

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Laurea triennale in Ingegneria dei materiali**

***“ Produzione sperimentale di crogioli silico-alluminosi utilizzati  
nella fusione di metalli preziosi ”***

**Laureando: Enrico Ganzer**

**Matricola n° 561751**

**Docente relatore: Prof. Massimo Guglielmi**

**Anno Accademico 2011/2012**



# INDICE

Cap. 1: Introduzione.....	pag. 5
1.1: Descrizione dell'attività.....	pag. 5
Cap. 2: Materiale di base.....	pag. 6
Cap. 3: Altri materie prime utilizzate.....	pag. 8
3.1: Plastificanti.....	pag. 8
3.2: Smagranti.....	pag. 10
3.3: Fondenti.....	pag. 11
Cap. 4: Formulazione dei primi impasti di prova.....	pag. 13
4.1: Inventario delle materie prime.....	pag. 13
4.2: Metodo di proporzione delle miscele.....	pag. 14
4.3: Formulazione dei primi impasti.....	pag. 15
4.4: Precisazioni.....	pag. 18
Cap. 5: Miscelazione.....	pag. 19
5.1: Caratteristiche dell'impasto.....	pag. 19
5.2: Meccanismi di miscelazione.....	pag. 20
5.3: Miscelatori industriali.....	pag. 21
5.4: Procedimento pratico di miscelazione.....	pag. 23
Cap. 6: Stampaggio.....	pag. 23
6.1: Tecnica di stampaggio adottata.....	pag. 24
6.2: Le operazioni di stampaggio.....	pag. 24
Cap. 7: Essiccazione e cottura.....	pag. 27
7.1: Il fenomeno dell'essiccamento.....	pag. 27
7.2: Modalità di essiccazione.....	pag. 28
7.3: Il processo di cottura.....	pag. 28
7.4: Analisi delle fasi di cottura.....	pag. 30
7.5: Controllo dei parametri di cottura.....	pag. 32

Cap. 8: Test di resistenza alle alte temperature.....	pag. 33
8.1: Operazioni post-cottura.....	pag. 33
8.2: Analisi dei ritiri.....	pag. 33
8.3: Cementazione dei crogioli.....	pag. 34
8.4: Test nel forno a induzione.....	pag. 35
8.5: Precisazioni.....	pag. 39
 Cap. 9: Procedura di miglioramento materiali e formulazione nuovi impasti.....	pag. 39
9.1: Analisi dei primi test.....	pag. 40
9.2: Formulazione di nuovi impasti modificati.....	pag. 40
9.3: Test nel forno a induzione e analisi dei risultati.....	pag. 43
9.4: Scelta di nuove materie prime, riformulazione degli impasti..	pag. 43
9.5: Test nel forno a induzione e ultime prove di accertamento....	pag. 47
9.6: Considerazioni.....	pag. 49
 Cap. 10: Analisi dei prodotti.....	pag. 49
10.1: Densità di un ceramico.....	pag. 50
10.2: Porosità in un ceramico.....	pag. 50
10.3: Assorbimento d'acqua.....	pag. 52
10.4: Prove di densità, porosità e assorbimento d'acqua.....	pag. 52
 Cap. 11: Analisi dei costi.....	pag. 55
11.1: Considerazioni generali.....	pag. 55
11.2 Calcolo del costo unitario dei crogioli.....	pag. 56
 Cap. 12: Conclusioni.....	pag. 58
12.1: Soddisfazione delle richieste.....	pag. 58
12.2: Eventuali migliorie da attuare al ciclo produttivo.....	pag. 59
12.3: Considerazioni personali.....	pag. 61
 Bibliografia.....	pag. 62

## **1. INTRODUZIONE**

Oggetto della seguente tesi sarà la descrizione della mia esperienza di tirocinio, svolta presso la ditta ITALKER S.R.L. di Bassano del Grappa.

Italker lavora nel campo dei ceramici da più di trent'anni ed è specializzata nelle ceramiche tecniche e nei refrattari. In particolare è partner per grandi firme costruttrici di macchinari per l'industria orafo-argenteria con produzione di pezzi speciali per la costruzione di forni ad induzione, crogioli per forno statico, ricambi per colata continua, pezzi speciali in grafite estrusa e isostatica, prodotti isolanti e superconduttori.

### **1.1 Descrizione dell'attività**

Dopo un iniziale periodo di inserimento in azienda, mirato alla spiegazione di tutti i vari aspetti produttivi svolti, è stata scelta tra varie proposte quella che sarebbe stata l'attività di tirocinio: la produzione di un nuovo ceramico da sostituire a quello attualmente impiegato in azienda per la formazione di crogioli.

Si tratta di pezzi che andranno montati in forni statici destinati all'industria dei metalli preziosi, in particolare per la fusione di oro e argento.

Ad onor del vero dovrebbero essere chiamati porta-crogioli, dal momento che il crogiolo vero e proprio è contenuto in essi ed è di grafite, ma in azienda si è soliti chiamarli così.

Comunque sia, lo scopo del lavoro è stato quello di creare un nuovo impasto ceramico al fine di inserirlo nel ciclo produttivo dei "vecchi" crogioli senza attuare alcuna modifica ai parametri costruttivi e/o variare le tecniche di fabbricazione. In sostanza cambiava solo il materiale di partenza mentre restavano immutate tutte le altre fasi di produzione.

Quindi il nuovo prodotto doveva adeguarsi al ciclo produttivo usuale sviluppato secondo le seguenti fasi:

- *formulazione della miscela di polveri;*
- *miscelazione con l'aggiunta di acqua;*
- *stampaggio alla forma finale;*
- *essiccazione e cottura;*
- *applicazione del crogiolo in grafite (cementazione);*
- *test nel forno ad induzione.*

Le caratteristiche richieste al nuovo prodotto sono sostanzialmente le stesse del precedente, ossia la possibilità di essere montato in forni statici che raggiungano temperature di circa 1100°C o poco superiori in modo da poter lavorare con i metalli preziosi usuali che, esclusi il palladio e platino, fondono a temperature inferiori ai 1100°C.

Altro fattore da tenere a conto è la possibilità di essere lavorato e processato come l'altro materiale da sostituire, in particolare si dovrà prestare bene allo stampaggio come si prestava bene il precedente.

Tutti questi aspetti saranno comunque ben sviluppati nelle successive pagine.

## **2. MATERIALE DI BASE**

Come materiale base per l'impasto è stato scelto il minerale Andalusite, un allumino-silicato appartenente alla famiglia della sillimanite. La varietà utilizzata è prodotta da Damrec, un'azienda francese del gruppo Imerys, colosso europeo nel settore dei minerali.

Come suggerisce il nome, L'Andalusite proviene dalla nota regione della Spagna meridionale e Damrec, attraverso complesse procedure di lavorazione, riesce a fornire un prodotto dell'Andalusite di elevata purezza, la Kerphalite, che nello specifico è il materiale utilizzato nel lavoro.

Le principali caratteristiche del materiale sono le seguenti:

- alta refrattarietà: punto di fusione superiore a 1800°C;
- bassa espansione termica;
- buona compatibilità e possibile miscelazione con sabbia silicea;
- coerenza di composizione e distribuzione granulometrica;
- pH neutro;
- non contiene silice cristallina;

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
60.8 %	38.1 %	0.45 %	0.1 %	0.15 %

*Tab. 2.1 – Analisi chimica della Kerphalite KF.*

<b>Peso specifico</b>	3.1 g/cm <sup>3</sup>
<b>Densità di bulk</b>	1.7 g/cm <sup>3</sup>
<b>Refrattarietà (cono di Seger)</b>	1840°C (38)

*Tab. 2.2 – Caratteristiche fisiche della Kerphalite.*

Queste sono le caratteristiche, unite anche a convenienze economiche e di reperibilità che devono essere sempre tenute presenti, che hanno condotto alla scelta della Kerphalite come materiale di base per gli impasti.

L'ordine avanzato ai fornitori è stato inizialmente di una qualità denominata Kerphalite KF divisa in due granulometrie, 0/160 µm e 50/350 µm, denominate "fine" e "grossa" rispettivamente. La scelta di queste due granulometrie iniziali è stata fatta in modo da avere a disposizione gli estremi inferiore e superiore del range dimensionale esistente in commercio per quel tipo specifico di prodotto, in modo da poter poi eventualmente spaziare in esso nelle successive modifiche agli impasti.

### **3. ALTRE MATERIE PRIME UTILIZZATE**

Scelto il materiale di base, che viene chiamato inerte, restano da definire le altre materie prime impiegate per la formulazione degli impasti.

Nella tecnologia di fabbricazione ceramica si individuano molti componenti importanti alla realizzazione di un prodotto, al di fuori dell'elemento principale che è l'inerte. Questi componenti sono individuati e suddivisi in base alla loro funzione principale in:

- PLASTIFICANTI;
- SMAGRANTI;
- FONDENTI.

#### **3.1 Plastificanti**

La funzione plastificante è dovuta alle argille unitamente all'apporto di acqua che con esse interagisce. La proprietà fondamentale di una argilla è quella di fissare o di orientare attorno a sé l'acqua in modo da creare un sistema argilla-acqua opportunamente dosato tale da potersi deformare sotto l'azione di uno sforzo

meccanico conservando la forma assunta al cessare dell'azione deformante, tale è la plasticità.

Le argille non sono altro che dei silicati di alluminio formati dal sovrapporsi di unità strutturali diverse, intercalate da strati di acqua. Le due unità principali sono silice ed allumina organizzate in tetraedri e ottaedri rispettivamente, ed entrambe si sviluppano preferenzialmente lungo dei piani e non tridimensionalmente.

A seconda della successione delle due strutture e dell'acqua si hanno diversi tipi di argille, riassunte nelle più importanti caolinite,  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ , e montmorillonite,  $Al_2(Si_2O_5)_2(OH)_2 \cdot nH_2O$ .

Le argille utilizzate per questo progetto sono tre, tutte prodotte dal gruppo Imerys, e sono:

- ARGILLA HYWITE;
- ARGILLA 3039;
- CAOLINO STANNON.

Le prime due argille sono state selezionate principalmente pensando al successivo processo di stampaggio, poiché risultano le migliori in quel tipo specifico di applicazione.

Si tratta di argille costituite da montmorillonite e altre argille in miscela che ovviamente il produttore si riserva di specificare; spicca tra le due l'argilla 3039 essendo sulla carta la più plastica di tutte, mentre la hywite sta ad indicare la buona qualità essendo priva di molte impurezze tipiche.

Per quanto riguarda il caolino, quello denominato stannon è uno dei vari prodotti disponibili ed è quello più comunemente chiamato china clay.

Questo tipo di caolino risulta meno plastico perché appunto costituito da caolinite, che si comporta diversamente con l'acqua rispetto a una montmorillonite. La sua peculiarità sta nel resistere bene al calore, e in particolare questo caolino è stato cotto a circa 1500°C.

<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O, CaO, MgO</b>
39.5 %	54.5 %	1.5 %	1.7 %	0.8 %	0.7 %

*Tab. 3.1 – Analisi chimica di una tipica argilla.*

### **3.2 Smagranti**

Per quanto riguarda gli smagranti, la loro caratteristica è quella di essere privi di plasticità e di non presentare ritiro dopo cottura, qualità indispensabile per sopperire ai forti ritiri delle argille e quindi per mantenere l'integrità del pezzo.

Lo smagrante principe è la chamotte che deriva da argilla preventivamente cotta in un forno rotativo a circa 1400°C e poi macinata, e la molochite che proviene invece dalla calcinazione di caolini a 1500°C.

La chamotte ha la funzione di creare una struttura di sostegno non plastica all'interno del prodotto, aumentando lo sforzo di snervamento.

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Na<sub>2</sub>O, MgO, CaO</b>
52.9 %	43 %	1.6 %	1.3 %	0.5 %	0.6 %

*Tab. 3.2 – Analisi chimica della chamotte.*

La molochite invece dà il suo contributo maggiore nella resistenza agli shock termici con il suo basso coefficiente di espansione termica ( $4.4 \times 10^{-6}$ ).

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>TiO<sub>2</sub>, CaO</b>
54 %	42 %	2 %	1.3 %	0.3 %	0.14 %

*Tab. 3.3 – Analisi chimica della molochite.*

### **3.3 Fondenti**

Infine si analizza l'azione svolta dalle sostanze cosiddette fondenti.

Queste provocano la formazione di fase liquida a temperature inferiori alla normale temperatura eutettica, che sarebbe la temperatura più bassa alla quale si ha comparsa di fase liquida. Da qui il nome che sta ad indicare la formazione di eutettici appunto più basso-fondenti.

I più usati sono i feldspati, i fosfati ed il carbonato di calcio ma i più importanti sono i primi.

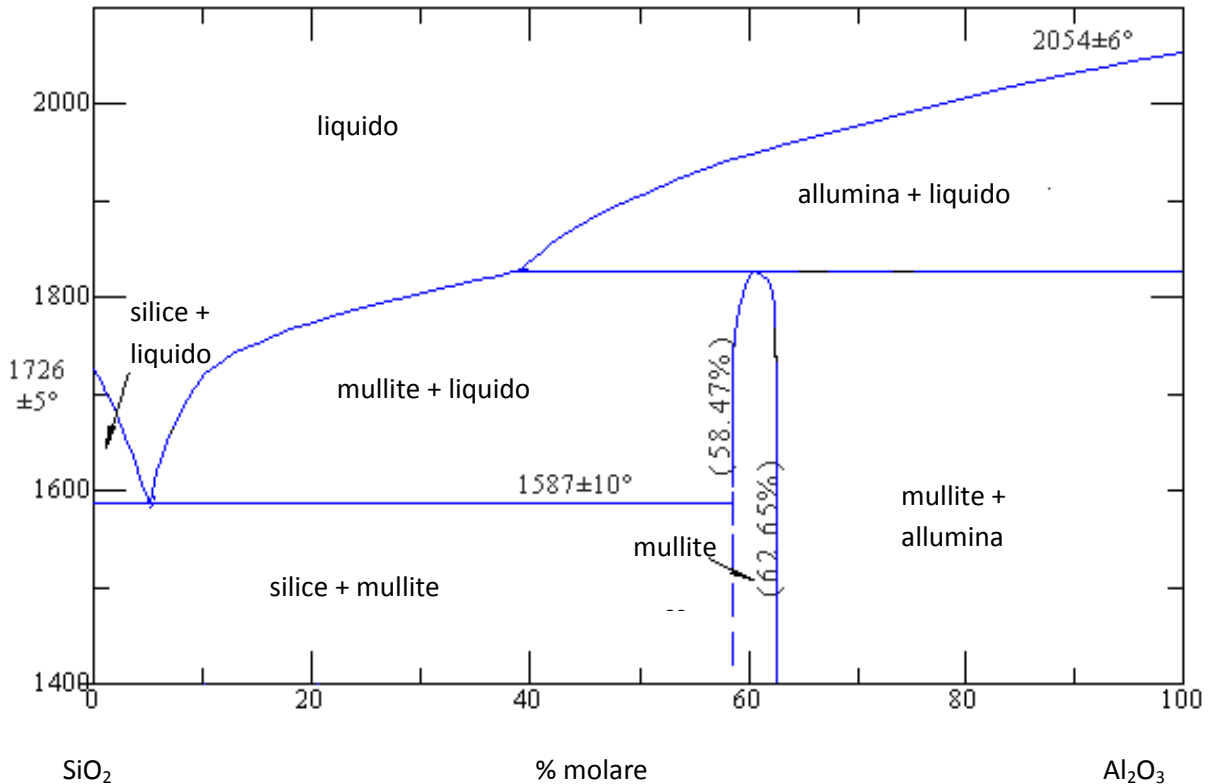
I feldspati più diffusi in natura sono quelli di sodio (albite,  $\text{Na}_2\text{OAl}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ), di potassio (ortose,  $\text{K}_2\text{OAl}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$ ) e di calcio (anortite,  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ ) e frequentemente si trovano in commercio miscele isomorfe dei vari feldspati che presentano un rammollimento tra i 1100°C e i 1300°C.

<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>CaO</b>	<b>MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub></b>
68 %	18.2 %	6.7 %	4.7 %	0.5 %	0.8 %

*Tab. 3.4 – Analisi chimica del feldspato.*

Analizzate queste tre materie prime si potrebbe già formulare qualitativamente un impasto ceramico per la produzione dei crogioli; tuttavia, per avere una più vasta gamma di impasti di prova si preferisce aggiungere alle normali miscele di polveri anche silice ed allumina pure. Così facendo si ha modo di spaziare idealmente nel

diagramma di stato silice-allumina, così da avere un riferimento più vasto nelle composizioni e cercare di trarre ancora informazioni da esse.



*Fig. 3.1 – Diagramma di stato Silice-Allumina.*

Quindi in aggiunta agli elementi descritti sopra si devono citare anche silice ed allumina, che nello specifico sono silice fusa ed allumina calcinata.

La silice fusa è ottenuta per fusione con arco elettrico di silice cristallina, ossia quarzo, di alta qualità e presenta un grado di purezza del 99.5 %.

L'allumina calcinata invece è l'idrossido di alluminio trattato sopra i 1100°C, ed è quella usualmente impiegata nel campo dei refrattari, con un grado di purezza del 99.9%.

#### **4. FORMULAZIONE DEI PRIMI IMPASTI DI PROVA**

Completata la discussione delle materie prime di uso comune nella fabbricazione ceramica, restano da elencare nello specifico i materiali impiegati nel progetto.

##### **4.1 Inventario delle materie prime**

- **ARGILLA HYWITE**: di alta qualità, Imerys la propone come il prodotto di punta per quanto riguarda la purezza.
- **ARGILLA 3039**: argilla tedesca ad elevata plasticità.
- **CAOLINO STANNON**: prodotto da Imerys, è il caolino comunemente usato in azienda.
- **CHAMOTTE -120**: prodotta da AGS Mineraux, sempre del gruppo Imerys, con grado della farina (flour grade) di -120 che equivale a una granulometria media di 125  $\mu\text{m}$ .
- **MOLOCHITE -30**: prodotta da Imerys, con grado di distribuzione dei grani (grain grade) di -30 che corrisponde a una granulometria media di 500  $\mu\text{m}$ .
- **SILICE 50/100**: silice fusa con grain grade da 50 mesh a 100 mesh, ossia da 300  $\mu\text{m}$  a 150  $\mu\text{m}$ .
- **ALLUMINA CALCINATA**: prodotta da un'azienda austriaca del gruppo Imerys, presenta un flour grade di -200 che corrisponde a un valore medio di 75  $\mu\text{m}$ .
- **KERPHALITE KF**: già descritta al capitolo 2, utilizzata in due diverse granulometrie da 0/160  $\mu\text{m}$  (fine) e 50/350  $\mu\text{m}$  (grossa).

##### **4.2 Metodo di proporzione delle miscele**

Per la realizzazione dei primi impasti di prova si è partiti da una formulazione standardizzata da me che prevedeva, dopo aver fissato un quantitativo di materiale inerte di base cioè la kerphalite, una proporzione fissa delle altre materie prime.

Tenuto come riferimento l'inerte, si calcola il 20 % del suo valore come dose per lo smagrante (chamotte o molochite) e per la silice o allumina aggiunte, mentre la quantità delle argille la si ricava rispetto alla miscela totale di polveri inerte più elemento aggiunto, inteso come smagrante, silice o allumina, ed il valore è ancora del 20 %.

Va precisato che il tenore del 20 % di argilla si intende come quantità totale dei tre tipi di argilla impiegati, che si ripartiscono in maniera diversa e variabile da impasto a impasto.

Questi valori sono teorici in quanto al momento della ripartizione reale delle polveri si cerca di arrotondare il peso ai 50 g per comodità di dosatura, ricalcolando poi le percentuali effettive, che comunque non si discostano di molto dal valore predefinito.

Riassumendo schematicamente:

***Q.tà di KERPHALITE fissata → 20 % SMAGRANTE (o silice, allumina)***

***Q.tà di KERPHALITE + ELEMENTO AGGIUNTO fissata → 20 % ARGILLA***

***Q.tà di POLVERE TOTALE fissata → 10 % ACQUA (circa)***

Le proporzioni sono state calcolate sulla base della letteratura riguardante il particolare tipo di ceramici e sulla tecnologia adottata usualmente in azienda.

Ma se per lo smagrante la percentuale del 20 % si è rivelata fin da subito idonea, non si può dire altrettanto per l'argilla.

Infatti il tenore teorico iniziale doveva essere del 10 % massimo 15 % calcolato tenendo conto della lavorazione di stampaggio che avrebbe dovuto subire la massa plastica, ma durante l'impastatura non si riusciva a raggiungere una plasticità sufficiente alla lavorazione. È stato necessario quindi un'aggiunta di argilla fino al punto da rendere idonea la massa plastica.

Altro discorso per la quantità d'acqua aggiunta: per trovare il giusto dosaggio d'acqua si deve procedere per tentativi aggiungendo minime dosi nell'impasto in modo da raggiungere la massima quantità d'acqua tollerabile per poter essere lavorato, che generalmente risultava essere circa il 10 % in peso.

Bisogna specificare che la formulazione iniziale degli impasti è servita unicamente ad avere una prima gamma di campioni da poter studiare e tali da permettere di trarre le prime conclusioni, molto importanti per la pianificazione delle modifiche successive.

#### ***4.3 Formulazione dei primi impasti***

I primi impasti di prova formulati sono stati cinque, denominati K1, K2, K3, K4, K5, dove la lettera K sta ad indicare che l'elemento base è la kerphalite.

Di seguito una lista dei vari impasti, con le relative quantità utilizzate.

I quantitativi delle polveri sono stati calcolati in modo da avere abbastanza materiale per poter ricavare 5 campioni per ogni tipo, così da essere abbastanza certi dell'omogeneità dei risultati e di non incorrere in coincidenze.

### **IMPASTO K1**

Kerphalite fine → 2.5 kg

Kerphalite grossa → 2.5 kg

Chamotte → 1 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.15 kg

Argilla hywite → 0.15 kg (totale argille= 19.2 % ripartite in 2.5 %, 2.5 %, 14.2 %)

Argilla 3039 → 0.85 kg

Acqua → 0.75 kg (10.5 % rispetto al totale polveri)

### **IMPASTO K2**

Kerphalite fine → 2.5 kg

Kerphalite grossa → 2.5 kg

Molochite → 1 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.15 kg

Argilla hywite → 0.15 kg (totale argille= 19.2 % ripartite in 2.5 %, 2.5 %, 14.2 %)

Argilla 3039 → 0.85 kg

Acqua → 0.75 kg (10.5 % rispetto al totale polveri)

### **IMPASTO K3**

Kerphalite fine → 2.5 kg

Kerphalite grossa → 2.5 kg

Silice → 1 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.15 kg

Argilla hywite → 0.15 kg (totale argille= 19.2 % ripartite in 2.5 %, 2.5 %, 14.2 %)

Argilla 3039 → 0.85 kg

Acqua → 0.725 kg (10.1 % rispetto al totale polveri)

#### **IMPASTO K4**

Kerphalite fine → 2.5 kg

Kerphalite grossa → 2.5 kg

Allumina → 1 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.2 kg

Argilla hywite → 0.2 kg (totale argille= 20.8 % ripartite in 3.3 %, 3.3 %, 14.2 %)

Argilla 3039 → 0.85 kg

Acqua → 0.88 kg (12.1 % rispetto al totale polveri)

#### **IMPASTO K5**

Kerphalite fine → 2.5 kg

Kerphalite grossa → 2.5 kg

Chamotte → 1 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.5 kg

Argilla hywite → 0.1 kg (totale argille= 20.8 % ripartite in 8.3 %, 1.7 %, 10.8 %)

Argilla 3039 → 0.65 kg

Acqua → 0.74 kg (10.2 % rispetto al totale polveri)

	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>	<b>K4</b>	<b>K5</b>
<b>Ker F</b>	35 %	35 %	35 %	34.5 %	34.5 %
<b>Ker G</b>	35 %	35 %	35 %	34.5 %	34.5 %
<b>Chamotte</b>	14 %				13.8 %
<b>Molochite</b>		14 %			
<b>Silice</b>			14 %		
<b>Allumina</b>				13.8 %	
<b>Caolino</b>	2 %	2 %	2 %	2.7 %	6.9 %
<b>Arg. hywite</b>	2 %	2 %	2 %	2.7 %	1.4 %
<b>Arg. 3039</b>	12 %	12 %	12 %	11.7 %	8.9 %

*Tab. 4.1 – Composizione riassuntiva dei primi cinque impasti di prova. Le quantità sono indicate rispetto al totale delle polveri in modo cumulativo fino al 100 %.*

#### **4.4 Precisazioni**

Date per fissate e motivate le dosi iniziali relative a chamotte, molochite, silice e allumina nonché le quantità totali di argilla, restano da spiegare le ripartizioni fatte tra i due tipi di kerphalite e i tre tipi di argilla.

Per quanto riguarda l'inerte, non avendo ancora un riscontro sul comportamento e sulle prestazioni delle diverse granulometrie dopo cottura, la scelta è stata per una ripartizione equa tra la fine e la grossa, riservando eventuali modifiche per i successivi impasti.

La ripartizione delle argille invece si è basata pensando principalmente alla successiva operazione di stampaggio, quindi è stato maggiorato il contributo dell'argilla 3039 data come la più plastica, rispetto all'argilla hywite e al caolino, ripartiti in eque dosi.

Unica eccezione nell'impasto K5 dove, a parità di inerti e chamotte come nel K1, si è voluto aumentare il caolino a scapito dell'argilla hywite e 3039 in modo da avere una variante per studiare la lavorabilità e il ritiro finale. La lieve aggiunta di argille nell'impasto K4 invece è stata fatta durante lo stampaggio per via della difficile lavorabilità dell'impasto.

Infine restano da motivare la presenza nei primi quattro impasti di chamotte, molochite, silice ed allumina rispettivamente.

Se chamotte e molochite sono state utilizzate come smagranti, la silice e l'allumina sono state inserite per avere due varianti di prodotto opposte, in modo da occupare idealmente una regione più estesa del diagramma silice-allumina per valutare la successiva direzione da prendere; oppure nel caso di un esito negativo, escluderle entrambe dalle formulazioni dei futuri impasti.

## **5. MISCELAZIONE**

Prima di analizzare nello specifico la tecnica d'impastatura adottata, bisogna soffermarsi sulla natura della miscela di polveri e di liquido ottenuta.

### **5.1 Caratteristiche dell'impasto**

Nel caso in esame l'unico elemento aggiunto alle polveri è l'acqua, avendo escluso l'utilizzo di altri leganti al di fuori delle argille, definite tecnicamente leganti colloidali inorganici.

Quindi il quantitativo di acqua del 10 % circa è stato aggiunto con lo scopo di far raggiungere alla miscela la giusta consistenza, cioè quella definita con il termine di "*massa plastica*", dove si ha la minima quantità di liquido sufficiente a legare tra loro tutti i granuli in un'unica massa.

Tuttavia, la consistenza può anche essere espressa attraverso un parametro detto grado di saturazione dei pori, DPS, definito come il rapporto tra il volume di liquido e il volume dei pori. Allora la massa plastica possiede un  $DPS \leq 1$  che è indice di una saturazione completa dei pori più piccoli da parte dell'acqua, costituendo una fase interconnessa.

## **5.2 Meccanismi di miscelazione**

La miscelazione è un fenomeno indotto dall'esterno che mira al trasporto di materia nella massa plastica attraverso tre meccanismi:

- convezione;
- scorrimento;
- diffusione.

La convezione trasferisce i componenti da una zona all'altra della miscela, lo scorrimento o sforzo di taglio accresce l'interfaccia tra le fasi, mentre la diffusione provoca lo scambio di molecole e atomi in modo casuale tra zone limitrofe della miscela, lavorando su scala microscopica.

Ora, volendo analizzare gli sforzi di taglio che si verificano durante una miscelazione, si nota che nel caso di una massa plastica questi sono i più gravosi, a differenza per esempio di quanto accade per un agglomerato o per una melma.

Questo risulta evidente attraverso una rappresentazione schematica.

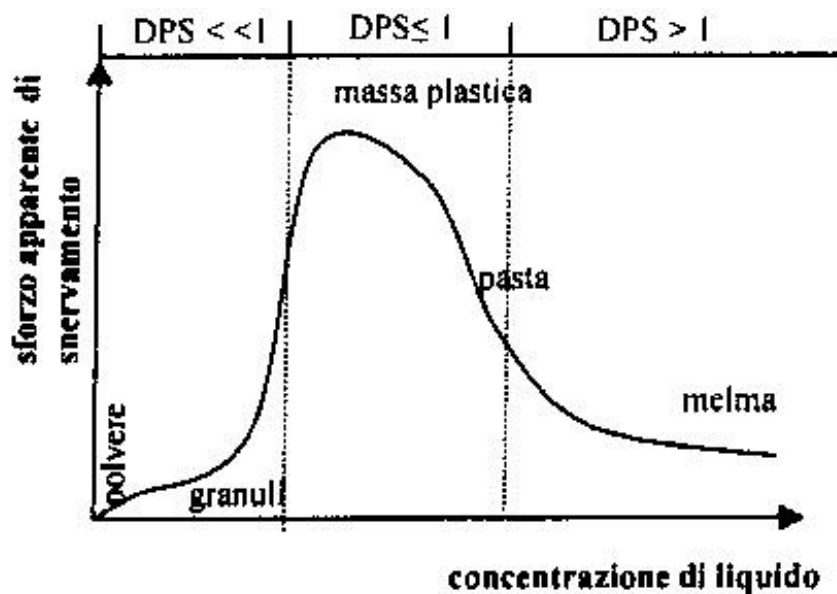


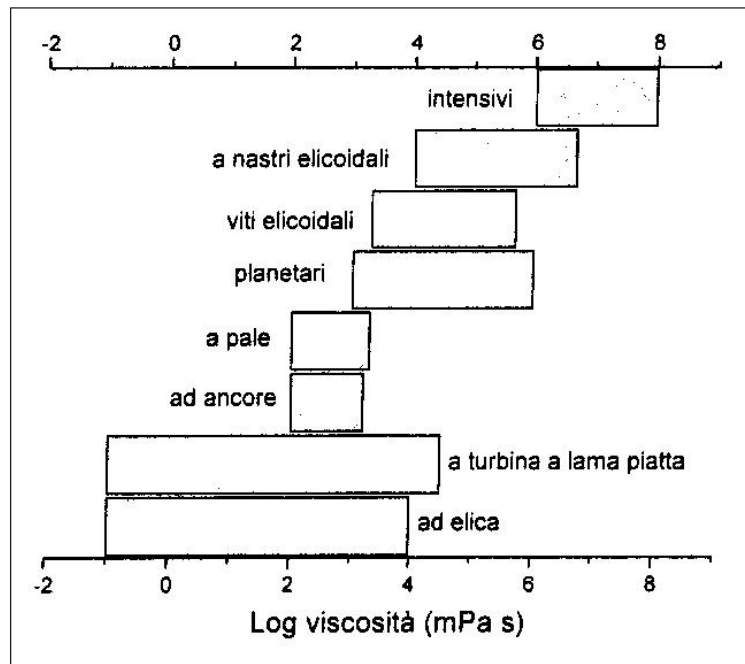
Fig. 5.1 – Resistenza allo scorrimento in funzione della concentrazione di liquido.

L'efficienza di ciascun meccanismo di miscelazione dipende dalla geometria del miscelatore, dalla consistenza e viscosità del materiale da miscelare e dall'energia spesa nella miscelazione; nel caso di masse plastiche, a causa della presenza di un flusso laminare, prevalgono solo i meccanismi di convezione e scorrimento.

### 5.3 Miscelatori industriali

Esistono una grande varietà di miscelatori per l'industria ceramica, e il loro campo di utilizzo varia in funzione della viscosità della miscela da lavorare.

Nello schema seguente si possono osservare i tipi di miscelatori presenti in commercio e le normali destinazioni d'uso.



*Fig. 5.2 – Intervalli di lavoro di vari miscelatori in funzione della viscosità dell'impasto.*

In azienda sono presenti vari miscelatori, ed in particolare quello utilizzato è un macchinario intensivo planetario, pressoché identico a quello in figura:



*Fig. 5.3 – Miscelatore intensivo planetario.*

È un miscelatore da laboratorio con una capacità variabile da un minimo di 3 kg fino ad un massimo di 10 kg, dove alla rotazione in un senso della vasca di contenimento si contrappone la rotazione in controsenso di una pala o elica posta al suo interno. Entrambe devono essere realizzate in un materiale molto resistente all'usura in quanto le polveri ceramiche, al di fuori delle argille ovviamente, sono molto abrasive.

#### ***5.4 Procedimento pratico di miscelazione***

Dopo pesatura delle polveri, si provvede ad inserirle nella vasca di acciaio per dare un'iniziale miscelazione a secco in modo da ottenere un insieme omogeneo di polveri prima di inserire l'acqua.

Poi attraverso un'apposita fessura si inizia a dosare l'acqua ad intervalli regolari, sempre a macchinario in azione, mentre ad ogni fermata si controlla la consistenza dell'impasto fino a quella voluta. Tra una fermata e l'altra si provvede anche manualmente attraverso una spatola a spaccare eventuali grumi presenti.

L'operazione impiegava circa venti minuti per ogni impasto, sia per la mia iniziale inesperienza pratica, che per la meticolosità con cui veniva eseguita.

A miscelazione avvenuta, ogni impasto veniva inserito in un sacco diverso preventivamente siglato in modo da non compiere errori di identificazione.

## **6. STAMPAGGIO**

Una volta pronti tutti gli impasti si può passare all'operazione successiva, lo stampaggio.

### **6.1 Tecnica di stampaggio adottata**

Essendo i crogioli assimilabili a solidi di rivoluzione, la tecnica più adatta è quella della formatura per calibratura, dove si uniscono le caratteristiche della formatura alla ruota e quella in stampo in un unico processo.

La stampatrice usata in azienda è un tornio-prensa sottosquadro ad asse verticale dove la contrapposizione di uno stampo esterno ed uno interno, entrambi in acciaio, realizzano attraverso rotazione la sagoma interna ed esterna del crogiolo in un unico passaggio.

La sagoma esterna, montata su un mandrino a fondo macchina, è calibrata al valore del diametro esterno e dell'altezza del pezzo in modo tale che dopo l'inserimento del materiale, l'azione forzata dello stampo interno realizza il profilo del crogiolo mediante l'appiattimento del fondo e la modellatura della parete verticale, sempre pressando il materiale contro la sagoma esterna che ruota.

Il movimento è tutto meccanizzato e attraverso il settaggio dell'alzata e dell'escursione radiale dello stampo interno si riesce a variare lo spessore del fondo e delle pareti a misura voluta.

Il colletto del crogiolo viene rifinito attraverso una lama appoggiata alla estremità dello stampo esterno dove, dopo la fuoriuscita del materiale in eccesso, si modella secondo lo spessore voluto.

In azienda ci sono diverse coppie di stampi diversi usati a seconda della misura del crogiolo che si deve realizzare e ad ogni cambio di stampi si regolano i parametri di lavorazione sempre basandosi sui disegni tecnici forniti dai clienti.

### **6.2 Operazioni di stampaggio**

Come azione preliminare allo stampaggio, è necessario pesare una quantità di materiale da inserire nello stampo tale da assicurare una sufficiente pressatura di tutta la massa plastica senza avere troppi scarti.

La conoscenza dell'esatto quantitativo di impasto necessario alla realizzazione di un crogiolo viene ricavata in base al peso specifico del materiale e al volume del pezzo stesso, ma solo attraverso un paio di prove di stampaggio si riesce a determinare con la precisione di qualche decina di grammi l'esatto peso da introdurre nello stampo.

Questo perché dal momento della preparazione degli impasti al momento della lavorazione può trascorrere anche un giorno o più, comportando delle inevitabili variazioni nell'umidità degli stessi.

Nel caso dei crogioli, il quantitativo da introdurre nello stampo è di 1080g.

Altre due azioni preliminari sono la pulizia degli stampi, con la rimozione di eventuali residui di materiale, e la successiva applicazione di un liquido distaccante alle pareti della sagoma esterna e dello stampo interno.

Oggi si lavora molto spesso con prodotti biologici di elevata qualità che all'azione distaccante vera e propria associano anche una proprietà lubrificante indispensabile per una buona lavorazione.

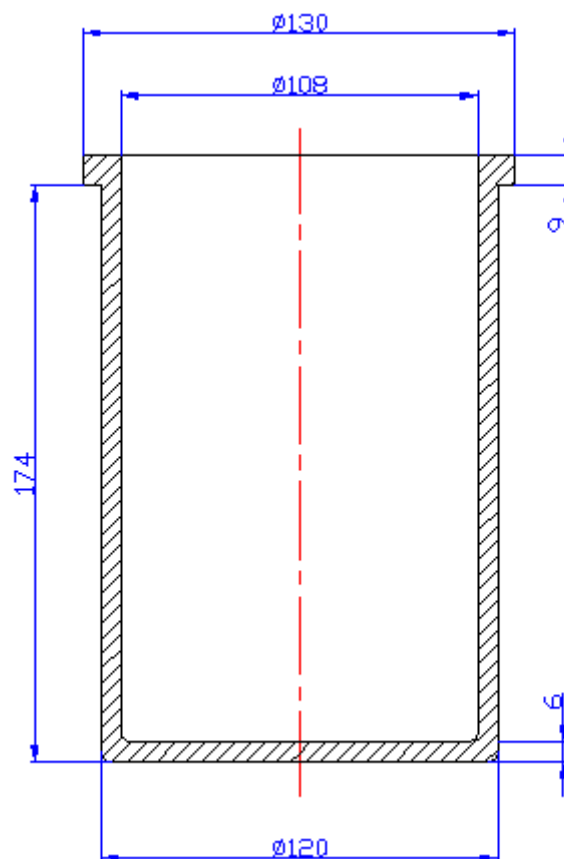
Riconducendosi alla precedente fase dell'impastatura, risulta ora evidente come un esatto quantitativo di acqua negli impasti sia fondamentale per una buona lavorazione di stampaggio.

La plasticità dell'impasto è fortemente dipendente dalla quantità d'acqua presente in quanto una mancanza di acqua può portare alla rottura del pezzo durante la lavorazione, mentre un eccesso lo rende troppo soffice e di difficile lavorazione.

A fine lavorazione lo stampo interno si alza e la lama si sposta lateralmente, mentre un pistone forza da sotto il crogiolo che così si stacca dallo stampo ed è pronto per essere visionato e misurato; in caso di esito positivo viene tolto dalla macchina e

portato dove verrà poi essiccato, oppure viene distrutto e rimescolato con il rimanente impasto per poi essere ristampato.

Giunti a questa fase, si hanno a disposizione almeno tre pezzi per ognuno dei cinque impasti preparati, che vengono sistemati sui ripiani di un carrello che sarà portato nella zona dedicata all'essiccazione.



*Fig. 6.1 – Disegno tecnico di un crogiolo. Le dimensioni riportate sono del crudo in modo da controllare i pezzi dopo stampaggio.*



*Fig. 6.2 – Tornio-pressa simile a quella impiegata in azienda.*

## **7.    **ESSICCAZIONE E COTTURA****

### ***7.1 Il fenomeno dell'essiccamento***

L'essiccamento è un processo che consiste nell'eliminazione della maggior parte d'acqua contenuta nel pezzo appena stampato prima della fase di cottura, senza fargli perdere la forma acquisita.

L'acqua è presente sia in superficie che all'interno dei pori capillari e inizialmente è proprio quella in superficie ad evaporare per prima, attirando verso l'esterno altra acqua creando un fenomeno di migrazione che vede muoversi con l'acqua anche vapore.

In questa fase bisogna fare attenzione che la velocità di evaporazione dell'acqua sia uguale o minore alla velocità di apporto d'acqua dall'interno verso la superficie del pezzo, altrimenti con un'asciugatura troppo rapida potrebbero insorgere rotture.

## **7.2 Modalità di essiccazione**

Nel caso dei crogioli, dato il limitato spessore e la non esigenza di avere tempi brevi di processo, il sistema di essiccamento impiegato è stato l'esposizione al flusso di aria calda fuoriuscente dalla caldaia dell'azienda: in questo modo si è attuato un compromesso tra la semplice esposizione all'aria atmosferica, che data la stagione è piuttosto fredda, e l'inserimento nell'essiccatoio dell'azienda che lavora a temperature intorno ai 150°C.

Al di là poi del metodo specifico adottato, bisogna precisare che il tempo di attesa tra lo stampaggio e la cottura è di qualche giorno perché bisogna attenersi ai tempi tecnici dell'azienda: infatti prima di procedere con la cottura, usualmente si aspetta di caricare l'intero forno in modo da ottimizzare i consumi; quindi i pezzi al momento dell'inserimento nel forno risultano ben essiccati.

L'unico accorgimento operativo degno di nota in questa fase è lo spargimento di sabbia silicea sui vari piani del forno, allo scopo di evitare che qualche pezzo si attacchi alle lastre refrattarie durante la cottura.

## **7.3 Il processo di cottura**

Quando il forno è caricato al completo, lo si può quindi settare con il ciclo di cottura previsto ed avviare il processo.

L'azienda dispone di più forni, a gas ed elettrici, e quello impiegato è alimentato a metano. Si tratta di un forno abbastanza grande, con una capacità di carico di circa 4m<sup>3</sup> totali; in realtà però, dal momento che i pezzi da cuocere sono molti e di piccole dimensioni, si realizza sopra al carrello di sostegno una struttura di mensole e ripiani costituiti da lastre e mattoni refrattari in modo da poter sistemare al meglio tutti i pezzi, riducendo così la capacità di carico effettiva che ottimizzando al massimo gli spazi consente il carico di circa 300 pezzi di dimensioni simili ai crogioli in esame.



*Fig. 7.1 – Forno utilizzato in azienda.*

Il processo di cottura di un materiale ceramico ha principalmente tre scopi:

- provocare trasformazioni irreversibili nei minerali argillosi;
- favorire la formazione di composti stabili e resistenti, con una maggiore resistenza meccanica del crudo;
- diminuire la porosità per effetto della sinterizzazione che può avvenire in presenza o meno di fase liquida.

Inoltre, questo processo è costituito fondamentalmente di quattro stadi:

- reazioni preliminari che portano alla combustione del legante e alla decomposizione degli altri additivi, se presenti;
- evoluzione dei componenti inorganici;
- sinterizzazione, che può arrivare fino allo stadio finale o avvenire solo in parte a seconda della temperatura raggiunta;

- raffreddamento finale.

Durante la cottura bisogna prestare molta attenzione alla definizione dell'esatto ciclo termico in modo da evitare il sorgere di tensioni interne o rotture dovute alle differenze di dilatazione termica dei singoli componenti, in quanto nelle prime fasi iniziali il materiale è ancora particolarmente fragile.

Vengono analizzati ora principali fenomeni che intercorrono durante la cottura di un materiale ceramico.

#### ***7.4 Analisi delle fasi di cottura***

Il primo stadio del riscaldamento è atto a concludere il processo di essiccazione che vede ancora la presenza di liquido nel pezzo come umidità adsorbita, persistente anche fino alla soglia dei 200°C.

L'evaporazione può essere accompagnata anche da una perdita di massa che è funzione della quantità di liquido rimasta dopo l'essiccamento all'aria.

Non essendo presenti leganti ed altri additivi negli impasti, non si verifica la degradazione ed evaporazione degli stessi, che generalmente avviene fino ai 400°C - 500°C.

Continuando con il riscaldamento, si inducono delle modificazioni strutturali e composizionali dei minerali presenti: ad esempio nel caolino si ha l'eliminazione dell'acqua di cristallizzazione, sotto forma di gruppi ossidrilici, che porta alla formazione di metacaolino ( $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ), che è un composto metastabile da circa i 600°C fino a 830°C. Questa è una reazione endotermica ed irreversibile.

A questo punto, l'unico composto stabile nel diagramma di fase silice-allumina si vede essere quello chiamato mullite, costituito dal 72 % di allumina e 28 % di silice. Quindi il metacaolino si decompone in mullite con una cristallizzazione esotermica e in silice, tutto questo intorno a temperature che vanno dai 900°C ai 1000°C circa.

Per quanto riguarda il processo di sinterizzazione, questo comincia normalmente a temperature pari a circa due terzi della temperatura di fusione, e nel caso dei crogioli si può ipotizzare avvenga con l'ausilio del flusso viscoso di una fase liquida. Infatti attorno ai 1000°C si manifesta la presenza di una fase liquida dovuta alla fusione dei silicati formati dagli ossidi dei minerali argillosi, e alla fusione di miscele eutettiche tra i fondenti, ove presenti.

In queste circostanze si ha la chiusura e la diminuzione della porosità, dovute all'esigenza del sistema di diminuire l'energia libera associata alla superficie.

Nel caso specifico dei crogioli è ipotizzabile che la sinterizzazione avvenga in parte e coinvolga solo i primi stadi del fenomeno, dove cioè più particelle in contatto si uniscono creando dei colli di giunzione, ma sempre in concomitanza a una fase liquida che va a riempire i vuoti per dar luogo ad una struttura interconnessa. Contemporaneamente si verifica un addensamento del pezzo, seppur modesto.

Il fenomeno avviene in maniera poco intensa principalmente a causa della temperatura massima raggiunta in cottura, che in particolare per i primi crogioli è stata di 1222° c.

Ultima fase della cottura è il raffreddamento. Se si pensa che in un normale ciclo termico di un forno questo occupa circa il 40 % del tempo totale si vede come anch'esso sia importante per una buona riuscita dell'operazione, al pari del riscaldamento e della cottura vera e propria.

La velocità di raffreddamento non deve essere estremamente lenta, ma tale da permettere il riassetto strutturale degli elementi cristallini presenti, l'assorbimento di eventuali tensioni residue e la solidificazione della fase liquida.

Così, un inadeguato raffreddamento dei pezzi può indurre un danneggiamento per fessurazione.

### 7.5 Controllo dei parametri di cottura

Per un controllo preciso della temperatura di cottura dei crogioli si è soliti inserire in forno degli anelli di riscontro, detti O-Ring.

Si tratta di piccoli anelli ceramici che vengono posti nel forno tra i pezzi da cuocere, ed essendo costituiti di materiale noto, mediante la misurazione del loro diametro dopo cottura si risale al valore esatto della temperatura massima raggiunta.

Esistono varie tipologie di O-Ring che si differenziano per l'intervallo di temperatura al quale si presume vengano cotti, in modo da aumentare la precisione delle rilevazioni. In particolare, la serie adottata è la STH-238 che ha un campo di applicazione dai 1200°C ai 1300°C.

La precisione di questi anelli è tale che la differenza di uno o due centesimi di mm sul diametro è indice di una variazione di temperatura di 2°C.

Di seguito lo schema del ciclo termico impartito ai crogioli.

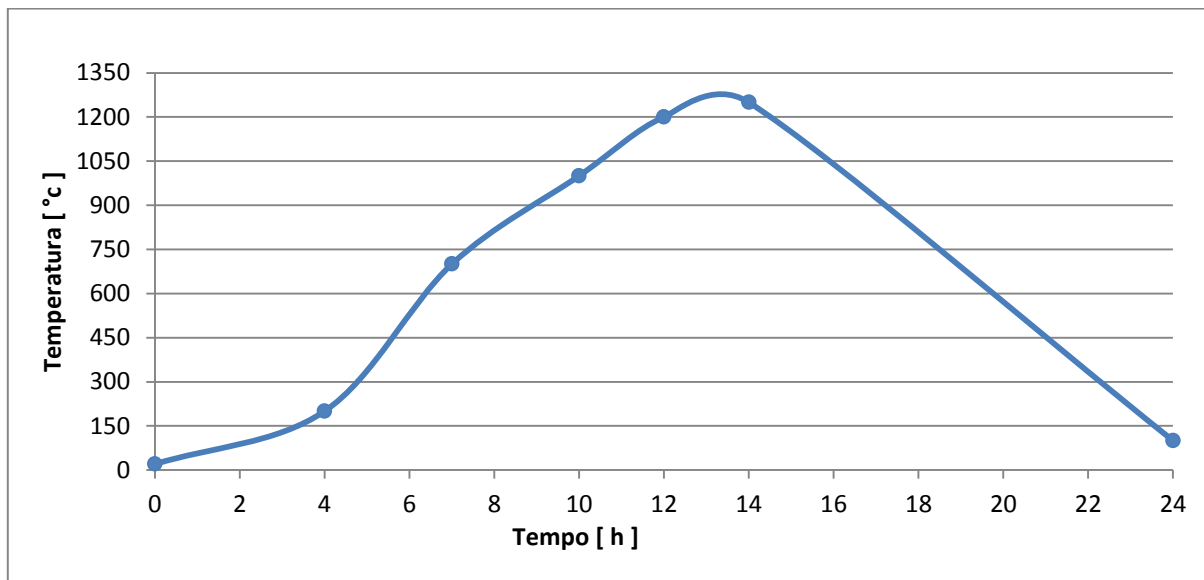


Fig. 7.2 – Ciclo termico del forno.

## **8. TEST DI RESISTENZA ALLE ALTE TEMPERATURE**

### **8.1 Operazioni post-cottura**

A cottura effettuata, la prima operazione da fare è quella di misurare i crogioli per determinare i ritiri avvenuti.

Questa operazione serve non tanto per verificare se i pezzi rispettano le specifiche dimensionali richieste, ma piuttosto per capire come si sono comportate le varie argille presenti negli impasti, dal momento che sono le uniche responsabili delle variazioni dimensionali durante la cottura.

Quindi riferendosi al progetto l'ultima operazione da fare sarebbe quella di sistemare il tenore delle argille in modo da ottenere i ritiri voluti, portando il materiale finale ad essere pronto per la produzione in serie; però questo aspetto non è stato richiesto e quindi non verrà affrontato.

Altra operazione post-cottura è l'analisi delle caratteristiche di porosità, densità ed assorbimento dei vari campioni, operazione che verrà discussa nel successivo capitolo dedicato.

### **8.2 Analisi dei ritiri**

Se si confrontano ora i vari pezzi, si nota un identico ritiro tra i crogioli ottenuti dallo stesso impasto, indice che l'impastatura è avvenuta correttamente; invece tra pezzi di diversa composizione spicca tra tutti il campione K4 che presenta il minor ritiro, pressoché nullo, cosa molto strana considerando che possiede il maggior tenore di argilla tra tutti.

Gli altri crogioli al contrario hanno subito pressoché i medesimi ritiri, riassunti nella tabella seguente con i valori medi tra tutti i campioni:

<b>Parte rilevata</b>	<b>Ritiro rispetto al crudo</b>
Altezza totale	1.7 %
Diametro interno	1.9 %
Diametro esterno sotto colletto	1.7 %
Diametro colletto	2.7 %

*Tab. 8.1 – Ritiri medi dopo cottura dei campioni K1, K2, K3, K5.*

### **8.3 Cementazione dei crogioli**

Calcolati i ritiri si può procedere alla preparazione dei pezzi per la prova nel forno a induzione.

Come descritto al capitolo 1, i crogioli di ceramica devono essere equipaggiati al loro interno con un altro crogiolo vero e proprio di grafite, che usualmente si adopera nella pratica orafa per poter lavorare con metalli preziosi a temperature superiori ai 1000°c.

Questa operazione si chiama in gergo cementazione, poiché i crogioli in grafite vengono fissati al ceramico con un cemento grafitico per alte temperature.

Si tratta di pezzi di dimensioni ovviamente ridotte rispetto a quelli in ceramica, dovendo essere contenuti in essi e fissati con il cemento. In più sono alti circa due terzi dei ceramici, ma lo spessore delle pareti è molto maggiore essendo circa 15 mm.

Il volume di metallo prezioso contenuto dal crogiolo, e quindi il corrispondente peso in chilogrammi, denomina i vari tipi prodotti in azienda che si dividono tra quelli da mezzo, uno e più chilogrammi; nello specifico quelli prodotti in questo progetto sono da un chilogrammo.

Dopo l'applicazione del cemento, si effettua la rapida asciugatura dello stesso inserendo i crogioli in un forno elettrico per sottoporli a un breve ciclo di

riscaldamento a 150°C per un paio d'ore; in questo modo si possono quasi subito effettuare i test di resistenza.



*Fig. 8.1 – Crogiolo dopo cementazione.*

#### **8.4 Test nel forno a induzione**

Data l'importanza di questo tipo di prodotti a livello aziendale, per poter simulare al meglio le condizioni di lavoro in cui opereranno i crogioli è stato costruito appositamente un forno a induzione, dimensionato per supportare i crogioli come in un forno da fonderia vero e proprio.

I forni a induzione basano il loro funzionamento sul principio del trasformatore; il metallo da fondere si comporta come un secondario chiuso in cortocircuito, interessato da intense correnti, mentre il primario è costituito da un avvolgimento alimentato in corrente alternata.

Attraverso le correnti di conduzione e parassite, si sfrutta l'effetto Joule per attuare il surriscaldamento del metallo.

Quindi il crogiolo viene inserito nella spirale in rame del forno, che è rivestita di refrattario, e viene attraversato dal forte campo magnetico indotto dalla corrente ad elevata frequenza che circola nelle spire.

Per il raffreddamento si sfrutta il passaggio di acqua fredda nelle spire attraverso un sistema di ricircolo dell'acqua attuato da una pompa.

Il forno in azienda dispone di un piccolo quadro comandi dove è possibile regolare la temperatura di esercizio, che va da qualche decina di gradi fino oltre i 1500°C, e l'azione della pompa per il raffreddamento.



*Fig. 8.2 – Quadro comandi del forno a induzione.*

Il controllo della temperatura avviene attraverso una termocoppia posta sul fondo del crogiolo in ceramica, mentre uno schermo digitale ne riporta il valore istantaneo.

Come già accennato al capitolo 1, la temperatura di normale esercizio dei crogioli è di circa 1100°C; bisogna specificare che questa temperatura è raggiunta solo dal

metallo e dalla grafite che lo contiene, mentre il ceramico è sottoposto a temperature inferiori.

Sperimentalmente si è provato che la temperatura minima di esercizio è quella sul fondo del ceramico, che raggiunge circa i 700°C o poco più, ed è proprio lì che la termocoppia è stata posizionata.

Questa differenza di temperatura è dovuta al fatto che il crogiolo di grafite non si estende per l'intera altezza del ceramico come è già stato detto, lasciando così uno spazio vuoto sul fondo di circa 4 cm.

La parte più termicamente sollecitata risulta invece essere quella superiore del ceramico con il colletto, dove si trova a contatto con la grafite incandescente; è proprio lì che si presterà la maggiore attenzione.

Quindi durante le prove eseguite sui crogioli l'attenzione va rivolta all'osservazione dei pezzi durante il riscaldamento fino a 700°C, in modo da rilevare eventuali fessurazioni, e a temperatura raggiunta l'ispezione dettagliata dei punti critici ed in particolare del colletto ceramico.

Per le prove al forno si usa un coperchio in fibra ceramica ignifuga da porre sopra il crogiolo in modo da velocizzare il riscaldamento, mentre per l'estrazione dei pezzi dopo lo spegnimento del forno e l'attesa al raffreddamento sotto i 100°C segnati sul display, si usa una pinza da fonderia e guanti ignifughi, nel rispetto delle norme di sicurezza.

Passati al forno tutti i campioni, si riparte con un secondo ciclo di riscaldamento per rivalutare i campioni che meglio hanno resistito al primo riscaldamento.

Campione	Esito	Tipo di rottura
K1	Positivo	Non verificata
K2	Negativo	Crepa sul colletto di qualche decimo di mm
K3	Negativo	Crepa sul colletto più evidente che in K2
K4	Positivo	(difficile estrazione dall'induttore)
K5	Negativo	Crepa sul colletto simile a K3

*Tab. 8.2 – 1° RISCALDO.*

Campione	Esito	Tipo di rottura
K1	Negativo	Lieve crepa sul colletto
K4	Negativo	Crepa orizzontale a un quarto dell'altezza dal fondo

*Tab. 8.3 – 2° RISCALDO.*





*Fig. 8.3 - Test nel forno a induzione.*

### **8.5 Precisazioni**

La prima notazione da fare riguarda le crepe, le quali sono visibili solo alle temperature più alte mentre a freddo si fatica a riconoscerle. Quindi i risultati possono essere considerati non del tutto disastrosi.

La seconda precisazione invece riguarda la particolare rottura del campione K4, che risulta segnato di netto da una crepa lungo tutta la circonferenza proprio in corrispondenza del fondo del crogiolo interno in grafite.

Ricordando il fatto che questo campione ha avuto il minor ritiro in cottura, e considerando anche che al momento dell'estrazione dall'induttore è stato forzato con la pinza perché incastrato, la probabile causa della rottura è la dilatazione del ceramico avvenuta in maniera differenziale tra la parte contenente il crogiolo di grafite e la sottostante parte libera.

## **9. PROCEDURA DI MIGLIORAMENTO MATERIALI E FORMULAZIONE NUOVI IMPASTI**

Prima di procedere con le modificazioni da attuare è bene analizzare i risultati ottenuti con i primi campioni.

### **9.1 Analisi dei primi test**

Innanzitutto i campioni K1 e K4 sono i soli da tener in considerazione per gli sviluppi successivi in quanto, pur non avendo retto al secondo riscaldamento, hanno comunque dato segnali positivi che non devono essere ignorati.

Per quanto riguarda il campione K2, l'unica differenza di composizione con il K1 sta nella sostituzione della chamotte con la molochite che ad essa è equivalente, quindi per capire meglio il fallimento già al primo riscaldamento dovrà essere rivista la formulazione dell'impasto.

Il campione K3 invece rivela da subito l'inadeguatezza della silice per questo tipo di applicazione, probabilmente per la maggior fase liquida che si viene a creare e la sua differenza di coefficiente di espansione rispetto al resto della struttura ceramica.

Infine il campione K5 mostra come la ripartizione migliore delle argille sia quella che vede il caolino in minor quantità rispetto alle altre.

Quindi, valutati i primi cinque campioni si procede alla formulazione di altri due impasti partendo dai precedenti e cercando di correggere eventuali carenze.

Continuando la numerazione dei primi cinque impasti, i nuovi saranno dunque K6 e K7.

### **9.2 Formulazione di nuovi impasti modificati**

#### **IMPASTO K6**

Kerphalite fine → 1.75 kg

Kerphalite grossa → 0.75 kg

Allumina → 0.5 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Argilla hywite → 0.15 kg (totale argille= 25 % ripartite in 5 %, 20 %)

Argilla 3039 → 0.6 kg

Acqua → 0.485 kg (12.9 % rispetto al totale polveri)

Questo impasto è mirato all'aumento del ritiro dei pezzi dopo cottura in modo da poterli testare nel forno a induzione senza avere problemi di interferenza con l'induttore; questo non implica in automatico un risultato positivo, ma almeno indicherà come unica causa la sola allumina.

### **IMPASTO K7**

Kerphalite fine → 1 kg

Kerphalite grossa → 1 kg

Molochite → 0.5 kg (25 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.125 kg

Argilla hywite → 0.125 kg (totale argille= 20 % ripartite in 5 %, 5 %, 10 %)

Argilla 3039 → 0.25 kg

Acqua → 0.39 kg (13 % rispetto al totale polveri)

Con questo secondo impasto invece si vuole riproporre il campione K2, con la sola modifica alla quantità di molochite portata al 25 %.

Nel frattempo si è seguito a testare il campione K1 al forno per vedere l'eventuale modificazione della crepa sul colletto: al terzo e quarto riscaldamento si è verificata la rottura orizzontale che è simile al campione K4.

Dunque sempre allo scopo di aumentare i ritiri in cottura si è tentato un ulteriore terzo impasto, denominato K8, con un tenore di argilla maggiore.

## **IMPASTO K8**

Kerphalite fine → 2 kg

Kerphalite grossa → 0.5 kg

Chamotte → 0.625 kg (25 % rispetto alla kerphalite)

Argilla hywite → 0.4 kg (totale argille= 25.6 % ripartite in 12.8 %, 12.8 %)

Argilla 3039 → 0.4 kg

Acqua → 0.45 kg (11.5 % rispetto al totale polveri)

Per la prima volta qui si è attuata una variazione di proporzione tra i due tipi di kerphalite, aumentando il tenore di chamotte al 25 % come per il K7.

Ancora una volta una tabella riassume questi tre impasti.

	<b>K6</b>	<b>K7</b>	<b>K8</b>
<b>Ker F</b>	46.6 %	33.3 %	51 %
<b>Ker G</b>	20 %	33.3 %	12.6 %
<b>Chamotte</b>			16 %
<b>Molochite</b>		16.7 %	
<b>Allumina</b>	13.4 %		
<b>Caolino</b>		4.2 %	
<b>Arg. Hywite</b>	4 %	4.2 %	10.2 %
<b>Arg. 3039</b>	16 %	8.3 %	10.2 %

*Tab. 9.1 – Composizione dei tre impasti K6, K7 e K8. Le quantità sono indicate rispetto al totale delle polveri in modo cumulativo fino al 100 %.*

### **9.3 Test nel forno a induzione e analisi dei risultati**

Dopo cottura a 1241°C, temperatura lievemente superiore a quella della prima infornata, e dopo la consueta cementazione, la prova al forno a induzione rivela i seguenti risultati:

<b>Campione</b>	<b>Esito</b>	<b>Tipo di rottura</b>
K6	Negativo	Crepa sul fondo, evidente
K7	Negativo	Crepa sul fondo
K8	Negativo	Crepa sul colletto e sul fondo

*Tab. 9.2 – 1° RISCALDO.*

A questo punto, visti i risultati, l'unica certezza è che l'impasto contenente allumina non è idoneo per questo tipo di applicazioni.

L'allumina è certamente resistente alle alte temperature, ma evidentemente in pezzi come questi la particolare deformazione indotta dalla grafite e dall'induttore soggetti a quel caratteristico riscaldamento non la rendono utile allo scopo.

I risultati meno disastrosi sono dati dai campioni K7 e K8 che nonostante si fessurino lo fanno comunque in modo abbastanza lieve, il che fa continuare a pensare di essere sulla giusta strada per un esito positivo del progetto.

Da escludere l'ultima variazione sul K8, dove è stata favorita la frazione più fine della kerphalite rispetto a quella più grossa, dando risultati peggiori dei precedenti.

### **9.4 Scelta di nuove materie prime, riformulazione degli impasti**

È chiaro quindi la necessità di attuare delle modifiche nelle composizioni più importanti che la semplice variazione di argille e smagranti.

Occorre pertanto provare a lavorare variando ancora i tenori dei due tipi di kerphalite, questa volta aumentando nettamente la disproporzione.

Consultando i cataloghi dei fornitori di materie prime (sempre Damrec e AGS mineraux) si cerca di individuare qualche prodotto interessante, soffermandosi su un altro tipo di kerphalite: si tratta di una qualità meno pura della KF e con un tenore di allumina minore, attorno al 53.6 %, denominata kerphalite KB.

La scelta ricade su questa qualità perché disponibile in granulometrie molto maggiori rispetto alla KF, e quindi si provvede a ordinarne una campionatura di prova.

Anche in questo caso, oltre alla variante grossa che è classificata in 0.3/1.6 mm, si richiede un campione più fine, da 0/0.55 mm in modo da provare anche questa combinazione.

Ancora, sempre da catalogo si nota un'argilla descritta come refrattaria derivante da caolino sedimentario, chiamata Clayrac BS2. Sempre a titolo di sperimentazione si richiede l'invio di un campione di prova.

Su consiglio esterno si tenta con l'inserimento negli impasti di una piccola quantità di diossido di titanio ( $\text{TiO}_2$ ), circa il 2% - 3%, in quanto agente mullitizzante.

Infatti è proprio questo composto a promuovere in un ceramico la buona resistenza alle alte temperature, unita a un miglioramento della resistenza agli shock termici.

Ultima considerazione va fatta sulla temperatura di cottura dei crogioli: la prima cottura effettuata a 1222°C è sicuramente stata condotta a temperatura troppo bassa rispetto al necessario, sebbene il forno sia stato impostato a 1250°C.

Il secondo ciclo di cottura invece ha visto i pezzi cuocere a 1241°C, temperatura già migliore della prima; ma effettivamente per questo tipo di ceramico la temperatura di cottura dovrebbe essere più vicina ai 1300°C in modo da favorire i processi di modificazione strutturale e di densificazione che a quelle temperature avvengono.

Nell'impossibilità di raggiungere tali temperature, l'unico intervento possibile in questo senso è cercare il punto "più caldo" del forno, dove cioè a causa dell'inerzia termica del carico si viene a formare una zona in sovratemperatura rispetto alla media, seppur di qualche grado centigrado relativamente alla temperatura impostata.

Allora riprendendo in mano i precedenti impasti K7 e K8, si prova a realizzare un compromesso tra questi due, addizionando però il  $\text{TiO}_2$  e sostituendo le due argille con la nuova BS2.

Si adopera ancora la qualità KF per la kerphalite, e si attua una proporzione tra fine e grossa di 1 : 2.5 circa.

La differenza dimensionale tra le due frazioni non è così marcata, quindi non ci si aspetta una grossa miglioria.

Seguendo la nomenclatura adottata questo nuovo impasto sarà il K9.

### **IMPASTO K9**

Kerphalite KF fine → 0.466 kg

Kerphalite KF grossa → 1.2 kg

Molochite → 0.334 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.1 kg

Argilla BS2 → 0.34 kg (totale argille= 22 % ripartite in 5 %, 17 %)

$\text{TiO}_2$  → 0.06 kg (2.5 % rispetto al totale polveri)

Acqua → 0.285 kg (11.4 % rispetto al totale polveri)

Invece per testare la nuova qualità di kerphalite arrivata, la KB, si procede con l'impasto K10 utilizzando le argille hywite e 3039.

## **IMPASTO K10**

Kerphalite KB fine → 0.466 kg

Kerphalite KB grossa → 1.2 kg

Molochite → 0.334 kg (20 % rispetto alla kerphalite)

Caolino → 0.1 kg

Argilla hywite → 0.1 kg (totale argille= 20 % ripartite in 5 %, 5 %, 10 %)

Argilla 3039 → 0.2 kg

TiO<sub>2</sub> → 0.06 kg (2.5 % rispetto al totale polveri)

Acqua → 0.27 kg (11 % rispetto al totale polveri)

Va precisato che quest'ultimo impasto, con una granulometria grossa di 0.3/1.6 mm, serve per verificare l'ipotesi che un rapporto tra polvere fine e grossa di 1 : 2.5 porta un miglioramento nell'impaccamento delle polveri facilitando le trasformazioni durante la cottura.

Questo va detto perché la dimensione media dei cristalli è notevole per l'usuale tecnica produttiva, e porta a inconvenienti nell'operazione di stampaggio che sono tollerati solo in quanto produzione sperimentale.

Nella tabella seguente sono riassunte le composizioni di questi ultimi due impasti.

	<b>K9</b>	<b>K10</b>
<b>Ker F</b>	18.6 % (KF)	19 % (KB)
<b>Ker G</b>	48 % (KF)	48.8 % (KB)
<b>Molochite</b>	13.4 %	13.6 %
<b>Caolino</b>	4 %	4 %
<b>Arg. BS2</b>	13.6 %	
<b>Arg. Hywite</b>		4%
<b>Arg. 3039</b>		8.1 %
<b>TiO<sub>2</sub></b>	2.4 %	2.5 %

*Tab. 9.3 – Composizione degli impasti K9 e K10. Le quantità sono indicate rispetto al totale delle polveri in modo cumulativo fino al 100 %.*

### **9.5 Test nel forno a induzione e ultime prove di accertamento**

Cotti questi pezzi a una temperatura prossima ai 1250°C, dopo la cementazione si esegue la prova al forno a induzione.

Da notare che l'aggiunta del diossido di titanio, essendo un ossido colorante, provoca nei crogioli dopo cottura una colorazione gialla tenue.

<b>Campione</b>	<b>Esito</b>	<b>Tipo di rottura</b>
K9	Negativo	Lieve crepa sul fondo
K10	Positivo	Non verificata

*Tab. 9.4 – 1° RISCALDO.*

Al 2° RISCALDO è stato testato solo il campione K10 che ha dato ancora un esito positivo.

Dai risultati ottenuti sembra si sia giunti ad una soluzione positiva del progetto. Tuttavia, per confutare ogni dubbio e per avere ulteriori conferme si preparano altri due impasti tenendo come base il campione K10: in entrambi non viene inserito il diossido di titanio, e in uno soltanto si sostituisce la frazione più fine di kerphalite KB con la più grossa della KF, che risulta comunque ancora più fine.

**K10-A** → K10 senza TiO<sub>2</sub>

**K10-B** → K10 senza TiO<sub>2</sub> e con diversa granulometria per la kerphalite KB fine che viene sostituita con kerphalite KF 0.05/0.35 mm.

In questo modo si va a verificare l'effettivo miglioramento indotto dal diossido di titanio nel processo di mullitizzazione e contemporaneamente si cerca di aumentare il gap dimensionale tra le granulometrie, prevedendo una differenza di comportamento rispetto al K10 originale.

Nel frattempo si insiste a testare il campione K10, spingendolo anche oltre le normali temperature di prova, ottenendo ancora risultati positivi.

Cotti e cementati anche gli ultimi due campioni, si testano nel forno a induzione.

<b>Campione</b>	<b>Esito</b>	<b>Tipo di rottura</b>
K10	Positivo	Non verificata
K10-A	Positivo	Non verificata
K10-B	Negativo	Crepa sul colletto

*Tab. 9.5 – 1° RISCALDO.*

<b>Campione</b>	<b>Esito</b>	<b>Tipo di rottura</b>
K10	Positivo	Non verificata
K10-A	Negativo	Lieve crepa sul colletto
K10-B	Negativo	Crepa sul colletto

*Tab. 9.6 – 2° RISCALDO.*

### **9.6 Considerazioni**

Dati gli esiti di queste ultime prove si possono allora trarre le dovute conclusioni.

L'introduzione del diossido di titanio sicuramente è positiva favorendo la formazione di un ceramico che bene resiste alle alte temperature; quindi la sua presenza è fondamentale.

La variazione nelle granulometrie invece è un aspetto più delicato in quanto, sebbene si sia dimostrato che una pezzatura troppo fine non è favorevole allo scopo, sicuramente esistono dei compromessi che giungono allo stesso risultato positivo.

Va precisato che la scelta fatta è stata dettata dalla poca varietà di granulometrie disponibili dai produttori di materie prime, ma questo discorso sarà ripreso più avanti.

Ritenendo conclusa la parte produttiva del progetto, rimandando a fine trattazione le conclusioni finali, si prosegue con la descrizione delle analisi eseguite sui prodotti.

## **10. ANALISI DEI PRODOTTI**

Nell'ambito dell'industria ceramica, la caratterizzazione fisica di un dato componente o manufatto riguarda principalmente la definizione della sua densità, della quantità e tipologia di pori presenti e del valore della sua superficie specifica.

In particolare, la densità e porosità di un ceramico sono di fondamentale importanza per capire e valutare i comportamenti del materiale in esercizio, mentre il valore dell'area di superficie per unità di massa serve al ceramista sia per valutare la reattività delle polveri prima di operare, che nella valutazione dei componenti sinterizzati.

Per i crogioli in esame sono state effettuate in azienda le prove di densità, porosità ed assorbimento d'acqua.

Si tratta di prove eseguite con lo scopo di accertare l'idoneità fisica dei pezzi creati e di valutarne le caratteristiche, dopo aver verificato la reale idoneità operativa con le prove nel forno a induzione.

### **10.1 Densità di un ceramico**

Per quanto riguarda la densità o peso specifico di un ceramico, è necessaria la conoscenza dei tre parametri in cui si definisce.

- Densità teorica o assoluta, che è la densità presentata da un corpo perfettamente denso, cioè non poroso.
- Densità apparente, che si esprime come il rapporto tra la massa del ceramico e il volume occupato dallo stesso tenuto conto della porosità aperta.
- Densità di bulk, che invece si esprime come il rapporto tra la massa del corpo e il volume occupato dallo stesso tenuto conto di tutte le porosità, quindi aperta e anche chiusa.

### **10.2 Porosità in un ceramico**

Riveste invece un aspetto più importante la caratteristica di porosità di un ceramico.

In un materiale ceramico che non sia perfettamente denso, cosa impossibile per un pezzo reale, la struttura interna è caratterizzata dalla presenza di piccole cavità, fessure e spazi intergranulari che vengono definiti con il nome di porosità appunto. La distinzione tra porosità aperta e chiusa prende luogo dalla accessibilità o meno dei pori con la superficie del materiale e quindi la porosità aperta sarà in contatto con l'esterno del pezzo mentre la porosità chiusa sarà quella isolata nel materiale. Anche in questo caso allora, analogamente con le definizioni di densità, si avranno due distinzioni tra porosità apparente e porosità totale.

- Porosità apparente, che si esprime come la percentuale di volume del corpo occupata dai pori aperti.
- Porosità totale, che indica la percentuale di volume del corpo occupata sia dai pori aperti che da quelli chiusi.

La porosità in un ceramico può variare di molto e il suo effetto sulle caratteristiche e prestazioni è molto rilevante, influenzando molti aspetti tecnologici.

La figura seguente mostra un chiaro esempio della sua importanza.

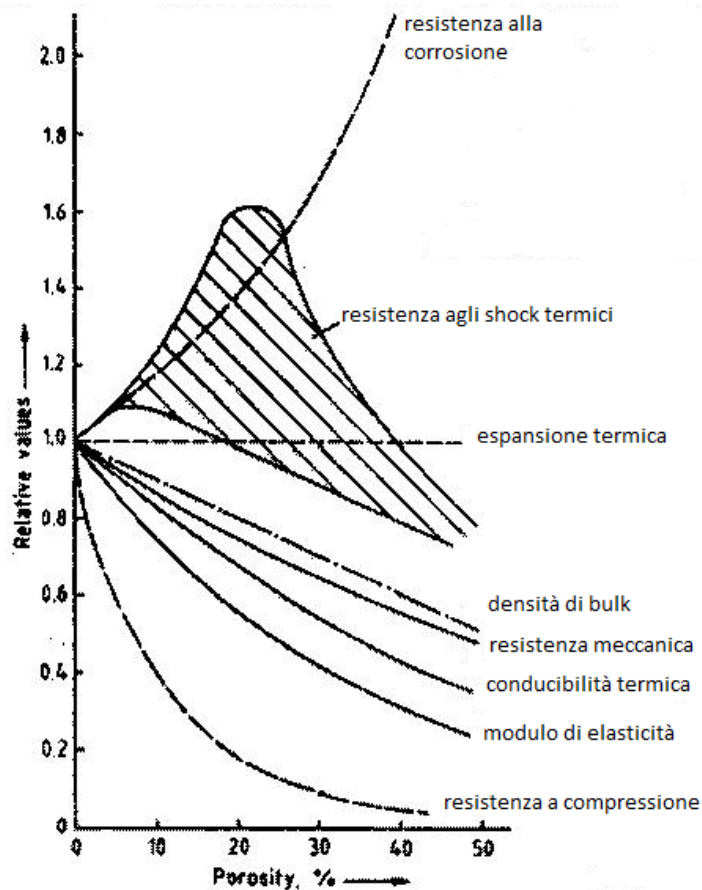


Fig. 10.1 – Effetto della porosità su alcune proprietà dei ceramici.

### 10.3 Assorbimento d'acqua.

L'assorbimento di liquido da parte di un ceramico è funzione della porosità presente nello stesso. In particolare è la porosità che si trova a contatto con la superficie del pezzo, ossia la porosità esterna.

Quindi se si lascia un corpo ceramico non perfettamente denso immerso in un liquido, che nella pratica comune è l'acqua, il volume libero dei pori aperti corrisponderà numericamente al volume di liquido assorbito dal pezzo.

### 10.4 Prove di densità, porosità e assorbimento d'acqua.

Per quanto riguarda i crogioli, le misure di densità, porosità ed assorbimento sono state eseguite con l'ausilio di semplici strumenti quali una bilancia elettronica e un dinamometro.

Per questo tipo di prove è stato adottato il cosiddetto metodo di Archimede, secondo il quale per il calcolo della densità si sfrutta la spinta subita da un corpo immerso in un liquido che è proporzionale al volume di liquido spostato e quindi al volume del corpo analizzato.

Oltre alla densità, attraverso delle relazioni matematiche e fisiche, si risale al valore delle altre grandezze come volume esterno, porosità ed assorbimento d'acqua.

Le rilevazioni sono state condotte su tre materiali diversi, con lo scopo di paragonare i risultati ottenuti e valutare eventuali differenze.

I campioni analizzati sono il K7, il K10 e un altro crogiolo realizzato in kerphalite con l'aggiunta di FZM, fused zirconia mullite, che verrà chiamato F.

Si tratta di un pezzo realizzato con una speciale miscela di zirconia con mullite fusa, che dovrebbe essere il prodotto principe per la realizzazione dei crogioli ma nella realtà pratica risulta proibitivo dal punto di vista economico.

È stato incluso nelle analisi a solo scopo comparativo con gli altri prodotti.

Inoltre, per una più omogenea distribuzione dei valori e per poter avere una misura più affidabile, ogni pezzo è stato diviso in tre parti separando il fondo, la parete cilindrica laterale e la parte superiore con il colletto.

La fase pratica dell'operazione consiste nella misurazione dei pesi dei vari pezzi tramite una bilancia elettronica e/o un dinamometro come segue:

- per la determinazione del peso a secco del ceramico, definito **P1**, si effettua la pesata dei pezzi essiccati con la bilancia elettronica;
- per la determinazione del peso del ceramico in acqua, definito **P2**, si effettua la pesata del pezzo immerso in acqua tramite un dinamometro. In particolare i pezzi sono stati immersi in acqua a temperatura ambiente per 24 ore al fine di saturarli completamente;
- per la determinazione del peso del ceramico saturo d'acqua, definito **P3**, si effettua la pesata dei pezzi estratti dall'acqua con la bilancia elettronica. In particolare i

pezzi appena estratti dalla vasca vengono fatti gocciolare per qualche secondo al fine di eliminare la sola acqua in eccesso dalla superficie.

Dalla conoscenza dei tre pesi P1, P2 e P3 si arrivano a calcolare come loro combinazione tutte le altre grandezze cercate.

- Volume esterno  $\rightarrow V = P3 - P2$

Il peso del provino immerso, P2, è uguale al peso del provino impregnato d'acqua, P3, meno il peso del volume di acqua spostata dal provino; quindi la differenza P3 – P2 da il peso del volume di acqua spostata, ed essendo la densità dell'acqua unitaria, questo corrisponde al suo volume.

- Densità apparente  $\rightarrow D_a = P1 / (P1 - P2)$

- Densità di bulk  $\rightarrow D_b = P1 / V$

- Porosità apparente  $\rightarrow P_a = 100 \times (P3 - P1) / V$

- Assorbimento d'acqua  $\rightarrow A = 100 \times (P3 - P1) / P1$

I dati ottenuti sono elencati nella seguente tabella dove si riportano per ogni parametro il valore medio ricavato dalle tre parti in cui sono stati divisi i pezzi.

<b>Pezzo</b>	<b>P<sub>a</sub> [%]</b>	<b>D<sub>b</sub> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>D<sub>a</sub> [g/cm<sup>3</sup>]</b>	<b>A [%]</b>
F	21.9	2.22	2.84	9.9
K7	21.7	2.14	2.72	10.2
K10	22.5	2.44	3.16	9.2

*Tab. 10.1 – Caratteristiche di densità, porosità e assorbimento d'acqua relativi a tre diversi crogioli.*

Con queste ultime prove posso ritenere conclusa l'esecuzione pratica del progetto. Nella restante parte finale della trattazione invece verranno esposte le ultime considerazioni e valutazioni del caso.

## **11. ANALISI DEI COSTI**

### **11.1 Considerazioni generali**

Un aspetto importante del processo industriale riguarda la determinazione e il calcolo dei costi di ogni ciclo produttivo all'interno di un'azienda.

Le spese relative alla realizzazione di ogni singolo componente per gli oggetti nel caso in esame si riassumono come segue:

- costo delle materie prime utilizzate;
- costo della manodopera impiegata per l'intera produzione;
- costo delle strumentazioni e dei materiali accessori;
- spese relative al consumo di energia elettrica e di gas metano;
- spese aggiuntive derivanti da sprechi e scarti di lavorazione.

Questi sono i dati riguardanti il solo processo produttivo, avendo escluso le spese sostenute a monte per l'acquisto di macchinari quali miscelatori, stampatrici e forni che si traducono in voci nel bilancio aziendale.

Per la determinazione del costo complessivo dei crogioli prodotti si è scelto di effettuare una valutazione semplicistica dal momento che l'intera produzione, essendo sperimentale, non è ancora attuabile su scala reale.

Di conseguenza si andrà a calcolare solo il costo totale delle materie prime impiegate, mentre per le altre spese ci si limiterà in questa sede a delle valutazioni di massima.

Di seguito il costo delle materie prime:

- *Kerphalite* → 600 € / tonnellata
- *Molochite* → 560 € / tonnellata
- *Chamotte* → 700 € / tonnellata
- *Caolino stannon* → 400 € / tonnellata
- *Argille* → 300 € / tonnellata
- *Diossido di titanio* → 1500 – 2100 € / tonnellata

Come prima precisazione bisogna considerare questi prezzi come indicativi e molto variabili dal momento che in questo settore si verificano le medesime transizioni e variazioni improvvise che si vedono generalmente nei mercati azionari; particolarmente in questo periodo si assiste a un'ascesa spropositata e ingiustificata dei prezzi.

Ben diversi sono i prezzi relativi alle utenze di energia elettrica, acqua e gas metano:

- *energia elettrica* → 0.18 € / KW
- *acqua* → 0.7 € / m<sup>3</sup>
- *gas metano* 0.7 € / m<sup>3</sup>

### **11.2 Calcolo del costo unitario dei crogioli**

A questo punto, prendendo come riferimento la quantità di impasto che viene inserita nello stampo per un pezzo, definita in 1080g circa, si procede al calcolo del costo unitario dei crogioli come segue:

<b>Materia prima</b>	<b>Q.tà relativa [ % ]</b>	<b>Corrispettivo in peso [ g ]</b>	<b>Costo al pz. [ € ]</b>
Kerphalite	67.8	732.24	0.44
Molochite	13.6	146.88	0.08
Argille	12.1	130.68	0.04
Caolino	4	43.2	0.02
TiO <sub>2</sub>	2.5	27	0.05
totale	100 %	1080 g	<b>0.63 €</b>

*Tab. 11.1 – Calcolo del costo unitario dei crogioli.*

Come già detto, per una accurata valutazione andrebbero aggiunti a questo conto anche i costi dovuti all'impiego di manodopera, al dispendio di energia elettrica per la miscelazione e stampaggio e il costo dell'acqua utilizzata, che vengono esclusi per i motivi visti sopra o perché trascurati come nel caso dell'acqua.

Un discorso diverso invece va fatto per la spesa riguardante il processo di cottura.

Il costo medio di un ciclo di cottura comporta una spesa di 200€ per un carico che occupi l'intero volume del forno.

Di conseguenza il calcolo del costo relativo a un singolo crogiolo è molto variabile, essendo dipendente dal tipo di pezzi caricati sul forno che non sempre sono gli stessi e dello stesso materiale.

Tuttavia, se per ipotesi si pensasse di caricare al completo il carro del forno con circa 300 - 350 pezzi, il costo unitario di cottura sarebbe dell'ordine dei 60 centesimi di Euro.

Questo rappresenta solo un ragionamento virtuale dal momento che normalmente si caricano in forno molte tipologie di pezzi diversi, rendendo difficile la ripartizione unitaria del costo.

Con tutto ciò si vuole però sottolineare l'incidenza che il processo di cottura ha sul costo finale dei pezzi.

Un'ultima considerazione riguarda il confronto a livello economico con il precedente prodotto.

Sebbene ora si sia aggiunta un'operazione al ciclo produttivo per la necessità di preparare la miscela di polveri in azienda, il costo del precedente materiale è ben superiore a quello dell'attuale, viaggiando su valori di circa il doppio.

A conti fatti, quindi, il vantaggio del nuovo prodotto sul vecchio è ancora sostanzioso.

## **12. CONCLUSIONI**

In questa parte finale della trattazione saranno esposte tutte le considerazioni riguardanti i capitoli precedenti che non sono state trattate per non deviare dal tema principale, ossia la realizzazione del prodotto vera e propria.

In particolare tre sono gli aspetti da considerare, iniziando dalla soddisfazione delle richieste di progetto, passando alle migliorie da apporre al processo produttivo per arrivare infine alle considerazioni personali sull'esperienza svolta.

### **12.1 Soddisfazione delle richieste**

Per quanto riguarda l'obiettivo da raggiungere si può senz'altro dire che le specifiche richieste ai nuovi prodotti sono state portate a compimento.

I crogioli creati sono in grado di sostituire i precedenti in quanto realizzabili con le medesime tecniche di miscelazione e stampaggio, possono essere sottoposti allo stesso ciclo termico di cottura e infine, cosa più importante, sono ugualmente resistenti e impiegabili nelle medesime condizioni di lavoro.

Un aspetto aggiuntivo riguarda il fatto che ora i pezzi vengono interamente realizzati in sede con la conseguenza di avere la piena gestione e padronanza dell'aspetto produttivo, cosa che prima avveniva solo in parte essendo la materia prima fornita dal produttore esterno che la consegnava a "scatola chiusa".

Di conseguenza ogni volta sarà necessaria una lieve modifica al prodotto la si potrà effettuare direttamente in azienda senza dover interloquire con persone esterne che portano all'inevitabile allungamento dei tempi di lavoro e a una spesa di denaro maggiore.

### ***12.2 Eventuali migliorie da attuare al ciclo produttivo***

Il secondo aspetto da analizzare riguarda le migliorie da apportare nel processo di realizzazione dei pezzi perché così com'è non può essere pensato come quello definitivo per la normale produzione aziendale di serie.

Questo non significa che il nuovo prodotto non sia idoneo poiché, come già detto, si presta in tutto e per tutto alla produzione tale e quale al precedente materiale; la differenza sta nel fatto che lo scopo del lavoro svolto è la sola individuazione e realizzazione del prodotto, mentre l'effettivo inserimento nel ciclo produttivo aziendale sarà un aspetto successivo di altrui competenza.

Nonostante ciò, ci sono sicuramente degli aspetti e delle soluzioni che si possono trattare anche in questa sede.

Innanzitutto, la prima questione da affrontare riguarda la difficoltà nell'operazione di stampaggio dovuta alla pezzatura troppo grossa della kerphalite KB.

Dal momento che i fornitori di materie prime offrono una scarsa varietà di granulometrie per i loro prodotti, una soluzione potrebbe essere quella di realizzare direttamente in azienda un piccolo reparto o spazio munito di setacci, automatici o non, in modo da poter ricavare una frazione più fine da quella 0.3/1.6 mm fornita da Imerys.

In questo modo, escludendo la frazione più grossa e realizzando delle granulometrie via via intermedie si può ripercorrere il lavoro svolto nella realizzazione degli impasti, ora con le conoscenze e consapevolezze già acquisite in modo da puntare da subito la giusta direzione.

In secondo luogo, un aspetto importante certamente da rivedere riguarda la temperatura di cottura dei pezzi.

Purtroppo questo è il punto debole del processo produttivo in quanto non dipende direttamente dalla volontà progettuale ma piuttosto dalla limitata potenza termica del forno.

Con una temperatura maggiore di cottura si potrebbe senz'altro favorire la formazione di una struttura migliore nel ceramico, anche a scapito di ridurre un po' la porosità totale, comunque già notevole.

L'ultima attenzione si deve all'aspetto dimensionale dei crogioli.

Come già detto, la variabilità nelle dimensioni dei pezzi finiti dipende unicamente dai ritiri che avvengono in cottura.

Per avere una uniformità di dimensione dei pezzi, soprattutto rispettante le specifiche di progetto, è necessario quindi calcolare perfettamente il giusto tenore di argille da inserire negli impasti e verificare il conseguente ritiro fino ad arrivare alla soluzione voluta.

### ***12.3 Considerazioni personali***

In ultima analisi bisogna affrontare l'esperienza fattivamente svolta all'interno dell'azienda durante l'attività di lavoro.

Durante le 300 ore previste per l'attività di tirocinio sono state molte le cose viste e imparate, anche al di fuori dello stretto ambito di produzione dei crogioli.

In particolare ho avuto modo di vedere dal suo interno una realtà industriale, seppur di piccole dimensioni, assistendo alla gestione amministrativa e produttiva in tutte le loro parti, lavorando con altri tecnici e visitando fiere e convegni dedicati al settore.

Inoltre mi è stata data la possibilità di organizzare interamente la mia attività, dal recupero delle materie prime all'organizzazione degli strumenti fino al rapporto con i fornitori esterni.

In finale, più che una classica attività di tirocinio svolta in un laboratorio, ho sperimentato come una figura professionale diversa da quella dell'operaio specializzato possa inserirsi in una tipica realtà industriale del nostro territorio, e come un metodo di lavoro basato sullo studio e organizzazione precisi dei dati a disposizione possano dare un aiuto concreto anche a queste piccole realtà.

Un ringraziamento va senz'altro al mio tutor aziendale Guglielmo Gusella e al prof. Massimo Guglielmi, per la disponibilità e attenzione riservatami.

## **BIBLIOGRAFIA**

---

- “I ceramici”, Gottardi Vittorio, edizione Patron 1977.
- “Lezioni dal corso di scienza e tecnologia dei materiali ceramici”, volume secondo, Amato Ignazio e Montanaro Laura, edizioni libreria Cortina Torino 1997.
- “Scienza e tecnologia dei materiali 2”, dispense del Prof. Guglielmi Massimo, università di Padova.
- Dispense del Prof. Licciulli Antonio, università di Lecce.
- Schede tecniche fornite da Damrec e AGS mineraux del gruppo Imerys.
- Schede tecniche e dati forniti da Italker S.r.l.