	30	-	600
3	30	20,7	1220
4	40	-	1220

Tab. 5.65 :Ciclo di cottura a cui sono stati sottoposti i provini dal n° 7 al 12,dell'impasto 17

N° cella	5	3	1	2	4	6
Temp.max raggiunta (°C)	1140	1180	1220	1200	1160	1120
N°provino	8	10	12	11	9	7

Tab. 5.66: Temperature e posizionamento dei provini nel forno a gradienti.

Dati raccolti in fase di pressatura

17	VERDE (PRESSATO)			
	Spess. (mm)	diametro (g)	peso (g)	densità (g/cm ³)
N°camp				
1	6,91	40,30	17,59	2,00
2	7,09	40,30	17,99	1,99
3	7,13	40,30	18,15	2,00
4	7,02	40,32	17,87	1,99
5	6,88	40,30	17,50	2,00
6	7,10	40,30	18,12	2,00

17	VERDE (PRESSATO)			
	Spess. (mm)	diametro (g)	peso (g)	densità (g/cm ³)
N°camp				
7	7,19	40,32	18,27	1,99
8	7,15	40,32	18,27	2,00
9	7,04	40,32	17,92	1,99
10	7,20	40,32	18,41	2,00
11	7,02	40,31	17,99	2,01
12	7,13	40,31	18,16	2,00

Tab.5.67(a) e 5.67(b) : Dati ottenuti dopo la pressatura

Dai dati si percepisce che durante la pressatura non si sono verificate anomalie e le densità dei dischetti ottenuti sono pressoché identiche.

Dati raccolti dopo la cottura dei provini nel forno a gradienti e la verifica dell'assorbimento.

17	Temp. °C	ESSICCATO		COTTO			Ritiro %	Assorbimento %
		diametro (mm)	peso (g)	diametro (mm)	peso (g)	peso umido (g)		
N°camp								
1	1160	40,32	16,84	37,43	16,19	16,22	7,2	0,19
2	1180	40,32	17,25	37,58	16,57	16,57	6,8	0,00
3	1200	40,32	17,37	39,21	16,70	16,76	2,8	0,36
4	1220	40,32	17,10	40,25	16,42	16,53	0,2	0,67
5	1240	40,32	16,75	40,91	16,11	16,23	-1,5	0,74
6	1260	40,31	17,33	42,32	16,68	16,70	-5,0	0,12

Tab. 5.68: Dati ottenuti dopo la prima cottura e verifica dell'assorbimento del campione 17.

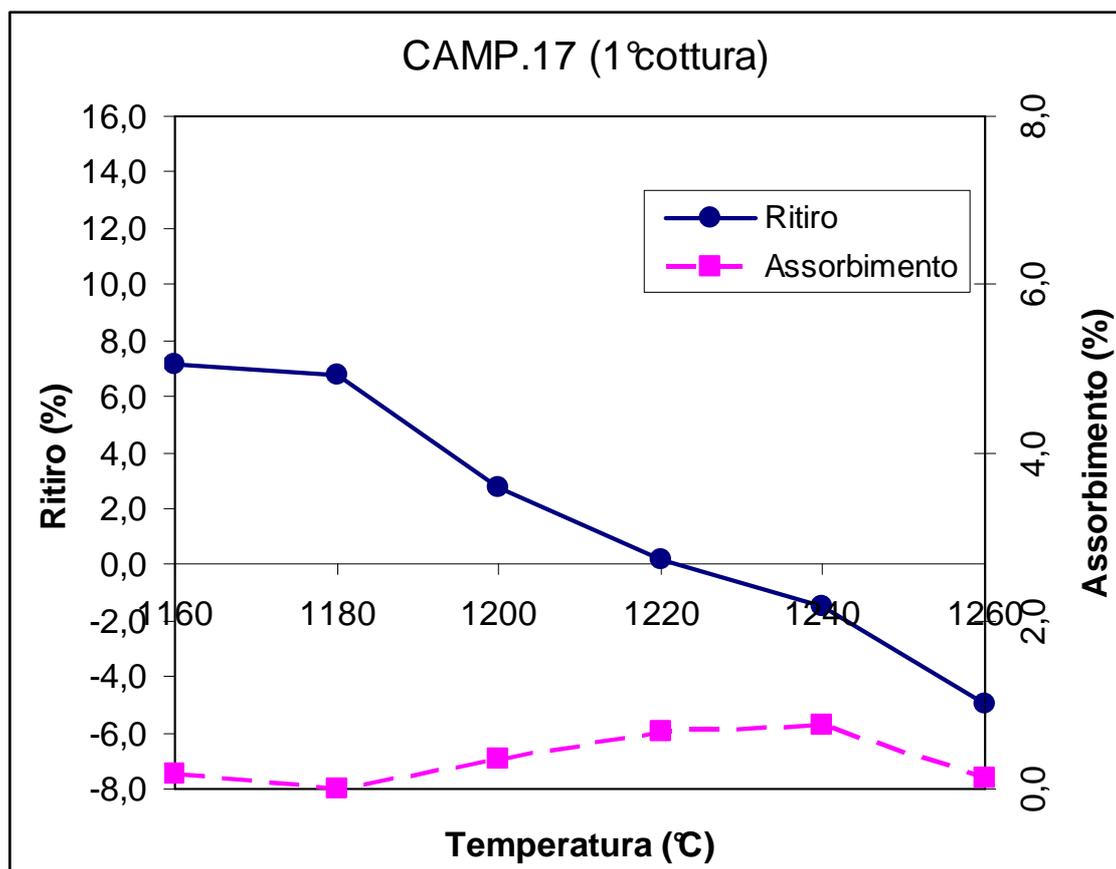


Fig. 5.46 : Curva di graficazione del campione 17 (1° cottura)

17	Temp °C	ESSICCATO		COTTO			Ritiro %	Assorbimento %
		diametro (mm)	peso (g)	diametro (mm)	peso (g)	peso umido (g)		
N°camp								
7	1120	40,32	17,48	38,65	16,83	18,03	4,1	7,13
8	1140	40,32	17,47	38,33	16,81	17,70	4,9	5,29
9	1160	40,32	17,14	37,45	16,48	16,55	7,1	0,42
10	1180	40,32	17,61	37,54	16,93	16,93	6,9	0,00
11	1200	40,32	17,21	37,79	16,54	16,54	6,3	0,00
12	1220	40,32	17,36	39,52	16,68	16,71	2,0	0,18

Tab. 5.69: Dati ottenuti dopo la seconda cottura (a temperature inferiori) e verifica dell'assorbimento del campione 17

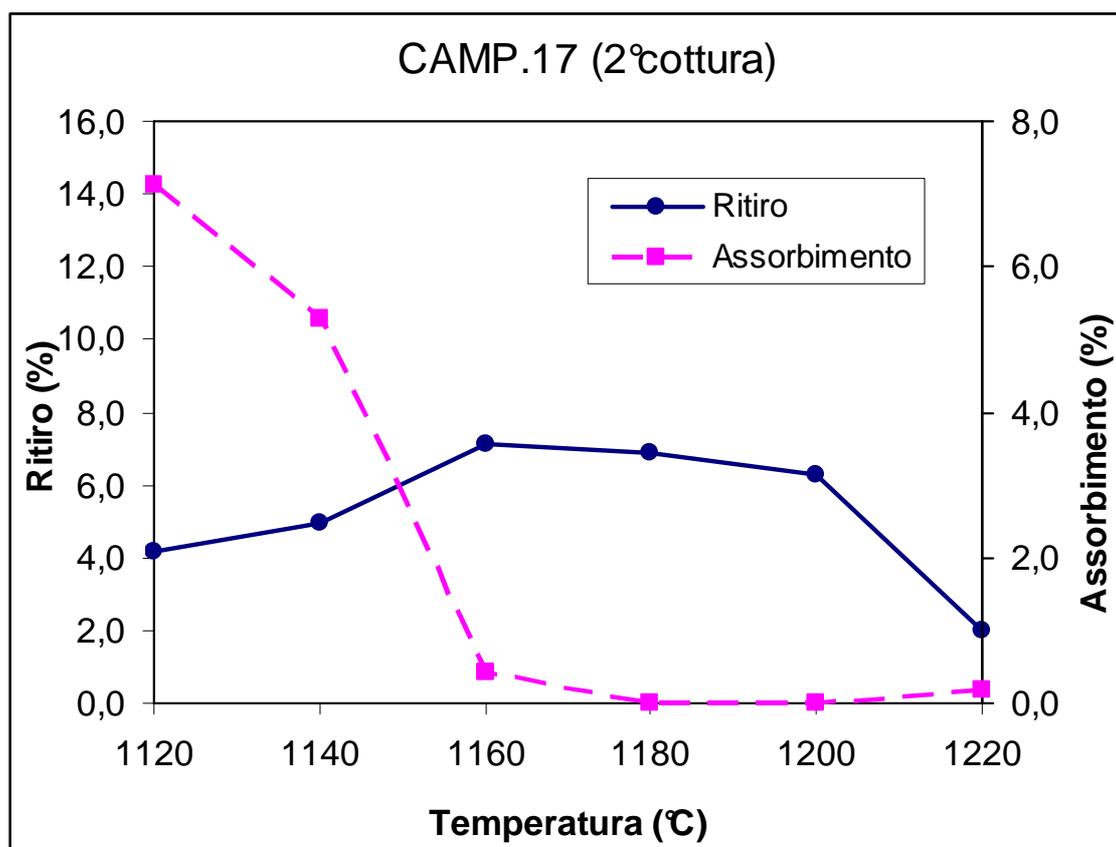


Fig. 5.47: Curva di greificazione del campione 17 (2° cottura)

Il primo grafico mostra chiaramente che i primi sei dischetti sono stati sottoposti ad una cottura a temperature eccessivamente elevate; si intravede comunque che tra 1160°C e 1180°C la curva si appiattisce e l'assorbimento è quasi nullo.

Anche visivamente i dischetti cotti a oltre 1200°C apparivano con rigonfiamenti e deformazioni localizzate sull'intera superficie, aspetto tipico del fenomeno di overfiring (sovra cottura): la formazione di eccessiva fase vetrosa comporta un aumento della viscosità della massa, a questo segue la formazione di porosità chiusa che impedisce ai vapori che si sviluppano all'interno di fuoriuscire, producendo così rigonfiamento.

Sulla base di questi risultati è stata effettuata una seconda cottura, in cui è stata impostata in ogni cella una temperatura inferiore di 40°C rispetto al ciclo precedente, i risultati ottenuti hanno confermato che già a 1160°C il materiale inizia a greificare, e a 1180°C sono già state raggiunte le condizioni ottimali di ritiro e assorbimento.

I forni industriali utilizzati da Cerdomus attualmente raggiungono la temperatura massima di 1210°C, sulla base di questi ultimi risultati è stato dimostrato che utilizzando questa formulazione è possibile cuocere le piastrelle a circa 30°C in meno rispetto alle condizioni attuali.

Nel caso ipotetico in cui l'azienda decidesse di installare una linea mirata al risparmio energetico, i risultati ottenuti sarebbero da tenere sicuramente in considerazione.

Dati raccolti dalla prova per l'ottenimento della resistenza a flessione.

DATI	
d(Diametro dei rulli)	10 mm
t (Spessore del rivestimento in gomma dei coltelli)	2,5±0,5 mm
l (Distanza fra il punto di appoggio e il bordo del campione)	6 mm
L (Distanza fra i punti di appoggio)	84 mm
Lunghezza dei campioni (per il calcolo della distanza dai bordi)	97 mm
b (Larghezza media dei campioni)	49 mm

Tab. 5.70: Dati tecnici di impostazione della macchina e dei provini

17							
N° campione	1	2	3	4	5	6	7
F - CARICO (daN)	93,3	89,4	96,5	101,7	91,9	98,9	100,2
SPESSORE MIN(mm)	7,7	7,6	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7
S - SFORZO DI ROTT. (N)	1599,43	1532,57	165,43	1743,43	1575,43	1695,43	1717,71
R- RESIST. A FLESSIONE (N/mm ²)	40,46	39,80	41,85	44,11	39,86	42,89	43,46
CARICO MEDIO (N)	95,99						
SFORZO MEDIO (N)	1432,78						
RESIST. A FLESS. MEDIA (N/mm ²)	41,78						

Tab. 5.71: Dati ottenuti dalla prova di flessione sull'impasto 17.

I dati sono riferiti alla prova effettuata su piastrelle- campione (circa 50x100mm) preparate nel laboratorio di Cerdomus e cotte nel forno industriale presente nello stabilimento, il quale raggiunge la temperatura massima di 1210°C.

La prova ha dimostrato che i provini hanno subito una sovracottura, le piastrelle oltre a risultare piuttosto deformate nelle dimensioni e con rigonfiamenti in superficie, hanno fatto riscontrare valori di resistenza a flessione molto bassi (seppure superiore al limite minimo prescritto dalla norma) a causa della presenza di macro porosità al loro interno.

Sarebbe interessante e opportuno approfondire la sperimentazione sottoponendo alla prova di flessione provini cotti alla temperatura più ragionevole di circa 1180°C.

Si suppone che le caratteristiche meccaniche subiscano un notevole miglioramento e che quindi ritornino a livelli accettabili.

Al termine di questa prova si è conclusa la prima parte della ricerca, i buoni risultati ottenuti hanno permesso di:

- proseguire le sperimentazioni, avviando una contenuta produzione semi-industriale dell'impasto standard e 20,
- valutare numericamente il risparmio energetico in cottura nel caso di una produzione industriale di piastrelle prodotte con la formulazione della prova 17.

5.3 APPENDICE A

CALCOLO DENSITA'

Si definisce densità il peso per unità di volume ad una temperatura specifica.

Lo strumento idoneo alla rapida determinazione del peso specifico di barbotine ceramiche è il picnometro, definito anche tazza per densità.

Essi hanno forma cilindrica, in acciaio inox, con un'ampia apertura per il riempimento, lo svuotamento e la pulizia. Il coperchio, dello stesso materiale ha una pendenza verso l'alto in direzione di un piccolo foro al centro per espellere il materiale in eccesso senza intrappolare le bolle d'aria, il che aumenta l'accuratezza della misura.

Caratteristiche del picnometro utilizzato:

Dimensione	Ø 48 x 70 mm
Capacità	100 cc
Peso/ tara	200 g

Procedura:

- pesare il picnometro vuoto e registrare il peso,
- riempire il picnometro,
- coprire con il coperchio senza inclinare,
- evitare le bolle d'aria,
- rimuovere attentamente il liquido che fuoriesce con un panno assorbente,
- pesare il picnometro pieno,
- calcolare la densità :

$$Densità[g / l] = \frac{peso_pieno[g] - tara[g]}{capacità[l]}$$



Fig. 5.48 : Picnometro



Fig. 5.49 : Coppa ford

CALCOLO VISCOSITA'

Si utilizza uno strumento denominato Coppa Ford, si tratta di un viscosimetro a gravità per la rapida determinazione della viscosità delle barbotine ceramiche o di altri liquidi come olio, miele, glicerina, latte etc.

La misura si ottiene versando il campione nella coppa e misurando con un cronometro il tempo che il liquido impiega a scorrere attraverso l'orifizio (di diametro 4 mm) fino alla prima interruzione del liquido.

CALCOLO DEL RESIDUO

Dopo la misurazione del peso del picnometro pieno, tutta la barbotina contenuta all'interno viene rovesciata dentro un setaccio con maglia da 63 μm . Per fare in modo che tutto la barbotina ricada dentro il setaccio, è necessario sciacquare delicatamente il picnometro, una volta pulitolo completamente si può iniziare la setacciatura sotto acqua corrente.

Quando tutto il materiale fine è passato dalle maglie, si aspetta che l'acqua dentro al setaccio ritorni trasparente e si rovescia la polvere residua in una ciotola di ceramica, facendola fluire con poca acqua.

Il contenitore viene posto in stufa a 110°C per qualche ora e successivamente, utilizzando una bilancia (sensibilità: 0,001g) ed infine, dopo averlo staccato dalle pareti della ciotola con un pennello, è possibile determinare il peso del residuo,.

Avendo a disposizione i valori della densità e del peso del residuo sul volume del picnometro è determinabile la percentuale del residuo.

5.4 APPENDICE B

CENNI DI COLORIMETRIA

La percezione visiva è il risultato dell'interpretazione, realizzata dal cervello, della luce percepita dagli occhi, modificata e trasmessa dagli oggetti o emessa direttamente dalle sorgenti di luce.

La luce che arriva sul fondo dell'occhio viene "tradotta" da neuroni specializzati chiamati fotorecettori, in segnali bioelettrici che giungono al cervello attraverso il nervo ottico.

I fotorecettori contengono un pigmento che consente loro di assorbire la luce

I bastoncelli, più sensibili, consentono la visione con luce molto bassa (notturna)

I coni sono deputati alla visione dei colori e alla visione distinta (visione diurna); ne esistono almeno tre tipi diversi, rispettivamente per il rosso, il verde e il blu.

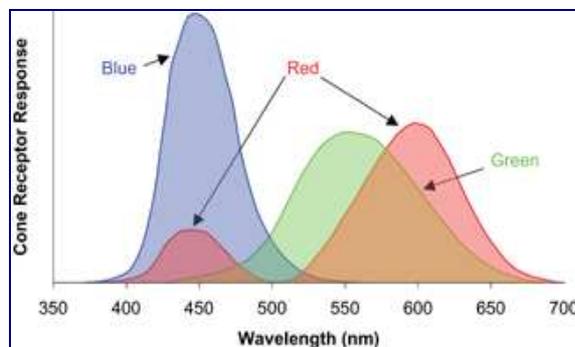
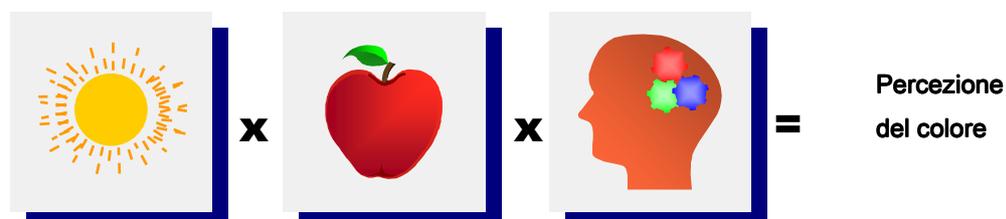


Fig. 5.50 e 5.51 : Schematizzazione della visione dell'occhio umano

Ci sono diversi fattori che alterano la percezione del colore⁸, per esempio i fenomeni di riflessione e rifrazione o il sistema di percezione umano che viene influenzato da fattori emotivi e culturali, ciò non permette una valutazione oggettiva del colore.

Questi problemi possono essere superati (con le opportune limitazioni) per giungere ad una rappresentazione univoca del colore: è infatti necessario nelle applicazioni

⁸ Colore: è una radiazione elettromagnetica caratterizzata da una lunghezza d'onda nella regione del visibile: questa regione consiste di radiazioni di lunghezza d'onda compresa tra 400 nm e 700 nm. A parte alcuni effetti ottici fisici come rifrazione e diffrazione, la causa dei colori nei minerali è riconducibile all'assorbimento di radiazioni attraverso processi che interessano gli elettroni.

Quando la materia viene colpita da una sorgente luminosa, può assorbire certe lunghezze d'onda mentre altre vengono riemesse: le radiazioni riemesse dalla materia in esame determinano il suo colore. La configurazione elettronica del composto determina quali lunghezze d'onda possono essere assorbite.

industriali e scientifiche poter definire tramite dati numerici le caratteristiche di una sensazione cromatica.

Un sistema di misura in grado di rapportarsi al sistema visivo dell'uomo, deve necessariamente specificare il colore mediante terne di numeri (in analogia con le risposte di sensibilità dei coni dell'occhio umano).

Nel 1931 il CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*, un ente incaricato della standardizzazione nel campo dell'illuminazione) propose un modello colorimetrico che rappresenta tutti i colori che l'occhio umano può vedere; quest'ultimo si basa su tre coordinate XYZ (colorimetriche) scelte in modo tale da simulare il più possibile la sensibilità dell'occhio umano.

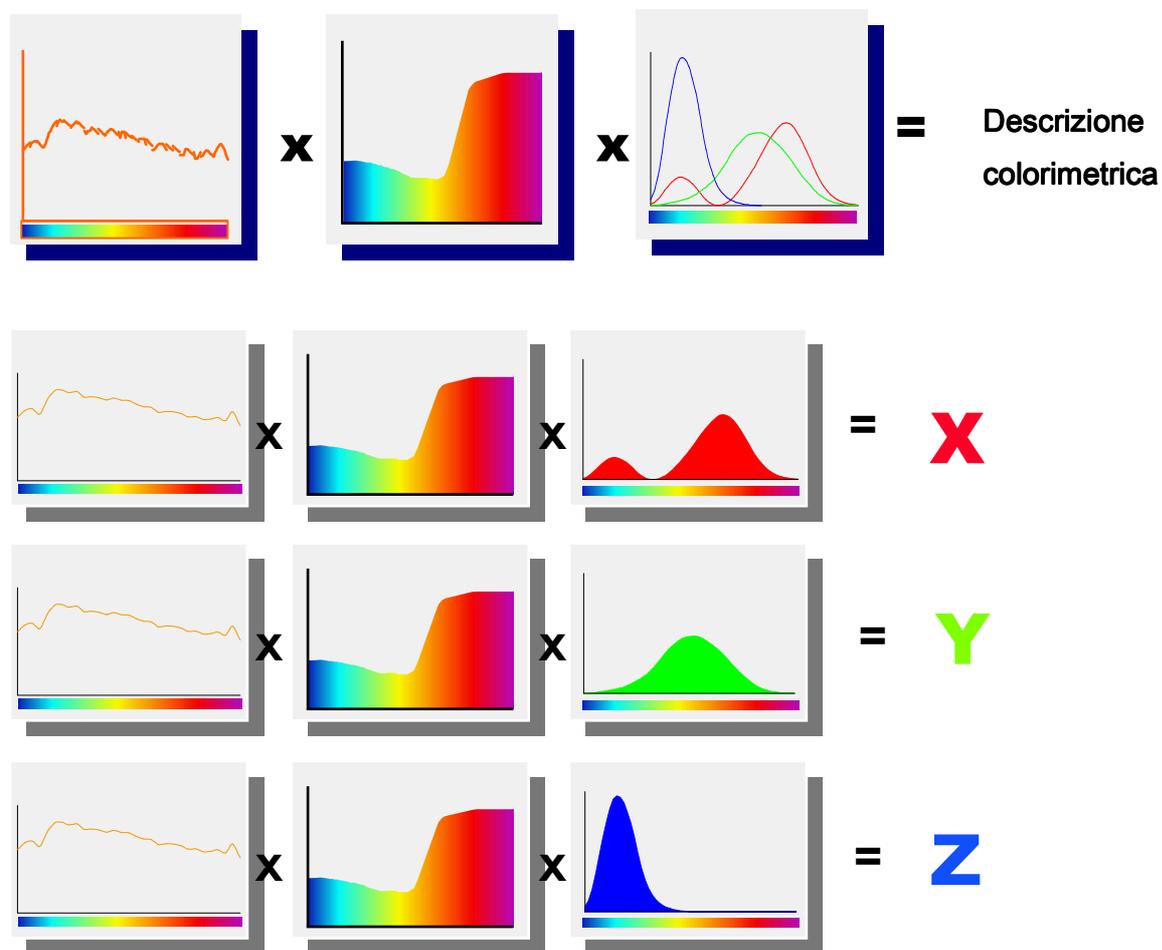


Fig. 5.52 : Funzioni colorimetriche utilizzate nel principio di calcolo dei valori XYZ

Nel diagramma di cromaticità CIE 1931 ogni punto rappresenta una cromaticità ed ogni cromaticità è rappresentata da un punto all'interno dell'area a ferro di cavallo.

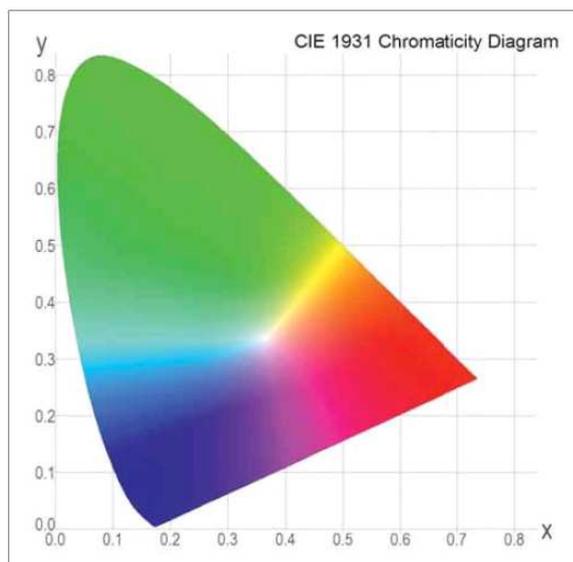


Fig. 5.53: Diagramma di cromaticità CIE 1931

L'intera area è compresa in un sistema di coordinate cartesiane (rettangolari e ortogonali) x,y . Entrambe le coordinate x e y assumono valori da 0 a 1.

Non a tutte le coppie di coordinate in questo intervallo corrisponde una cromaticità, ma ad ogni cromaticità corrisponde una coppia di coordinate x,y .

Il diagramma di cromaticità CIE 1931 solo apparentemente ha due dimensioni (e coordinate xy), ma, mettendo in conto anche la luminosità il diagramma di cromaticità CIE 1931, è solo una "fetta" di uno spazio più completo, lo spazio dei colori CIE 1931 al quale si assegnano le coordinate XYZ.

Esistono relazioni matematiche per passare dal sistema XYZ a xy quindi i due sistemi sono due diversi sistemi di coordinate per il diagramma cromatico CIE 1931 collegati matematicamente tra di loro, e se si conoscono le coordinate di un colore date con il sistema x,y , si conoscono anche le sue coordinate date con il sistema X,Y,Z .

Nel 1976 il CIE ideò un nuovo spazio colorimetrico, CIELAB, con lo scopo di ottenere un sistema molto più semplice da interpretare e di più facile individuazione.

Lo spazio Lab è una trasformazione matematica non lineare dello spazio XYZ, con riferimento ad un punto particolare che viene scelto come bianco.

- I colori sono espressi con 3 coordinate: "L" (luminosità), "a" (rosso/verde), "b" (giallo/blu)
- + a = rossi, - a = verdi, + b = gialli, - b = blu.
- tutti i grigi si trovano lungo l'asse della L con coordinate a e b prossime a 0.

- L può assumere valori tra 0 a 100 (100=bianco, 0=nero)
- a: può assumere valori tra -164 a 129
- b : può assumere valori tra -130 a 146

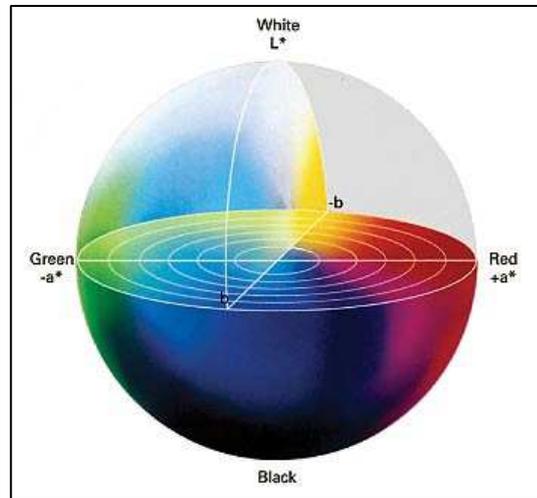


Fig. 5.54 e 5.55 : Spazio CIELAB

Per i rilevamenti colorimetrici presso il laboratorio in Cerdomus è stato utilizzato uno spettrofotometro a riflettanza, dotato di un sofisticato sistema ottico che ha permesso di rilevare le tre coordinate L, a,b.

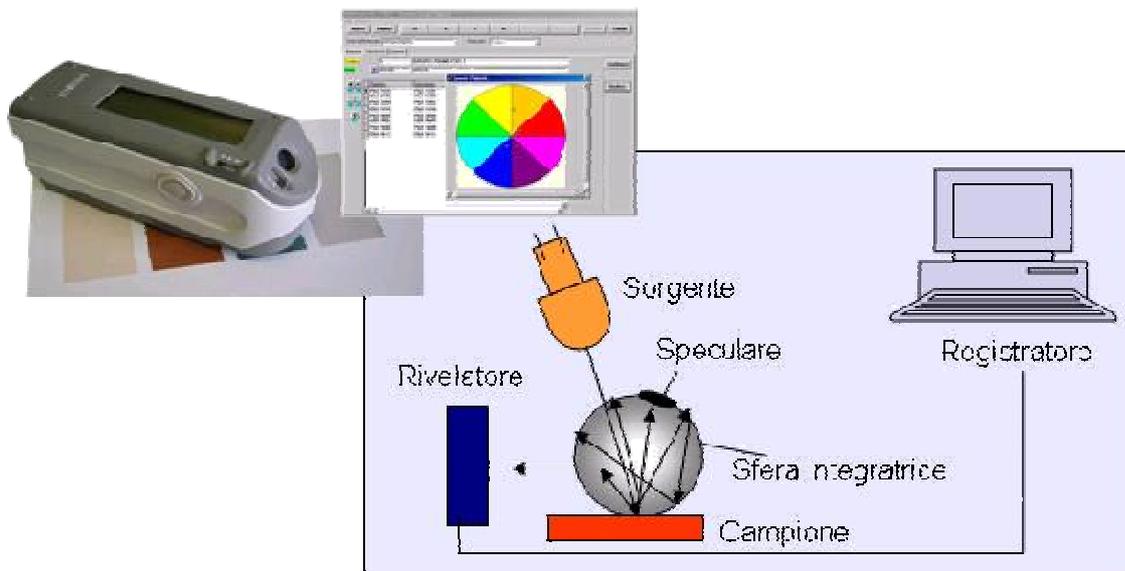


Fig. 5.56 : Foto e schema dello spettrofotometro a riflettanza.

CAPITOLO 6

2° PARTE DELLA SPERIMENTAZIONE: PREPARAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI PIASTRELLE PRODOTTE SEMI- INDUSTRIALMENTE

Questa fase della sperimentazione ha richiesto la preziosa collaborazione dei laboratori dell'azienda SACMI di Imola (BO), leader mondiale nella produzione di macchine industriali (tra cui quelle utilizzate nei processi ceramici); grazie al quale è stato possibile macinare e atomizzare una esigua quantità di impasto (circa 5 quintali di entrambi i campioni scelti) con un procedimento molto simile a quello che effettivamente viene applicato nella vera produzione industriale.

Non è stato possibile svolgere questa fase presso Cerdomus in quanto i mulini presenti permettono solo cariche molto elevate e sono impegnati continuamente per la produzione ceramica.

6.1 MATERIALI

Sono state fornite ai laboratori di Sacmi le materie prime presenti nella formula dell'impasto standard e numero 20, nelle quantità previste.

Per conoscere in specifico la composizione chimica si rimanda al capitolo precedente, paragrafo 5.2.1.

6.2 METODI

Presso il laboratorio di Sacmi le materie prime sono state macinate a umido, utilizzando mulini continui tecnologicamente simili a quelli presenti in Cerdomus ma con volumi molto più ridotti, e successivamente atomizzate.

n. prova	UMIDITA' (%)	RESIDUO a 63 μ m (%)
STD_ATM	6,5	1,85
20_ATM	6,6	2,12

Tab. 6.1: Dati sull'umidità e residuo forniti da Sacmi.

Una parte dei grani atomizzati sono stati poi pressati nello stabilimento produttivo della Cerdomus utilizzando un sistema di pressatura isostatica (vedi paragrafo 2.6), essiccati in un essiccatoio verticale (vedi paragrafo 2.7) e cotti in uno dei forni monostrato utilizzati per la giornaliera produzione (temperatura massima: 1210°C, durata del ciclo di cottura: 46 minuti). Sono state ottenute 10 piastrelle per ciascun impasto, del formato 33,33X 33,33 cm, le quali successivamente sono state sottoposte alla prova di resistenza a flessione presso il Centro Ceramico di Bologna.

Per il conseguimento della prova è stato seguito lo stesso procedimento descritto nel paragrafo

Una piccola quantità (circa 300 g) di impasto atomizzato, opportunamente sigillato in modo da mantenere l'umidità, è stato portato al Centro Ceramico. Seguendo lo stesso procedimento adottato per le precedenti polveri analizzate (vedi paragrafo 5.2.2), sono stati ricavati 6 dischetti per ciascun tipo, e sottoposti al ciclo di cottura numero 16, nel forno a gradienti; infine sono state misurate le percentuali di ritiro e assorbimento.

CICLO N°16

FASE	DURATA (min)	GRADI/MINUTO	TEMP.MAX. RAGGIUNTA(°C)
1	10	60	600
2	30	-	600
3	30	22	1260
4	40	-	1260

Tab. 6.2.: Ciclo n° 16.

N° cella	5	3	1	2	4	6
Temp.max raggiunta (°C)	1180	1220	1260	1240	1200	1160
N° provino	2	4	6	5	3	1

Tab. 6.3: Temperature e posizionamento dei provini nel forno a gradienti

Come ulteriore verifica presso il laboratorio di Cerdomus sono stati prodotti due campioni per ciascun impasto, seguendo il procedimento elencato al paragrafo 5.1.2, successivamente sottoposti al ciclo di cottura in uno dei forni industriali presenti nello stabilimenti e calcolati i dati relativi a ritiro e assorbimento di acqua; gli stessi dati sono stati calcolati anche sulle piastrelle di formato 33,33x33,33.

6.3 RISULTATI

Dati raccolti in fase di pressatura

STD	VERDE (PRESSATO)			
ATM	Spess.	diametro	peso	densità
N°camp	(mm)	(g)	(g)	(g/cm ³)
1	6,65	40,24	17,59	2,08
2	6,68	40,23	17,51	2,06
3	6,68	40,24	17,57	2,07
4	6,61	40,23	17,39	2,07
5	6,74	40,25	17,66	2,06
6	6,65	40,23	17,55	2,08

20	VERDE (PRESSATO)			
ATM	Spess.	diametro	peso	densità
N°camp	(mm)	(g)	(g)	(g/cm ³)
1	6,48	40,21	16,94	2,06
2	6,45	40,22	16,67	2,04
3	6,44	40,22	16,76	2,05
4	6,52	40,20	17,00	2,06
5	6,50	40,20	16,94	2,05
6	6,46	40,20	16,74	2,04

Tab. 6.4(a) e 6.4(b): Dati ottenuti dopo la pressatura.

I dati relativi alla densità dimostrano che tutti i campioni appartenenti alla stessa tipologia hanno subito le stesse condizioni di pressatura.

Dati raccolti dalla cottura dei provini nel forno a gradienti e dopo la verifica dell'assorbimento.

STD ATM	Temp. °C	ESSICCATO		COTTO			Ritiro %	Assorbimento %
		diametro (mm)	peso (g)	diametro (mm)	peso (g)	peso umido (g)		
1	1160	40,24	16,55	38,04	15,99	16,34	5,5	2,19
2	1180	40,23	16,48	37,86	15,92	16,08	5,9	1,01
3	1200	40,24	16,57	37,72	16,00	16,00	6,3	0,00
4	1220	40,23	16,38	37,98	15,81	15,82	5,6	0,06
5	1240	40,25	16,66	38,56	16,08	16,47	4,2	2,43
6	1260	40,23	16,56	39,70	15,99	16,01	1,3	0,13

Tab. 6.5: Dati ottenuti dopo la cottura e verifica dell'assorbimento del campione STD atomizzato.

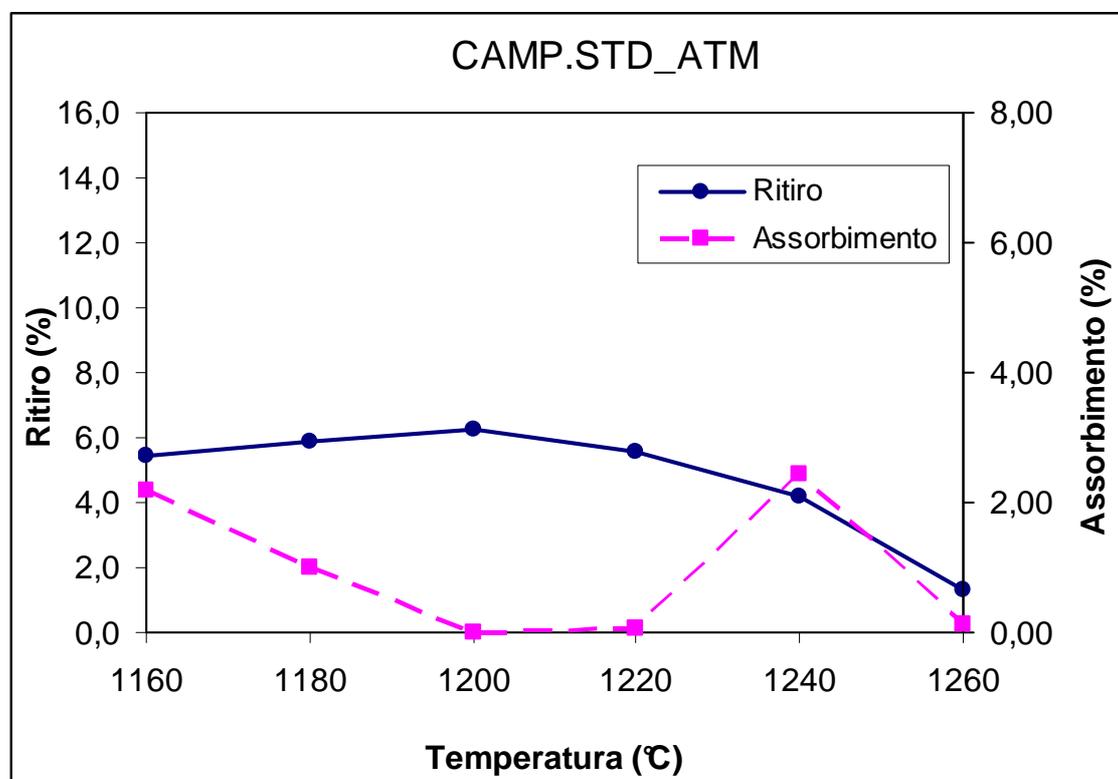


Fig. 6.1: Curva di greificazione del campione STD atomizzato.

[Il valore dell'assorbimento relativo al dischetto numero 5 non è da tenere in considerazione in quanto, in condizioni normali la curva non può assumere tale andamento. La causa di questa anomalia può essere ricondotta o ad un errore di misura del peso umido o all'apertura di una porosità superficiale. Questa seconda ipotesi è da tenere in considerazione visto che nel dischetto in questione erano visibili vistosi rigonfiamenti dovuti alla sovra cottura.]

20 ATM	Temp. °C	ESSICCATO		COTTO			Ritiro %	Assorbimento %
		diametro (mm)	peso (g)	diametro (mm)	peso (g)	peso umido (g)		
N°camp								
1	1160	40,23	15,83	38,36	15,32	15,95	4,6	4,11
2	1180	40,22	15,56	37,93	15,06	15,33	5,7	1,79
3	1200	40,23	15,64	37,65	15,13	15,14	6,4	0,07
4	1220	40,24	15,91	38,02	15,38	15,38	5,5	0,00
5	1240	40,24	15,82	38,33	15,31	15,31	4,7	0,00
6	1260	40,22	15,63	39,38	15,12	15,12	2,1	0,00

Tab. 6.6 : Dati ottenuti dopo la cottura e verifica dell'assorbimento del campione 20 atomizzato.

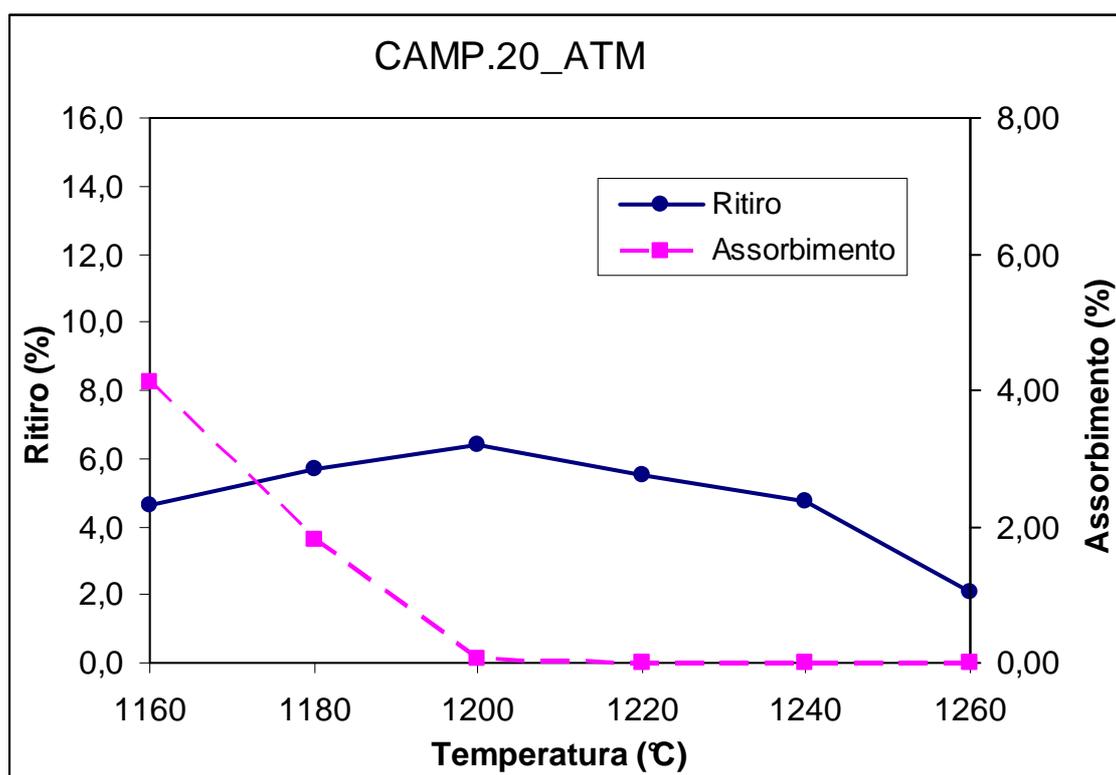


Fig. 6.2 : Curva di greificazione del campione 20 atomizzato.

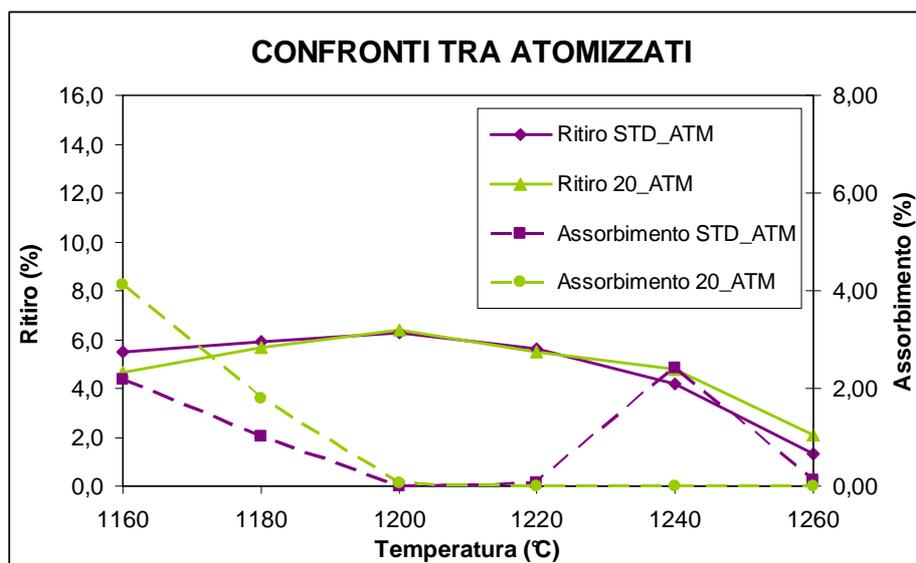
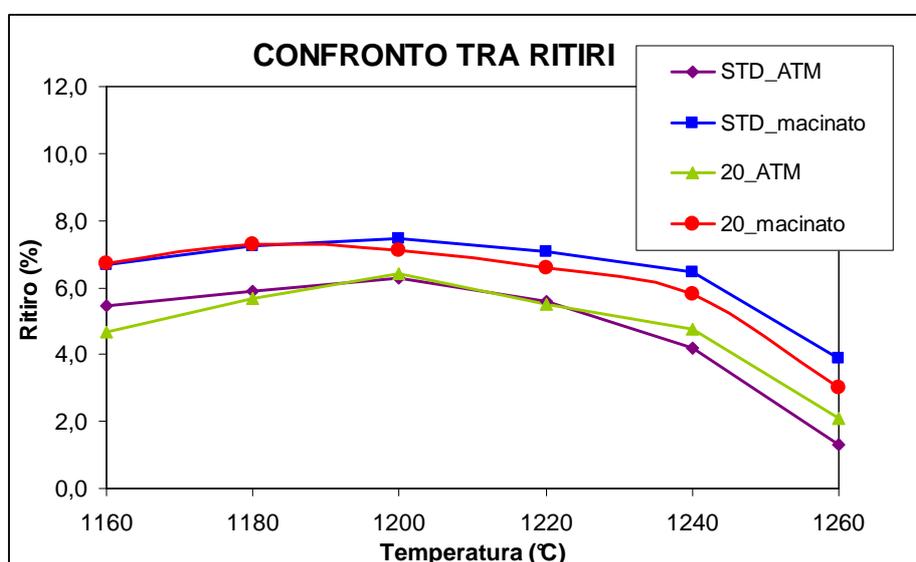


Fig. 6.3: Confronto tra i ritiri e assorbimenti degli impasti atomizzati



Figl. 6.4: Confronto complessivo tra i ritiri degli impasti macinati e atomizzati

Mettendo a confronto i risultati ottenuti, è abbastanza visibile che, alle temperature intermedie (tra 1200°C e 1220°C), l'assorbimento risulta nullo mentre le curve relative al ritiro percentuale sono quasi completamente sovrapposte e con basse pendenze; ciò significa che il materiale è già greificato e non subisce variazioni dimensionali troppo marcate spaziando in quell'intervallo di temperatura.

Mettendo a confronto gli andamenti del ritiro nel caso di impasti macinati con quelli degli impasti atomizzati, viene confermato il fatto che il ritiro in cottura cala se la compattazione del pressato risulta maggiore.

Come spiegato approfonditamente nel paragrafo 2.6, l'utilizzo di polvere atomizzata favorisce maggiore scorrevolezza e impacchettamento dei grani quando essi vengono sottoposti alla pressione di pressatura.

Dati raccolti dalla prova per la determinazione della resistenza a flessione.

DATI STD_ATM	
d(Diametro dei rulli)	20 mm
t (Spessore del rivestimento in gomma dei coltelli)	5±1 mm
l (Distanza fra il punto di appoggio e il bordo del campione)	8,5 mm
L (Distanza fra i punti di appoggio)	320 mm
Lunghezza dei campioni (per il calcolo della distanza dai bordi)	337 mm
b (Larghezza media dei campioni)	337 mm

Tab. 6.7: Dati tecnici di impostazione della macchina e dei provini

STD_ATM							
N° campione	1	2	3	4	5	6	7
F - CARICO (daN)	262,0	229,3	250,7	242,0	248,1	285,2	266,3
SPESSORE MIN(mm)	8,1	8,3	8,1	8,4	8,2	8,7	7,9
S - SFORZO DI ROTT. (N)	2487,83	2177,33	238,05	2297,92	2355,85	2708,13	2528,66
R- RESIST. A FLESSIONE (N/mm ²)	56,88	47,41	54,42	48,85	52,55	53,67	60,78
CARICO MEDIO (N)	254,80						
SFORZO MEDIO (N)	2113,40						
RESIST. A FLESS. MEDIA (N/mm ²)	53,51						

Tab. 6.8: Dati ottenuti dalla prova di flessione sull'impasto STD_ATM

DATI 20_ATM	
d(Diametro dei rulli)	20 mm
t (Spessore del rivestimento in gomma dei coltelli)	5±1 mm
l (Distanza fra il punto di appoggio e il bordo del campione)	10 mm
L (Distanza fra i punti di appoggio)	320 mm
Lunghezza dei campioni (per il calcolo della distanza dai bordi)	340 mm
b (Larghezza media dei campioni)	340 mm

Tab.6.9: Dati tecnici di impostazione della macchina e dei provini

20_ATM							
N° campione	1	2	3	4	5	6	7
F - CARICO (daN)	202,1	201,2	231,2	185,9	195,5	228,1	190,8
SPESSORE MIN(mm)	8,3	8,3	8,0	8,1	7,9	8,1	8,0
S - SFORZO DI ROTT. (N)	1902,12	1893,65	217,60	1749,65	1840,00	2146,82	1795,76
R- RESIST. A FLESSIONE (N/mm ²)	41,42	41,23	51,00	40,00	44,22	49,08	42,09
CARICO MEDIO (N)	204,97						
SFORZO MEDIO (N)	1649,37						
RESIST. A FLESS. MEDIA (N/mm ²)	44,15						

Tab.6.10: Dati ottenuti dalla prova di flessione sull'impasto 20_ATM

La prova di flessione sulle piastrelle prodotte semi – industrialmente hanno dato esiti positivi nel senso che la resistenza a flessione media dell'impasto con vetro riciclato risulta superiore di quasi 10 MPa rispetto al limite minimo imposto dalla norma UNI EN ISO 10545- 4.

Il dato risulta inferiore a quello ricavato dalla prova sui provini lisci prodotti in laboratorio (formato circa 50x100 mm), perché nel processo industriale le piastrelle subiscono una marcatura sul retro: sulla superficie inferiore vengono ricavati intagli e solchi durante la pressatura, per aumentare l'area della piastrella a contatto con i collanti utilizzati durante la posa e di conseguenza la sua aderenza al sottofondo. Ciò rappresenta però un forte indebolimento dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, essendo ogni solco un punto di concentrazione degli sforzi e di conseguenza un possibile punto di innesco di rottura.

CAPITOLO 7

L'INFLUENZA SUI CONSUMI ENERGETICI DELL'AGGIUNTA DI VETRO NELL'IMPASTO

7.1 IL PROBLEMA ENERGETICO E L'INNOVAZIONE TECNOLOGICA

Il fattore che più di ogni altro ha sollecitato la realizzazione di diverse tecnologie innovative nell'industria ceramica negli ultimi decenni è stato la lievitazione dei costi dell'energia, in seguito alla crisi energetica iniziata nel 1974, crisi che si è riflessa nell'aumento dei costi delle fonti energetiche all'inizio degli anni '80.

Nel corso degli anni, l'incidenza dei costi energetici sul costo totale di produzione delle piastrelle ceramiche è stato piuttosto variabile; dall'inizio del nuovo millennio, una forte tendenza all'aumento dei costi dei combustibili ha fatto in modo che la spesa energetica sia oggi la voce di costo prevalente nei bilanci delle industrie ceramiche. Detto ciò, è chiaro che la riduzione, o comunque l'ottimizzazione dei consumi energetici ha costituito nel corso degli anni, uno degli obiettivi principali dell'industria ceramica, insieme alla progettazione, realizzazione e messa a punto di tecnologie energeticamente più efficienti.

Le strategie seguite e le azioni intraprese per conseguire risparmi energetici furono differenti e variarono nel tempo.

Inizialmente lo scopo fu quello di contenere gli sprechi di energia e le azioni intraprese si basarono sul recupero dei flussi energetici in uscita dal processo produttivo che sarebbero altrimenti state scaricate in atmosfera e quindi sprecate.

Esempi in tal senso sono il trasferimento dei fumi dei forni negli atomizzatori, lo sfruttamento dell'aria di raffreddamento indiretto dei forni per gli essiccatoi o per il riscaldamento di certe aree all'interno dello stabilimento di produzione, lo sfruttamento di aria esausta in uscita dagli essiccatoi.

Più tardi, lo scopo fu quello di evitare gli sprechi di energia e i fornitori di impianti si impegnarono a progettare e sviluppare macchine termiche con ridotti consumi energetici.

Molti miglioramenti furono tesi al miglioramento dell'efficienza energetica del forno, poiché l'operazione di cottura rappresenta la fase del processo produttivo col più elevato consumo energetico.

Alcuni esempi sono: la riduzione della massa termica dei carri e delle strutture del forno, l'introduzione della cottura rapida su rulli in forni monostrato, il recupero dei flussi energetici all'interno del forno stesso, l'aumento dell'efficienza di scambio termico tra i gas caldi e il materiale, migliore controllo e regolazione della curva di cottura ed infine l'introduzione di impianti di cogenerazione di energia termica ed elettrica, riutilizzando come aria di essiccamento, le correnti calde recuperate dal forno.

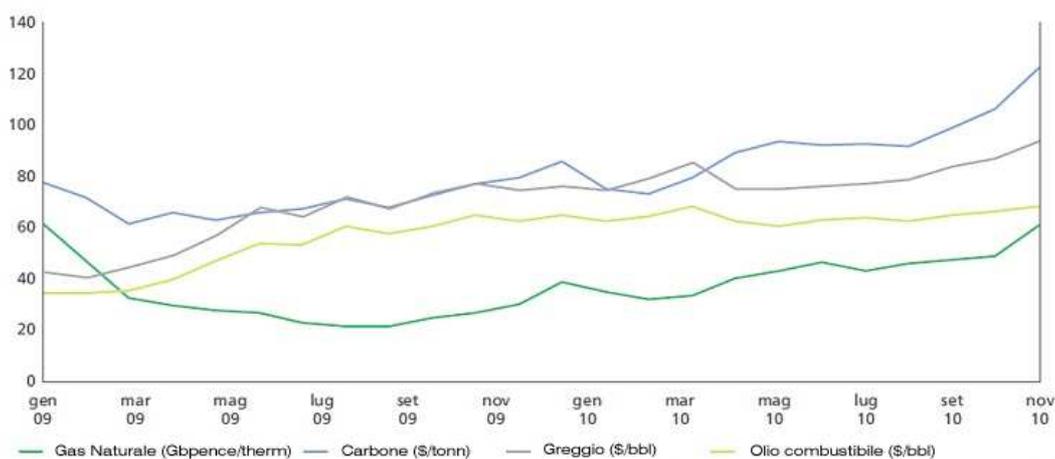


Fig. 7.1: Andamento dei prezzi dei combustibili 2009-2010 (Fonte: Bilancio Enel 2010)

7.2 I FORNI RAPIDI MONOSTRATO

Mediante la cottura i materiali ceramici acquistano caratteristiche meccaniche adeguate alle diverse utilizzazioni e corrispondenti proprietà chimico- fisiche.

Il conseguimento di dette caratteristiche è connesso con le complesse trasformazioni fisiche e chimiche che si verificano nel corso della cottura (vedi capitolo 2).

Cerdomus Ceramiche ha adottato la tecnologia della cottura rapida monostrato, la quale rappresenta una importante innovazione tecnica e produttiva degli ultimi decenni.

Gli oggetti sottoposti a cottura rapida sono infornati in modo da esporre al calore la più ampia superficie possibile; vengono quindi disposti singolarmente su di un piano in modo da formare un unico strato e ricevere il calore da tutte le direzioni nel modo più uniforme. Il ritmo di riscaldamento e raffreddamento va rallentato solo nelle zone critiche, mentre nelle altre fasce di temperatura si adottano gradienti termici molto alti. Oltre alla riduzione del tempo di cottura (passato da 20-40 ore a meno di un'ora), i principali vantaggi tecnico- gestionali che la cottura monostrato è in grado di offrire, sono i seguenti:

- riduzione dei consumi energetici specifici,
- maggiore flessibilità di produzione,
- maggiore flessibilità nella tipologia produttiva e nei formati,
- possibilità di automazione,
- minore ingombro del forno,
- minore inquinamento atmosferico: drastica riduzione del 70% delle emissioni di fluoro.

Nella figura sottostante è riportato uno schema semplificato del bilancio termico e di materia del forno monostrato.

Durante le varie fasi di cottura dei manufatti, si attuano tra la sorgente di calore, i fluidi presenti, le strutture del forno, i manufatti da cuocere e l'ambiente circostante, scambi termici che interessano tutte le modalità di propagazione del calore: la conduzione, poco rilevante, la convezione, fonte principale di trasmissione di calore, e l'irraggiamento, presente in maniera significativa soltanto nelle zone ad alta temperatura.

Il calore fornito al materiale nelle zone di cottura e di preriscaldamento viene poi disperso in parte attraverso le correnti uscenti (fumi di combustione, aria di raffreddamento, materiale cotto), in parte attraverso le pareti (per irraggiamento, per degasaggio).

Nello schema non è stato messo in evidenza il contributo termico corrispondente alle reazioni fisiche e chimiche irreversibili (ad esempio l'evaporazione dell'acqua), in quanto si tratta di un contributo di esigua rilevanza.

Sono invece presenti gli ingressi e le uscite di aria dovute a difettosa tenuta del canale di cottura; in particolare si tratta di entrate di aria in corrispondenza della sezione di ingresso del materiale e attraverso le pareti della zona di preriscaldamento (in depressione), e fuoriuscite di aria calda nelle zone di cottura e raffreddamento, che invece sono in pressione.

Il contributo di queste correnti è di una certa rilevanza.

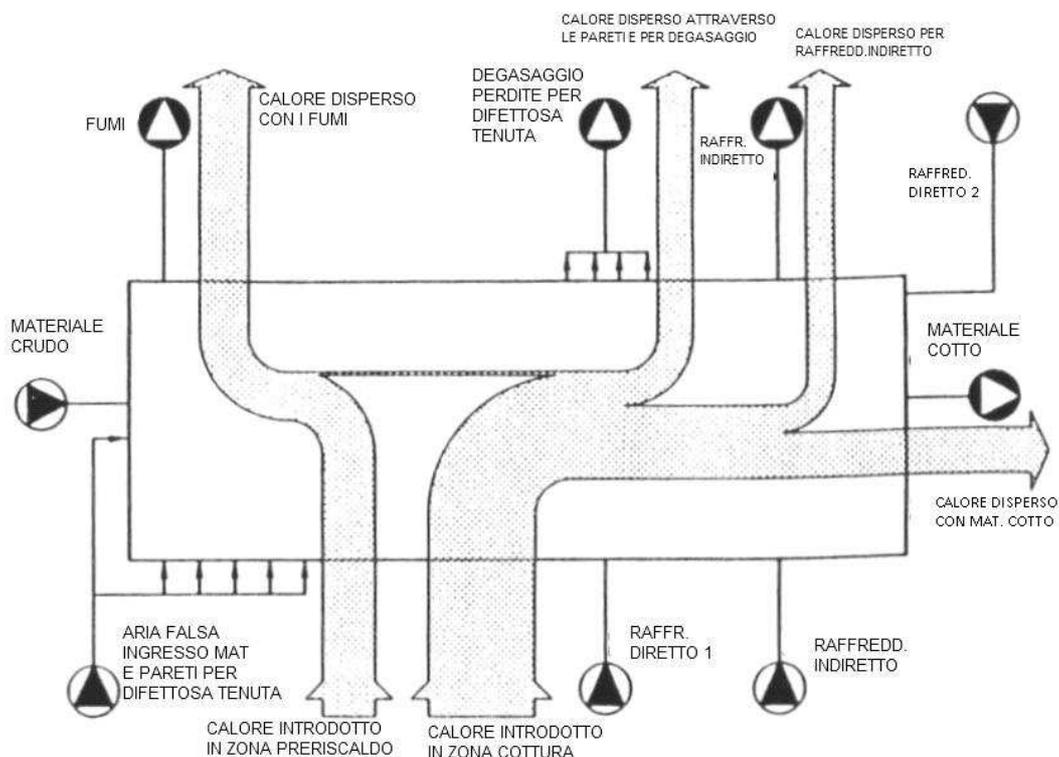


Fig. 7.2: Schema semplificato del bilancio termico e di materia del forno monostrato.

I consumi specifici, in particolare di combustibili, dipendono fortemente non solo dal tipo di prodotto (composizione dell'impasto), ma anche dal tipo di forno e dalle condizioni operative e di gestione, quali durata del ciclo di cottura, gradienti di temperatura di riscaldamento e raffreddamento, temperatura massima,

Nel caso dei forni industriali presenti nello stabilimento, il calore necessario alla cottura si produce sfruttando la combustione del gas metano.

I combustibili gassosi sono particolarmente vantaggiosi in quanto si miscelano completamente con l'aria; ciò comporta che la combustione avvenga con una quantità di aria di poco superiore a quella teorica.

Inoltre possono essere bruciati in prossimità dei manufatti senza provocare danni, non lasciano ceneri, non hanno necessità di preriscaldamento e quindi si possono utilizzare bruciatori relativamente più semplici; permettono di raggiungere temperature molto elevate sia per l'alto potere calorifico (nel caso del metano circa 8150 kcal/Nm^3) che per la possibilità di usare aria preriscaldata, rendono più efficace il controllo del riscaldamento e dell'atmosfera del forno e consentono un risparmio energetico non trascurabile.

Il combustibile gassoso, viene bruciato direttamente nella camera di combustione per essere poi espulso come fumi all'interno del forno, dove transitano le piastrelle; per la combustione si utilizzano bruciatori con miscelazione del combustibile e dell'aria direttamente agli ugelli.

7.3 STIMA DEL RISPARMIO ENERGETICO

Ritornando alle finalità della sperimentazione, avendo a disposizione solo il dato relativo all'abbassamento della temperatura massima di cottura del materiale, è stato effettuato un calcolo approssimato sul risparmio energetico, ma fondato su consumi reali.

È ben chiaro che sono molteplici i fattori che influiscono sul consumo di combustibile durante la cottura; nel paragrafo precedente ne sono stati citati alcuni fra i più importanti (tipo di impasto, quantità di materiale in transito, durata e temperatura massima del ciclo, gradienti di temperatura); non è stato quindi possibile utilizzare una relazione matematica precisa, in cui andare a modificare il dato relativo alla temperatura massima.

Si presuppone che abbassando la temperatura massima tutta la curva di cottura subisca uno schiacciamento verso il basso, provocando la diminuzione dei gradienti di

temperatura durante il riscaldamento e raffreddamento, e una minore perdita di calore per irraggiamento nella sezione dove si raggiungono le massime temperature.

Fortunatamente l'ufficio tecnico di Cerdomus ha fornito preziosi dati reali relativi ai consumi misurati direttamente sui forni in tre diverse condizioni di temperatura massima di cottura :

- T1, durante una prova di cottura a bassa temperatura (biscottatura),
- T2, in condizioni attuali,
- T3, nelle condizioni di cottura praticate fino a novembre 2011.

I dati si riferiscono tutti alla stessa tipologia di forni, in condizioni di carica pressoché costante e riferiti a misurazioni effettuate in periodi non così lontani l'un dall'altro, in modo da poter considerare l'efficienza dell'apparecchio inalterata.

I dati sono stati elaborati mediante foglio di calcolo ed è stato possibile ottenere la corrispondente curva di tendenza.

	Temperatura (°C)	Consumi (Nm ³ /h)
T1	1060	162
T2	1210	247
T3	1220	251

Tab. 7.1 :Dati reali misurati

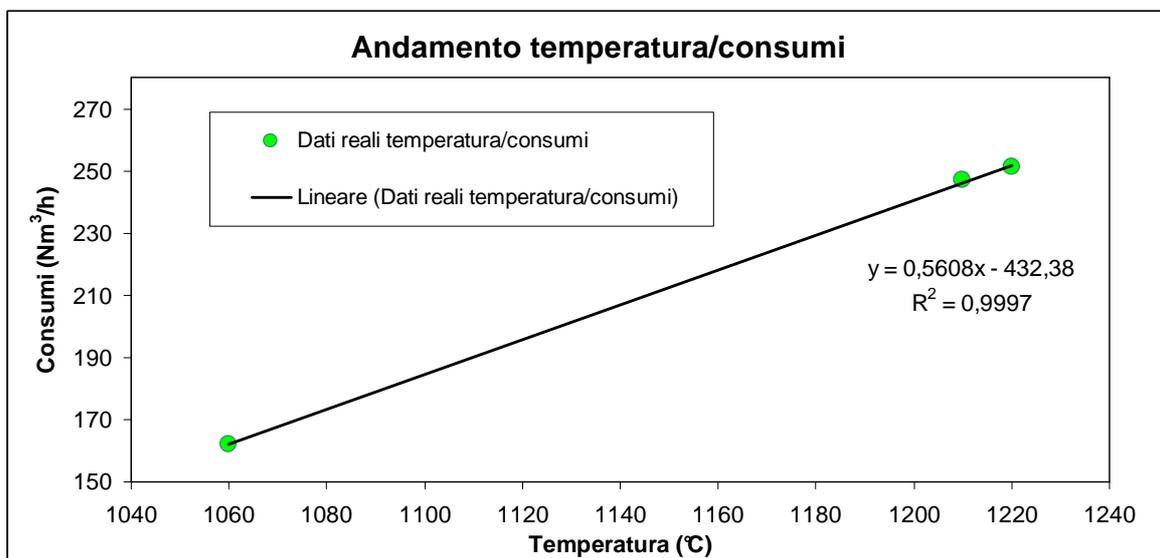


Fig. 7.3 : Curva di tendenza ottenuta dai dati reali

La curva mostra un andamento quasi completamente sovrapponibile a quello di una retta, ciò viene dimostrato matematicamente anche dal valore dello scarto quadratico R^2 molto vicino a 1; con questi dati è perciò lecito utilizzare per il calcolo, l'equazione della retta ottenuta.

Dalle curve di greificazione ottenute sperimentalmente sull'impasto 17 (vedi paragrafo 5.2.3) era risultato che a 1180°C il materiale aveva assorbimento percentuale nullo e in quell'intorno di temperatura il ritiro si manteneva piuttosto costante e sui valori massimi.

Stima del consumo di combustibile del forno con temperatura massima pari a 1180°C:

$$\text{Consumo}(Nm^3 / h) = 0,5608 * 1180 - 432,38 = 229,4 Nm^3 / h$$

Stima della percentuale di risparmio energetico rispetto alle condizioni attuali (approssimando per eccesso il valore dei consumi a 1180°C):

$$\% \text{Risparmio} = \frac{(\text{cons_attuale}) - (\text{cons_1180})}{\text{cons_attuale}} * 100 = \frac{247 - 230}{247} * 100 = 6,9\%$$

Da questa stima risulta che abbassando la temperatura massima del forno di circa 30°C si attua un risparmio pari al 7% circa sul consumo di combustibile.

Questa diminuzione, anche a parere dei tecnici di Cerdomus, risulterebbe piuttosto influente sul bilancio complessivo delle spese dell'azienda e quindi un risultato interessante che merita ulteriore approfondimento.

CAPITOLO 8
CONCLUSIONI

Al termine delle prove sperimentali e delle valutazioni sui risultati è possibile affermare che tutte le finalità preposte all'inizio della ricerca sono state raggiunte.

Dalle prove effettuate presso i laboratori tecnologici dell'industria Cerdomus Ceramiche e del Centro Ceramico Bologna, è stato dimostrato che:

- l'impasto atomizzato numero 20, contenente il 10% in peso di vetro riciclato (post- consumo), ha un comportamento in cottura molto simile all'impasto standard: nell'intervallo di temperatura in cui il materiale greifica le due curve relative al ritiro % sono quasi sovrapponibili e alle stesse temperature l'assorbimento risulta nullo.

Inoltre dalla prova di flessione eseguita su piastrelle prodotte con procedimento semi – industriale, è stato rilevato un valore del modulo di resistenza a flessione (carico di rottura a flessione) superiore al limite minimo imposto dalla norma UNI EN ISO 10545- 4.

- l'impasto numero 17, contenente vetro riciclato in uguale percentuale ma su cui sono state effettuate sperimentazione meno approfondite rispetto a quelle effettuate sul numero 20, necessita di temperature di cottura più basse e può apportare un risparmio di combustibile in fase di cottura intorno al 7%.

Entrambi i materiali soddisfano quindi tutti gli obiettivi di carattere ambientale (riduzione della quantità di materiale di rifiuto da smaltire in discarica, riduzione del fabbisogno di materie prime naturali, ecc) citati nel paragrafo 4.1 e quelli di maggiore interesse per l'azienda che riguardano il risparmio economico sull'acquisto e trasporto delle materie prime e l'aumento del punteggio che i prodotti apporterebbero per la certificazione Leed (vedi paragrafo 3.3).

Come ci si era preposti, nel primo caso si sono mantenute inalterate le condizioni di cottura rispetto all'impasto standard, mentre nel secondo si è ottenuto un impasto che realmente può essere cotto in modo ottimale a temperature inferiori, comportando un rilevante risparmio di energia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Soluzione rifiuti. Percorsi di lavoro su raccolta, compostaggio e riciclaggio dei rifiuti.* - Centro di documentazione pedagogico, Casalecchio di Reno, 1997
- [2] *L'Italia del recupero.* - Rapporto Fise Assoambiente sul riciclo dei rifiuti, 2002
- [3] *Tecnologia ceramica applicata* – Sacmi, vol. 1-2
- [4] William F. Smith, *Scienza e tecnologia dei materiali* – McGraw - Hill
- [5] *Preparazione materie prime e formatura di piastrelle ceramiche* – ACIMAC
- [6] *LEED leadership in energy and environmental design : linee guida per l'applicazione dei crediti LEED alle piastrelle di ceramica* – Confindustria ceramica, Centro Ceramico
- [7] Alain Chrisment, *Colore e Colorimetria* - Datacolor international
- [8] Materiale delle lezioni del corso di colorimetria applicata – dott.ssa Rastelli, Centro Ceramico BO
- [9] I consumi energetici nella produzione delle piastrelle ceramiche – Ed. Int Centro Ceramico, Bologna.
- [10] Piastrelle ceramiche & Energia – Banca dati dei consumi energetici nell'industria delle piastrelle di ceramica, Centro Ceramico Bologna.

RINGRAZIAMENTI

Con questa pagina si conclude la mia tesi, anche se non sarebbe corretto definirla esclusivamente "mia"; per la sua realizzazione sono stati necessari e preziosissimi i contributi di molte persone, a cui sarebbe il minimo rivolgere un ringraziamento sincero.

Per primo cito il Professore Ing. Alberto Fregni, che fin dal primo giorno di lezione si è dimostrata una persona molto disponibile e durante tutto il periodo di sperimentazioni e scrittura dell'elaborato, mi ha supportato con consigli e preziose revisioni.

Lo ringrazio anche per la simpatia e la sua naturale schiettezza, perché a differenza di tanti ha svolto fin troppo egregiamente la sua funzione di insegnante e relatore.

Mi sento in dovere di ringraziare tutti i dipendenti della Cerdomus Ceramiche che ho incontrato durante il periodo di tirocinio, lo staff del laboratorio tecnologico e in particolare Roberto Brusa e l'Ing. Lorenzo Righini.

Oltre alla loro grande disponibilità e gentilezza, mi hanno dato la possibilità di portare avanti la ricerca mettendomi a disposizione il loro tempo, le loro conoscenze e tutte le attrezzature necessarie.

Mi piacerebbe rivolgere un sentito ringraziamento anche a tutti i dipendenti del Centro Ceramico Bologna, senza i quali non sarebbe stato altrettanto possibile portare a termine le sperimentazioni. Anche da tutti loro ho ricevuto una incredibile accoglienza e gentilezza, oltre che l'aiuto tecnico a svolgere le prove sui materiali.

Tra tutto il personale mi piacerebbe citare in particolare la Dott.ssa Eugenia Rastelli, la quale si è dimostrata non solo, un indispensabile supporto tecnico per la realizzazione delle sperimentazioni, ma anche una amica. Oltre a molti chilometri di autostrada, si è resa disponibile a condividere con me piacevolissime chiacchierate, anzi momenti che per me e per l'età che ho, hanno un peso ben più grande di semplici chiacchiere.

Come ho affermato all'inizio di questa pagina, sarebbe una bugia attribuire esclusivamente a me stessa la realizzazione di questa ricerca; oltre alle persone appena citate se ne aggiungono moltissime altre, le quali, forse inconsapevolmente e indirettamente mi hanno supportato fino ad ora.

Scrivere queste righe mi rende molto contenta, non solo per la consapevolezza di essere al termine del mio ciclo di studi, ma soprattutto perché inevitabilmente mi tornano in mente i momenti più belli e più tristi degli ultimi cinque anni.

Sono felice di poterli ricordare tutti con gioia perché senza non avrei potuto rispondere a molti di quei punti interrogativi che in questi anni sono sorti, poi scomparsi e ritornati.

Immagino che la maggior parte di adulti che leggeranno queste righe staranno pensando che in realtà le difficoltà e le decisioni importanti non sono ancora iniziate per me; concordo nel fatto che è giunto davvero il momento di rimboccarsi le maniche, ma sono convinta anche che non è possibile realizzare nulla di buono se alle spalle non c'è un progetto spinto da valide e consapevoli motivazioni.

Questi anni sono stati dunque fondamentali per decidere a cosa dare davvero importanza e cosa non deve mancare per la buona riuscita dell'opera.

Sono state le persone che ho incontrato, con le loro esperienze, i loro sbagli, i loro rimpianti e il loro esempio ad aiutarmi nelle decisioni e a rispondere un po' alla volta ai come e ai perché.

Ringrazio di cuore la mitica nonna Tudina, a cui ho dedicato la tesi, grande, grandissimo esempio di forza e bontà, a cui mi auguro di assomigliare non solo esteticamente ma in tutto il resto. Avrei tanto voluto che mi supportasse per molti altri anni della mia vita, ma so per certo che la sua fede ha mantenuto la mia famiglia unita in periodi difficili e questo è sicuramente il regalo più grande che poteva farmi.

Ringrazio i miei genitori, le mie radici, a cui fin da piccola ho sempre voluto dimostrare di meritarmi la loro approvazione; non so se ci sono riuscita, io me lo auguro, in ogni caso sono grata per l'educazione cristiana che mi hanno dato, per gli schiaffoni ricevuti quando facevo i capricci, per avermi lasciata libera di risolvere le situazioni difficili, per i consigli e per avermi insegnato l'importanza della famiglia.

Restando nello stesso ambito, non posso non ringraziare Elisa, l'architetto della famiglia, ma prima ancora mia sorella. La ringrazio, perché seppure le nostre personalità siano così diverse non si stanca di portare avanti il suo ruolo di sorella maggiore, nonostante sia prossima ad acquisire quello ben più importante di moglie, e le auguro presto anche di madre.

Mi sento di ringraziare anche Luca, prima come compagno di studi, perché insieme a Stefano e Samuele sono stati colonne fondamentali e ottimi professori di meccanica; e poi come fidanzato, perché so quanto mi vuole bene e che come me, sta gettando nella sua testa un bel progetto insieme; grazie perché mi dai la possibilità di realizzare ciò in cui credo.

Ringrazio tutti i miei amici, Cinzia, Sara, Timo, Porto, Iulia, tutto il gruppo di S.Silvestro, lo staff della piscine di Forlimpopoli e di Forlì (che sono state per anni come le mie seconde case); ringrazio anche tutti i parenti e i conoscenti, come le Sig. ne Bianca, Silvana e Lina che mi dimostrano in ogni occasione la loro vicinanza e affetto.

Mi dispiace non poter citare tutti coloro che, anche solo con una battuta, hanno lasciato un pezzettino di loro in me.

Concludo, volendo ringraziare Colui che non si offenderà se viene citato per ultimo, perché sa che in realtà è al primo posto.

Mi da ogni volta una immensa gioia pensare che le vere difficoltà della vita possono essere superate se accettate e affidate al Suo volere.

So di non essere mai sola e di desiderare la Sua volontà per i giorni avvenire.

Claudia

*“Il grazie è abituale sulle labbra di chi non si sente padrone di nulla e
comprende che nulla di ciò che ha è suo”*

(Don Oreste Benzi)