

Università degli Studi di Padova

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Tesi di Laurea Triennale:

Esperimenti di fusione e
solidificazione dell'alluminio in
crogiolo a levitazione magnetica

Relatori: Ch.mo Prof. Chitarin Giuseppe

Ch.mo Prof. Timelli Giulio

Laureando: Toniolo Andrea

Anno accademico 2010 - 2011

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
CAPITOLO 1: Richiami di elettromagnetismo	5
1.1 Campo magnetico.....	5
1.2 Induzione magnetica.....	6
1.3 Equazioni di Maxwell	7
1.4 Correnti parassite	9
1.5 Forze magnetiche	10
CAPITOLO 2: Applicazioni del campo magnetico a processi industriali	13
2.1 Leghe di titanio con il metodo CCLM.....	13
2.2 Applicazione a diversi tipi di materiali.....	14
2.3 Induction skull melting	15
2.4 Effetti sulle leghe Al-Si	16
CAPITOLO 3: Il vuoto	18
3.1 Cos'è e come si ottiene	18
3.2 Applicazioni in metallurgia	19
3.3 Porosità dell'alluminio	20
CAPITOLO 4: Descrizione del sistema usato negli esperimenti.....	23
4.1 Parte elettromagnetica	23
4.2 Crogiolo e sistema di avvolgimenti.....	23
4.2.1 Avvolgimenti.....	23
4.2.2 Crogiolo	24
4.3 Parte idraulica	26

4.4 Modifiche Apportate	27
4.5 Schemi del sistema	28
4.5.1 Schema elettrico	28
4.5.2 Schema idraulico	28
CAPITOLO 5: Procedimento e analisi	29
5.1 Procedimento	29
5.2 Analisi dei campioni	30
CAPITOLO 6: Misure	33
CONCLUSIONI:	55
BIBLIOGRAFIA:	57

Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è studiare il comportamento dell'alluminio durante e dopo il processo di fusione in levitazione magnetica. Verificare le migliori condizioni di fusione per ottenere dei campioni di alluminio il più possibile liberi da gas.

A sostegno della mia tesi ho svolto delle prove sulla fusione a freddo dell'alluminio nel laboratorio di elettrotecnica dell'università di Padova, sede di Vicenza. Il tutto è stato svolto sotto la supervisione dei chiarissimi prof.ri Chitarin Giuseppe e Timelli Giulio e l'aiuto tecnico di Losco Roberto. Lo scritto dal punto di vista metodologico e tematico è diviso in cinque parti: nella prima si riporta la teoria sull'elettromagnetismo, fondamentale per poter capire i meccanismi che regolano il fenomeno della levitazione magnetica e la conseguente fusione del metallo.

La seconda e terza parte riguardano rispettivamente, in maniera generale, alcune delle applicazioni pratiche del campo magnetico e del vuoto in campo industriale, ma anche studi condotti su tali processi per determinare come la presenza di uno o dell'altro incida sui risultati di fusione dei materiali.

In ultimo si descrivono la struttura del sistema e il procedimento con il quale si ottiene la levitazione e successivamente la fusione, seguito da un'analisi sui campioni per determinarne la qualità.

L'elaborato si conclude con una raccolta di tabelle e dati relativi alle prove eseguite, con relativa descrizione e conclusione.

CAPITOLO 1

1 - Richiami teorici di elettromagnetismo

1.1 Campo magnetico

Se si porta un ago magnetico nelle vicinanze di un magnete prismatico si può constatare come l'ago prende una determinata orientazione a seconda della sua posizione rispetto al magnete. Ciò significa che sull'ago magnetico agiscono determinate forze e che la direzione di queste varia a seconda della posizione dell'ago. Tali forze agiscono in verso opposto sui poli dell'ago formando una coppia che determina la diversa orientazione dell'ago stesso. La regione dello spazio in cui si manifestano le forze prende il nome di campo magnetico, che per essere rappresentato graficamente, si tracciano delle linee di forza indicandone il verso.

Anche un conduttore percorso da corrente produce un campo magnetico nello spazio che lo circonda. Il fenomeno può essere messo in evidenza disponendo verticalmente un conduttore rettilineo percorso da corrente; posizionando un ago magnetico nei punti circostanti si potrà constatare che l'asse dell'ago magnetico si dispone sempre tangenzialmente a un sistema di linee chiuse circolari e concentriche al conduttore ovvero le linee di forza.

Il verso delle linee di forza così generate è fornito dalla regola di Maxwell (o anche regola della mano destra). Nel caso particolare di un solenoide (infinito) si trova che l'intensità del campo dipende unicamente dalla corrente I , dal numero di spire N e dalla lunghezza L del solenoide.

$$H = \frac{NI}{L}$$

Il campo magnetico, che si misura in [A/m], è rappresentato da un vettore H la cui direzione è quella della tangente alle linee di forza (o di campo magnetico) ed il cui verso è quello indicato dalla regola di Maxwell. In generale H dipende dalla geometria del filo interessato dalla corrente: se il filo è rettilineo, il campo ad una distanza d dal filo è $H = \frac{I}{2\pi d}$ se, invece,

si tratta di una spira, l'intensità al centro di essa risulta $H = \frac{I}{2r}$. E' importante notare che H non dipende dal materiale (purché esso sia uniforme).

1.2 Induzione magnetica

La variazione del campo magnetico produce una tensione indotta (fenomeno dell'induzione magnetica) che a sua volta può produrre corrente. La tensione indotta però non dipende dalla variazione locale del campo magnetico, bensì dalla variazione del flusso delle linee di campo magnetico attraverso l'intera superficie il cui bordo costituisce il percorso lungo il quale si vuole misurare (o calcolare) la tensione indotta.

All'insieme di linee di forza si dà il nome di flusso del campo magnetico; se tale flusso viene abbracciato N volte dalle spire di un circuito qualunque, al prodotto $\varphi_C = N \varphi$ si dà il nome di flusso concatenato. Mediante queste definizioni si può brevemente dire che il fenomeno dell'induzione elettromagnetica si manifesta in conseguenza di una variazione del flusso magnetico concatenato con il circuito.

Si consideri ora un campo magnetico uniforme, nel quale sia presente una superficie S normale alle linee di induzione. Il flusso magnetico che attraversa la superficie si misura in weber [Wb] oppure in volt per secondo [V·s]. Si può quindi parlare di flusso per unità di superficie, il quale definisce l'induzione magnetica B .

$$B = \frac{\varphi}{S}$$

L'induzione B si misura in Tesla [T] ed è legata ad \bar{H} attraverso una costante di proporzionalità μ che dipende dal materiale.

L'induzione B è direttamente proporzionale all'intensità del campo magnetico H e si presenta con caratteristiche di grandezza vettoriale avente la stessa direzione e lo stesso verso del vettore H . Indicando con μ un opportuno fattore di proporzionalità, la relazione viene scritta:

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Il fattore di proporzionalità μ viene detto permeabilità magnetica e il suo valore dipende dalla natura del mezzo fisico in cui ha sede il campo. Per l'aria, i gas e tutti i materiali non magnetici la permeabilità μ ha praticamente lo stesso valore che si riscontra nel vuoto: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$. Per ogni altro mezzo si pone $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ dove μ_r è la permeabilità relativa.

Per una definizione più generale, si prenda in esame un filo conduttore percorso da una corrente I ; il campo elementare di un tratto infinitesimo dl risulta proporzionale alla corrente e inversamente proporzionale al quadrato della distanza r . Per ottenere il campo B occorre suddividerlo in elementi infinitesimi e calcolare per ognuno l'induzione e sommare i risultati.

Scriviamo la legge di Ampère Laplace

$$B = \frac{\mu}{4\pi} i \oint \frac{d\vec{l} \times \vec{u}_r}{r^2}$$

u_r è versore radiale; μ è la costante del materiale: nel vuoto, come già detto, $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m]

La legge risulta verificata sperimentalmente in ogni situazione purché il materiale sia uniforme fornendo il legame cercato tra il campo magnetico e la corrente che lo genera.

Un caso particolare della legge di Ampère-Laplace è la legge di Biot-Savart, la quale calcola un'espressione del campo magnetico per un filo rettilineo di lunghezza indefinita e ci aiuta a capire l'andamento delle linee di forza del campo: le linee sono circonferenze concentriche al filo stesso e risultano concatenate alla corrente.

1.3 Equazioni di Maxwell

Le equazioni note come equazioni di Maxwell sono quattro e possono essere espresse sia in forma integrale che differenziale.

$$\phi_E = \oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon}$$

Il flusso del vettore campo elettrico (E) attraverso una superficie chiusa è uguale alla carica elettrica racchiusa dalla superficie divisa per la costante dielettrica del mezzo (legge di Gauss). Il significato fisico di questa prima equazione è che esiste un monopolo elettrico, cioè la carica elettrica singola, ed essa è sorgente del campo elettrico.

$$\phi_B = \oint \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Il flusso del vettore induzione magnetica attraverso una superficie chiusa è nullo. Il significato fisico è che il campo magnetico è solenoidale, ovvero le linee di forza sono sempre chiuse e non esiste il monopolo magnetico.

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = -\frac{d\phi(B)}{dt}$$

La circuitazione del vettore campo elettrico (E) è uguale alla derivata del flusso, cambiato di segno, del vettore induzione magnetica attraverso la superficie delimitata dal contorno (Legge di Faraday-Lentz). Il significato fisico è che il flusso di B variando nel tempo, induce una corrente elettrica che a sua volta genera un campo magnetico, il cui flusso varia in direzione opposta a quella del campo B che l'ha generato.

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = \mu_0 \left(i + \epsilon_0 \frac{d\phi(E)}{dt} \right)$$

La circuitazione del vettore induzione magnetica è uguale al prodotto della permeabilità magnetica del mezzo per il flusso totale di carica elettrica nell'unità di tempo che attraversa la superficie delimitata dal contorno (legge di Ampère-Maxwell). Il flusso totale di carica nell'unità di tempo è la corrente totale, composta dalla corrente di conduzione e dalla corrente di spostamento

$$I_{tot} = I + I_s$$

Le equazioni di Maxwell sono scritte per un qualsiasi mezzo materiale e mettono in risalto come fenomeni elettrici e magnetici non possano esistere separatamente. Ciò risulta chiaro se si osservano le ultime due equazioni: se in una certa regione dello spazio non ci sono correnti di conduzione I ma si presentano variazioni di campo elettrico nel tempo, esiste un campo magnetico B ed anche viceversa, variazioni di campo magnetico portano alla formazione di campi elettrici.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 \left(i + \varepsilon_0 \frac{d\phi(E)}{dt} \right) \quad \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = - \frac{d\phi(B)}{dt}$$

Invece dell'induzione magnetica, nelle equazioni può essere usato il campo magnetico, la grandezza più immediatamente legata alla corrente elettrica, nel senso che il suo valore dipende esclusivamente dall'intensità di corrente e non dal mezzo. Si indica H ed è legato a B da $H = B/\mu$. Inoltre, si può introdurre il concetto di densità di spostamento $D = I_s/S$ dove I_s la corrente di spostamento ed S la superficie attraversata dallo spostamento elettrico. D è la grandezza che dipende più direttamente da B ; si ha per essa la relazione $D = \varepsilon E$.

Le equazioni di Maxwell espresse in forma differenziale nel vuoto, essendo nulle le correnti di conduzione e carica elettrica, raggiungono una perfetta simmetria tra campo magnetico e campo elettrico: entrambi sono costituiti da linee chiuse e la loro dipendenza dal tempo fa sì che le une siano l'origine delle altre in una spirale generatrice infinita in ogni punto e per tutti i punti dello spazio.

1.4 Correnti parassite

In un materiale conduttore posto in campo magnetico alternato nascono delle correnti alternate circolari tutte alla stessa frequenza. Tali correnti generano a loro volta un campo magnetico in direzione opposta al campo magnetico applicato. La parte del pezzo interessata dalle correnti parassite, ovvero la profondità di penetrazione delle correnti, viene calcolata sapendo σ (conducibilità), μ (permeabilità) e la pulsazione del campo magnetico $\omega = 2\pi f$.

$$\delta = (0.5 \omega \mu \sigma)^{-1/2}$$

Le correnti parassite interessano appunto il pezzo fino alla profondità δ . Sono causa di due effetti molto importanti: il riscaldamento del pezzo e la creazione di schermi elettromagnetici che, nel caso specifico del crogiolo a levitazione magnetica, permettono di ottenere la forza levitante.

1.5 Forze magnetiche

Si consideri una particella di massa m e carica q posta in un campo magnetico di induzione B ; se la particella è ferma, su di essa non agisce nessuna forza perché l'interazione magnetica si manifesta solo su cariche in movimento. Infatti se la particella è in moto con velocità v rispetto al sistema di riferimento, si verifica che su di essa agisce la forza detta Forza di Lorentz

$$F = q \vec{v} \times \vec{B}.$$

L'energia cinetica della particella resta costante perché la forza di Lorentz comporta solamente un'accelerazione trasversale, cambia la direzione della velocità ma non il modulo. Nel caso del crogiolo a levitazione magnetica, nel pezzo nascono delle correnti indotte che producono un campo magnetico opposto a quello che le ha generate; il pezzo di metallo fuso dovrebbe levitare in maniera stabile quando avvolto da un campo magnetico uniforme; per effetto pelle, però, le correnti che generano il campo magnetico nel metallo sono verso la superficie del pezzo e, di conseguenza, non è presente alcun campo magnetico all'interno del metallo (oppure ha un valore trascurabile) quindi la stabilità del pezzo è data dalla pressione magnetica che agisce su tutti i lati di esso. Queste forze impongono una forma al metallo fuso che non è quella tipica dell'avvolgimento, ma dipende anche dall'azione della forza di gravità e tensioni superficiali. I parametri invece che incidono sulla levitazione del pezzo sono la densità del metallo allo stato liquido e, ancora, la tensione superficiale. Assumendo che la forza di levitazione nella parte inferiore del metallo fuso sia trascurabile (questo perché, ipotizzando una spira piccola, la tensione su di essa è piccola così come la forza che ne risulta), possiamo ottenere una definizione di tensione superficiale e densità. Si realizza un equilibrio statico lungo l'asse

dell'avvolgimento ipotizzando l'equilibrio di forze; se il pezzo ha una densità Dm e un'altezza h la gravità causa una pressione $h \cdot Dm$ nella parte inferiore del pezzo. La pressione totale dipende dalla forza gravitazionale, dalla pressione esercitata nella parte alta del pezzo e dalla tensione superficiale:

$$P_g = gh(\rho - \rho_0)$$

$$P_s = \frac{2\gamma}{R}$$

$$P_m = \frac{(B_1^2 - B_0^2)}{2\mu_0}$$

La P_g è la pressione gravitazionale dovuta alla differenza di densità $(\rho - \rho_0)$ con ρ la densità del metallo fuso e ρ_0 la densità dell'aria, P_s è la pressione superficiale che dipende dalla tensione superficiale e P_m è la pressione magnetica quando l'induzione passa da B_0 a B_1 .

La pressione elettromagnetica dovuta al campo magnetico alternato è generalmente espressa da:

$$F = -\frac{1}{2\mu} \nabla(\vec{B} \cdot \vec{B}) + \frac{1}{\mu} (\vec{B} \nabla) \vec{B}$$

Il primo termine, che causa una forza opposta a quella di gravità, viene detto non rotazionale. Il secondo termine, causa del moto elettromagnetico, è rotazionale. Anche quando il primo termine diventa dominante ad alte frequenze, il secondo non si annulla inducendo oscillazioni e convezioni nel metallo. Sperimentalmente è possibile ridurre queste oscillazioni attraverso un campo magnetico statico, il quale riduce la convezione del fluido causata dalle correnti parassite. Infatti $\frac{1}{\mu} (\vec{B} \nabla) \vec{B}$ è mediamente nullo da cui si ricava che

$$F \cong \frac{1}{2\mu_0} (B_1^2 - B_0^2) + 0$$

Il fenomeno fisico è descritto dalla seguente equazione:

$$\frac{\vec{F}}{W} = -\frac{3 G(x)}{2 \rho \mu_0} (\vec{B} \nabla) \vec{B} \quad \text{con } x = R(0.5\omega\mu\sigma)^{1/2}$$

Dove W è il peso del materiale, ρ è la densità del materiale, μ_0 è la permeabilità magnetica, σ la conduttività del materiale, R il raggio del materiale, ω la pulsazione del campo magnetico e $G(x)$ funzione matematica

$$G(x) = 1 - \frac{3}{2x} \frac{\sinh 2x - \sin 2x}{\cosh 2x - \cos 2x}$$

CAPITOLO 2

2 - Applicazioni del campo magnetico a processi industriali

Negli ultimi anni è stata molto studiata l'applicabilità del campo magnetico in campo metallurgico per osservare e valutare gli eventuali vantaggi sulle proprietà meccaniche dei pezzi. Inoltre esistono già apparati industriali che utilizzano il campo magnetico nei processi produttivi (riscaldamento a induzione).

Tuttavia i sistemi di fusione in levitazione magnetica sono ancora allo stadio sperimentale in un piccolo numero di laboratori.

2.1 Leghe di titanio con il metodo CCLM

Sebbene il materiale più usato per gli studi sia l'alluminio, dato il basso costo, un'applicazione molto importante della fusione per campo magnetico riguarda il titanio (Ti) e la sua applicazione in campo biomedico.

Le leghe di titanio sono superiori a qualsiasi altro materiale biomedico per la loro bio-compatibilità, resistenza a corrosione e proprietà meccaniche. Però queste leghe includono al loro interno alluminio (Al) e vanadio (V), i quali sono tossici per il nostro corpo. Perciò sono state sviluppate nuove leghe di titanio e tantalio (Ta) e titanio e niobio (Nb). Ta e Nb sono difficili da combinare uniformemente al Ti usando fornaci comuni poiché tali materiali hanno una grande differenza del punto di fusione e peso specifico rispetto al Ti.

Per risolvere questo problema si usa il metodo della fusione con crogiolo a freddo a levitazione magnetica (CCLM: cold crucible levitation melting); tale metodo permette ai metalli di essere fusi senza contaminazioni perché levitano e fondono all'interno del crogiolo e da qui la possibilità di ottenere una lega solida di composizione uniforme^[1].

Ciò dimostra come il metodo CCLM sia ottimo per creare leghe che non potrebbero essere facilmente ottenute con i metodi più comuni.

Prove mirate sulla lavorazione della lega TiNi (titanio nichel) hanno dimostrato come l'applicazione del campo magnetico comporti un'omogeneizzazione della microstruttura e un'eliminazione delle impurità piuttosto accurata^[2]. Tutte le leghe TiNi (diversificate in base alla quantità di Ni) hanno mostrato una trasformazione dalla fase austenitica a quella martensitica o sotto o sopra la temperatura ambiente e alcune leghe hanno addirittura mantenuto, allo stato fuso, la stessa forma che avevano allo stato solido. Questo succede perché si forma uno strato piuttosto spesso di ossido (TiO₂) che si forma sulla superficie quando la lega è in fusione e può essere ridotto con l'aggiunta di cromo (Cr).

2.2 Applicazione a diversi tipi di materiali

L'uso del campo magnetico è stato esteso anche a processi di produzione di materiali avanzati, metalli e non metalli, materiali magnetici e nanomateriali. Applicando un campo magnetico al processo di produzione del superconduttore MgB₂ (Borato di Magnesio), si è scoperto come, anche in questo caso, la microstruttura fosse più uniforme e i grani avessero dimensioni minori e con una maggiore connettività. Il tutto comporta ad avere un nuovo MgB₂ in grado di sopportare una densità di corrente J_c maggiore rispetto a quella sopportata dal normale MgB₂ prodotto senza campo magnetico e perciò è a tutti gli effetti migliore^[3].

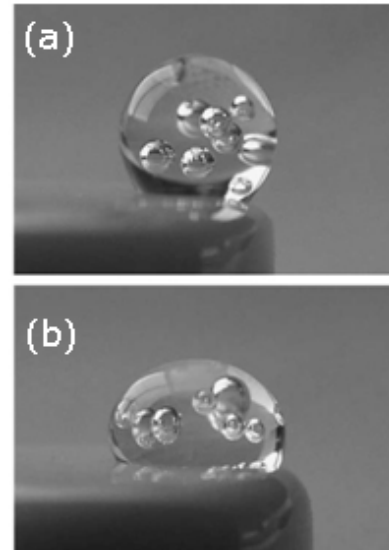
Anche per i materiali magnetici, l'utilizzo del campo magnetico durante la loro produzione, è utile per controllare la microstruttura e ottenere quindi migliori prestazioni nelle applicazioni pratiche: in questo caso il campo magnetico viene applicato durante il processo di solidificazione così da rendere la microstruttura anisotropica.

I materiali metallici non reagiscono diversamente all'applicazione del campo magnetico, il quale, migliora la qualità della microstruttura e riduce le macrosegregazioni nelle leghe. Per esempio la produzione di tubi d'acciaio inossidabile attraverso fusione per centrifugazione con campo elettromagnetico ne aumenta di molto la capacità di deformazione plastica.

Un esempio poi di applicazione ai polimeri è un nuovo tipo di fornace a levitazione la quale consiste in una fornace elettrica, un magnete ibrido o superconduttore e un obiettivo a prova di calore per permettere le riprese interne. Si è ottenuto con successo un campione sferico di un polimero (olefine) invece di una sfera schiacciata ottenuta, invece, con la stessa fornace ma con campo magnetico nullo^[4].

In figura (a) si può vedere come il polimero abbia una forma sferica rispetto, invece, alla figura (b).

Il primo è stato ottenuto fondendolo e poi facendolo solidificare in levitazione magnetica mentre il secondo in campo nullo.



Il campo magnetico ha quindi la capacità, generalmente, di far migrare le inclusioni dal metallo fuso, allineare i grani e migliorare le proprietà meccaniche dei materiali, siano essi superconduttori, metalli o non metalli, magnetici o dia/paramagnetici.

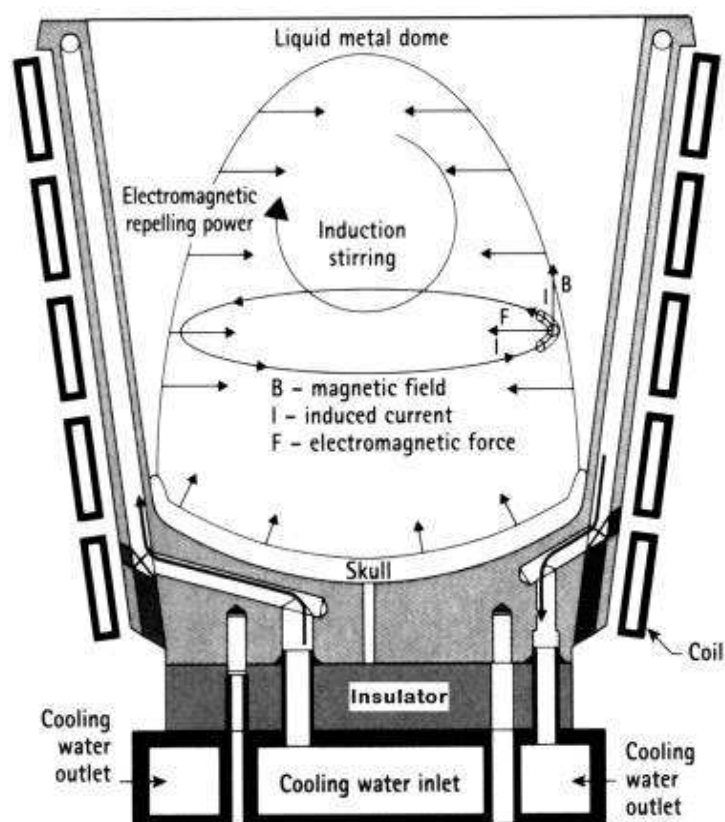
2.3 Induction skull melting

Una delle tecniche di fusione più diffuse è la induction skull melting (fusione in semilevitazione), parecchio utilizzata per la fusione di certe leghe molto reattive in condizioni di fusione come quelle a base di Ti, Ti-Al, Zr (zirconio), prima della gettata per ottenere pale per turbine, valvole per motori, rotori di turbocompressori e protesi mediche. Varie ricerche hanno permesso di migliorare questo processo e, oggi, si riescono ad ottenere ottimi risultati anche con gettate per ottenere sezioni sottili e materiali con qualità migliore, inoltre, e non meno importante, ne è stata migliorata l'efficienza energetica. Tale processo è tuttora applicato su scala industriale.

Il processo avviene in un recipiente segmentato di rame, raffreddato ad acqua, sottovuoto o in atmosfera controllata e una bobina a induzione che circonda il recipiente. Il tutto senza alcun rivestimento con materiale refrattario.

Il campo magnetico prodotto dalla bobina passa attraverso il crogiolo e induce calore al metallo portandolo a fondere. Un sottile strato di metallo si raffredda e rimane attaccato alle pareti del crogiolo prendendo la forma di un cranio; lo strato di metallo adiacente al cranio, il cranio stesso e il crogiolo fungono da resistenze termiche, riducendo il trasferimento di calore dal metallo liquido al crogiolo freddo. Il campo inoltre mescola intensamente il metallo fuso ed è proprio questo che permette al metallo di essere altamente omogeneo e avere una distribuzione più efficace degli elementi in lega, anche aventi densità più elevata.

Illustrazione del processo di skull melting



2.4 Effetti sulle leghe Al-Si

Studi più approfonditi^{[7][8]} sono stati condotti sulle leghe di alluminio-silicio. L'applicazione di un elevato campo magnetico sopprime la convezione della lega fusa e contribuisce a rallentarne il processo di solidificazione perché la velocità di dissipazione del calore diminuisce e permette ai cristalli di silicio di nucleare e crescere.

In sostanza la forza di Lorentz, la forza di magnetizzazione e l'energia magnetica hanno tutte un ottimo effetto sul processo di solidificazione; nello specifico:

- I cristalli primari di silicio sono distribuiti in maniera relativamente omogenea, specialmente nella direzione del campo magnetico e lo spazio interlamellare della struttura eutettica diminuisce se applicato un valore ottimale del campo (8T);
- La forza di magnetizzazione controlla la distribuzione dei cristalli di silicio in una lega ipereutettica, perciò il campo magnetico può essere usato per controllare la distribuzione di elementi di rinforzo. Possono essere distribuiti uniformemente, oppure aggregati in certi punti a seconda dello scopo;
- L'energia magnetica determina la quantità di alluminio eutettico;
- Il modulo di Young (E), così come la durezza Vickers, aumenta se la lega è creata in presenza di campo magnetico;

Ovviamente, data l'effettiva efficacia, ci sono molteplici altre applicazioni del campo magnetico nei processi di produzione industriale e anche quelli attuali sono in continua evoluzione.

CAPITOLO 3

3 - Il vuoto

3.1 Cos'è e come si ottiene

In fisica, il vuoto è l'assenza di materia in un volume di spazio. Un vuoto parziale viene espresso in unità di pressione [Pa, bar].

Quando si crea un vuoto parziale, la materia presente nel volume che viene evacuato, scorre in modo differente a differenti pressioni in base alle leggi della fluidodinamica. Inizialmente può essere usata una pompa a vuoto primaria per rimuovere il materiale, poiché le molecole interagiscono l'una con l'altra e spingono quelle a loro vicine in quello che viene chiamato flusso viscoso (valori di pressione tra 1 e 10^3 mbar). Quando la distanza tra le molecole aumenta, esse interagiscono più con le pareti del recipiente che con le altre molecole, e il pompaggio tradizionale (con pompe primarie) non è più efficace.

In questo stadio, il sistema è entrato in uno stato chiamato flusso molecolare (che equivale ad una pressione inferiore a 10^{-3} mbar), dove la velocità di ogni molecola è praticamente casuale. I metodi per rimuovere il gas rimanente comprendono:

- Convertire le molecole di gas alla loro fase solida tramite congelamento (criopompa).
- Convertirle allo stato solido combinandole elettricamente con altri materiali, (pompa ionica)
- Utilizzare un'altra pompa specializzata. Ad esempio pompa turbomolecolare o pompa a diffusione.

A pressioni così basse, si verifica nel tempo il fenomeno del rilascio di gas (degasaggio) da parte del recipiente a vuoto. Esistono inoltre altri fenomeni che contrastano la diminuzione della pressione tendendo ad introdurre nuove molecole nel recipiente da vuoto, fra le quali vi sono le micro-perdite, la permeazione, l'introduzione di gas di processo e la scarsa conduttanza.

Anche se si genera un vuoto molto spinto in un contenitore sigillato ermeticamente, non c'è garanzia che la bassa pressione si conservi nel tempo, se non si considerano questi fenomeni. Il rilascio di gas è più alto ad alte temperature; e anche i materiali che a prima vista non sembrano assorbenti, liberano del gas. Il vapore acqueo è un componente primario del gas liberato, anche in recipienti di metallo duro come l'acciaio inossidabile o il titanio.

Il rilascio di gas può essere ridotto con l'essiccazione prima di fare il vuoto e con il riscaldamento durante le fasi iniziali (baking).

I recipienti rivestiti con materiale altamente gas-permeabile come il palladio, che è come una spugna che trattiene l'idrogeno, comportano importanti problemi di rilascio di gas. Per questi motivi spesso per creare gli impianti da vuoto si utilizzano particolari materiali da vuoto, studiati in modo da ridurre il più possibile i fenomeni che tendono ad aumentare la pressione nella camera.

Per ottenere il vuoto molto spinto, i recipienti vengono riscaldati a qualche centinaio di gradi [°C] in modo da anticipare il rilascio del gas. I gas liberati dal recipiente vengono tolti con pompe finché la maggior parte delle molecole sono state rimosse dopodiché la temperatura può essere nuovamente abbassata. Il processo per liberare il gas non sarebbe altrettanto efficace se fosse eseguito a temperatura ambiente. Le pressioni più basse attualmente ottenibili in laboratorio sono di circa 10^{-13} Pa ovvero 10^{-11} mbar.

3.2 Applicazioni in metallurgia

Uno studio di fattibilità^[5] è stato condotto sul processo ibrido di pressocolata con compressione parziale e in vuoto per fare in modo di ottenere dei prodotti privi di difetti e con eccellenti proprietà meccaniche. Una volta fuso, il materiale è fatto solidificare sotto un'elevata contropressione al getto allo scopo di rendere più compatta la struttura. In questa particolare applicazione, il metallo fonde in vuoto o in atmosfera controllata per ottenere una microstruttura migliorata e per ridurre al minimo le porosità. I

costi di questo processo sono però più elevati rispetto al normale processo di pressocolata, il quale, è un'alternativa più economica ma, naturalmente, permette di ottenere una buona struttura con pochi difetti (per la maggior parte porosità dovute a gas intrappolati), ma non altrettanto buona come quella che si ottiene con il sistema ibrido.

Un altro vantaggio nel fondere il metallo in vuoto, non solo nel processo appena descritto, ma anche più in generale, è che la sua fluidità aumenta e permette quindi, durante la colata, di riempire perfettamente gli stampi, specialmente quelli con sezioni sottili. Inoltre, in vuoto cambia la tipologia di scambio termico da conduzione a irraggiamento, la quale ha un grande effetto sulla distribuzione della temperatura e sul processo di solidificazione.

Nei sistemi di fusione a levitazione, fondere il materiale in vuoto comporta un'ulteriore riduzione dei difetti interni al materiale una volta solidificato, in quanto, in vuoto, lo strato di ossido che si formerebbe a contatto con l'aria è più sottile e permette il degasaggio del materiale. Si potrebbe inoltre incorrere nella formazione di ossidi che poi solidificano all'interno del materiale sottoforma di inclusioni e il vuoto è un ottimo deterrente.

3.3 Porosità dell'alluminio

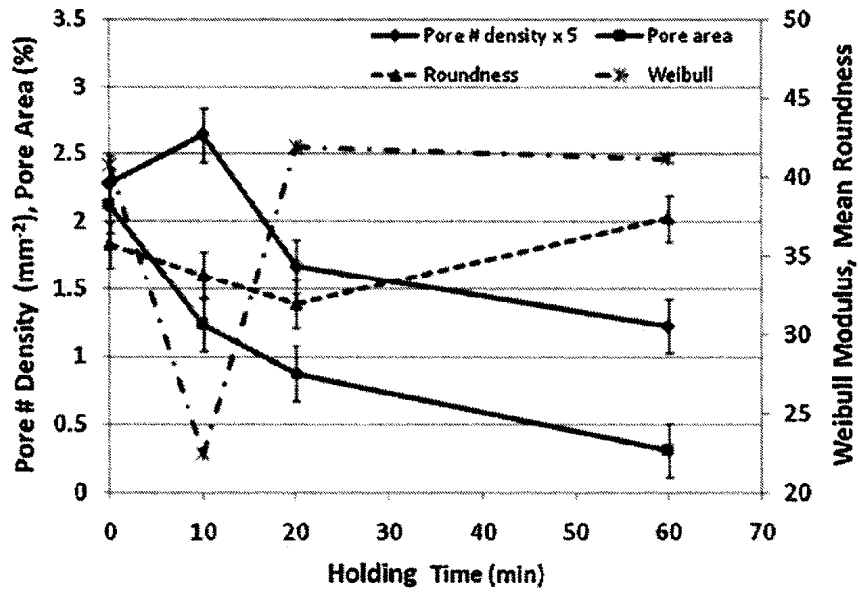
Molto importante è anche un esperimento^[6] condotto di recente per determinare quanto la permanenza dell'alluminio allo stato fuso incida sulla sua porosità finale una volta solidificato. L'alluminio è fuso in un forno a induzione in un crogiolo di grafite e, una volta fuso, viene trasferito in un forno a resistenze al cui interno viene creato un vuoto di 80mbar. L'alluminio viene mantenuto alla temperatura di 800 °C per 10, 20 e 60 minuti sia in condizioni di vuoto che a pressione normale e, infine, viene fatto solidificare. Dai lingotti solidi si sono ricavati dei campioni cilindrici e sono stati testati in una macchina di prova Instron 5586, ad una velocità di deformazione di 3 mm/min, per ottenere i valori UTS e allungamento percentuale dei provini; Per l'analisi dei dati è stata usata una distribuzione di Weibull a due parametri per valutare la dispersione delle proprietà meccaniche. Un modulo di Weibull elevato indica un'ottima riproduzione delle proprietà meccaniche e un basso numero di difetti. Dopo numerose

prove è risultato che mantenere l'alluminio in fusione per un tempo di 10 minuti porta ad una riduzione del modulo di Weibull rispetto ai valori misurati da campioni ricavati da lingotti fatto solidificare subito dopo essere stati fusi. Quando però il tempo di mantenimento allo stato fuso aumenta fino a 60 minuti, il modulo di Weibull aumenta fino a raggiungere il valore iniziale e anche superarlo.

Prima di analizzare i risultati di tale esperimento è necessario evidenziare un aspetto molto importante del comportamento dell'alluminio: la presenza dei difetti dovuti alla sua ossidazione (double oxide film defects). Questi difetti si formano durante qualsiasi processo di fusione dell'alluminio non appena il metallo fuso viene a contatto con l'aria ed è colato da un'altezza maggiore di 12cm. Si creano così queste pellicole ossidate (Al_2O_3), che non vengono completamente eliminate durante la fusione e alcuni residui, seppur molto piccoli, rimangono all'interno del materiale. Di conseguenza il calo iniziale del modulo di Weibull, cioè durante i primi 10 minuti, è stato attribuito alla diffusione dell'idrogeno all'interno di questi difetti causandone l'espansione diminuendo quindi la riproducibilità delle proprietà meccaniche. Comunque, prolungando il mantenimento a 60 minuti, questi difetti vengono portati in superficie riducendo quindi il contenuto di idrogeno all'interno della massa fusa e quindi anche il numero di difetti. Da notare, figure (a) e (b), come, nei provini ricavati dai lingotti di alluminio mantenuto a 80mbar, l'area delle porosità e il loro numero sia diminuito più rapidamente rispetto alla condizione di pressione a 1000mbar e anche la rotondità dei difetti è maggiore nei campioni mantenuti in vuoto. Tutto ciò può essere attribuito ad una rimozione più rapida dei difetti che, grazie al vuoto e all'idrogeno espanso all'interno dei difetti d'ossido, fluttuano meglio all'interno della massa fusa e raggiungono più facilmente la superficie. Un altro fattore che migliora la rimozione di gas è la lacerazione della pellicola di ossido sulla superficie esterna dell'alluminio fuso.

A seguire si possono confrontare i due grafici relativi all'esperimento appena descritto.

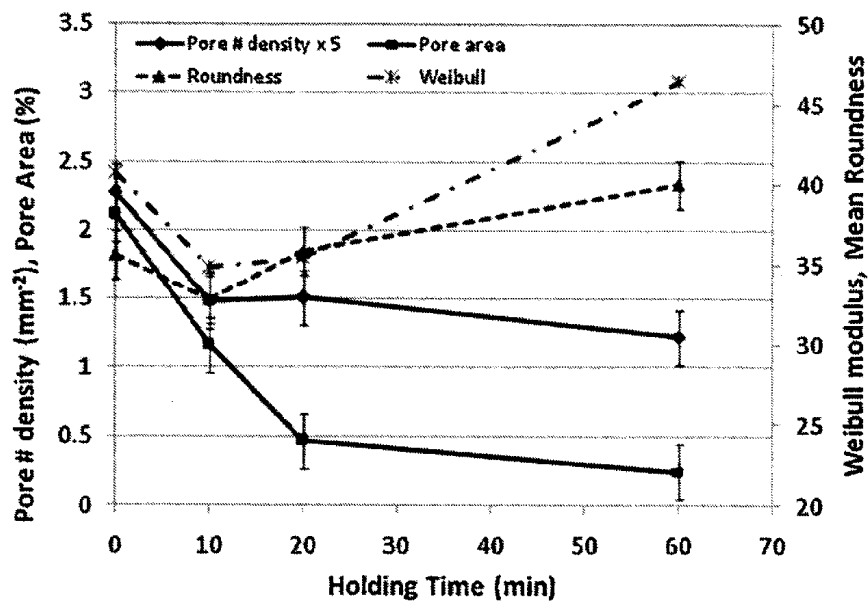
(a)



Alluminio fuso in condizioni di pressione di $P = 1000 \text{ mbar}$.

Si può notare il crollo iniziale del modulo di Weibull nei primi 10 minuti, per poi tornare intorno ai valori iniziali dai 20 minuti in poi.

(b)



Alluminio fuso in condizioni di pressione $P = 80 \text{ mbar}$.

In questo caso il modulo di Weibull cala più lentamente, e allo stesso modo, aumenta più lentamente rispetto alla condizione di pressione atmosferica, raggiungendo però valori ben più alti.

CAPITOLO 4

4 - Descrizione del sistema usato negli esperimenti

Il sistema è composto da una parte elettromagnetica ed una parte idraulica.

4.1 Parte elettromagnetica

La parte elettromagnetica comprende un inverter, il quale genera il segnale in frequenza, collegato ad un induttore e un trasformatore con induttanza al primario fissa, mentre il secondario presenta due tipi di combinazione (1/1 e 2/1); quella utilizzata normalmente è la configurazione 1/1. Poi troviamo un carico capacitivo per rifasare il sistema e infine gli avvolgimenti attorno al crogiolo.

4.2 Crogiolo e sistema di avvolgimenti

Il crogiolo, o meglio il blocco di fusione, è la parte fondamentale di tutto il sistema, poiché in tale zona nasce il campo magnetico che permette la levitazione e fusione dell'alluminio. Il dispositivo necessita di correnti elevate e tali correnti sono causa anche di un forte riscaldamento per effetto Joule (per effetto delle correnti indotte o parassite) e per questo ogni singolo spicchio di cui è composto il crogiolo, così come gli avvolgimenti, è raffreddato dall'interno. Il blocco di fusione è composto appunto dal crogiolo vero e proprio e dagli avvolgimenti.

4.2.1 Avvolgimenti

Gli avvolgimenti sono di rame, rivestiti con materiale isolante per evitare il contatto tra loro, e sono stati avvolti attorno al crogiolo in modo tale da realizzare una forma a cono come mostrato in figura:

le spire avvolte sono dodici e superiormente ci sono due spire in senso inverso, le quali servono a stabilizzare il metallo durante la levitazione, mentre, le spire inferiori e la forma a cono servono a dirigere le linee di campo per sollevare il pezzo e con questa configurazione si ottiene una buona levitazione.



4.2.2 Crogiolo

Il crogiolo è una struttura prevalentemente in rame, formata da dieci spicchi con un canale interno per il raffreddamento. I dieci spicchi sono posizionati in modo da avere la forma a cono e sono separati tra loro da un isolante. Il campo magnetico genera delle correnti indotte nel materiale conduttore per la legge di Lenz e queste correnti, oltre a disturbare il campo magnetico circostante, dissipano la loro energia in calore; per questo la divisione in spicchi del crogiolo è molto importante perché un crogiolo con più spicchi presenta una migliore distribuzione delle correnti parassite^[7] e creano uno schermo attorno ad ogni spicchio, determinando quindi un miglioramento nella distribuzione e nell'intensità della forza che fa levitare il pezzo.

Le figure sottostanti mettono a confronto un crogiolo con piano interno curvo (in breve piano curvo) e uno con piano interno inclinato conferente una forma interna a cono (in breve piano conico). La lunghezza delle frecce indica l'intensità della forza magnetica in quella regione. Osservando il piano curvo si noterà come la forza sia distribuita più uniformemente ma con intensità inferiore rispetto al piano conico.

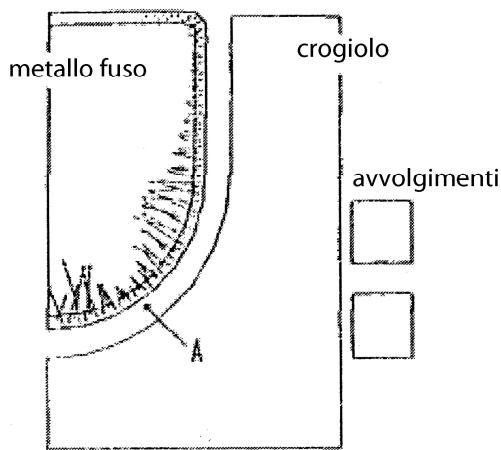


Fig. Distribuzione della forza
nel piano curvo

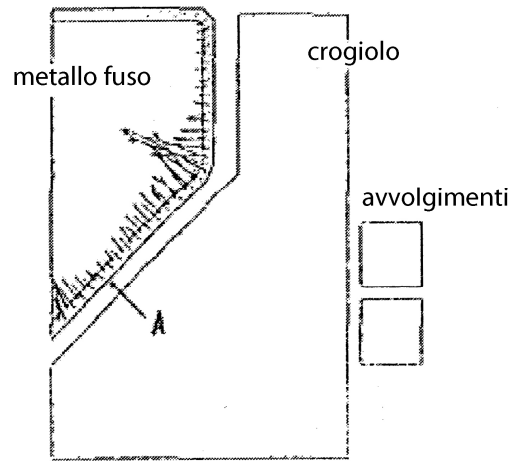
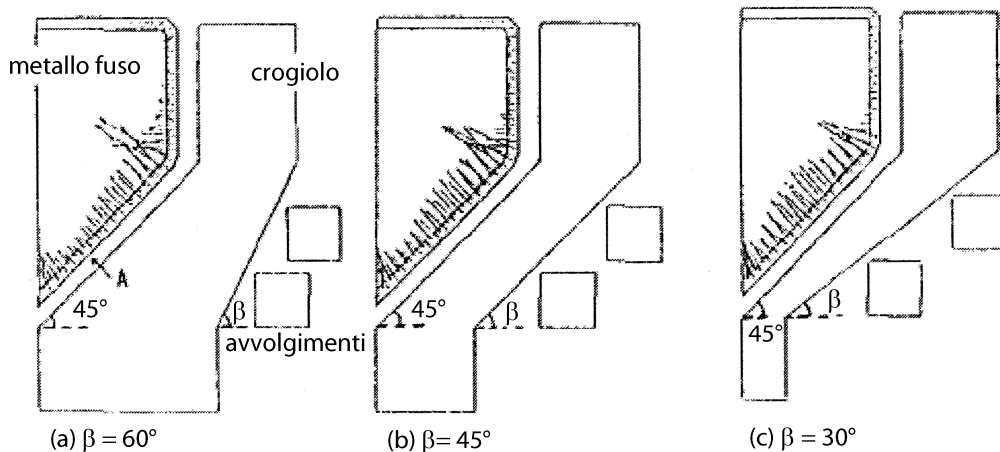


Fig. Distribuzione della forza
nel piano conico

Analizzando meglio il piano conico si osserva che si può migliorare l'intensità della forza modificando la geometria di ogni spicchio. In particolare si modifica l'angolo β , cioè l'angolo tra il piano esterno del segmento e il piano orizzontale. Riducendo β l'intensità della forza aumenta e si distribuisce più uniformemente.



Il compito principale del crogiolo è la distribuzione delle linee di campo in modo da sollevare il pezzo e, insieme agli avvolgimenti inversi, mantenerlo stabile durante la fusione.

Con il crogiolo, il campo magnetico, rispetto ad una situazione con sole spire, tende a concentrarsi nella parte bassa dove il diametro delle spire è

minore per poi distribuirsi più uniformemente via via che il diametro aumenta.

Nella zona alta, tra le spire inferiori e le spire inverse, si crea la zona di equilibrio. Le linee centrali hanno il compito di sollevare il pezzo e per questo è necessario che siano concentrate sull'asse verticale, mentre le linee di campo adiacenti mantengono stabile il metallo, anche allo stato fuso.

4.3 Parte idraulica

La parte idraulica comprende il sistema di raffreddamento e una pompa per ottenere il vuoto all'interno della camera contenente il crogiolo.

Il circuito di raffreddamento è un circuito chiuso, per non sprecare acqua, che viene raffreddata con un sistema piastra/piastra. Dal serbatoio si entra nella pompa passando per un filtro. La pompa provvede a far scorrere l'acqua prima all'inverter e poi all'induttore e al trasformatore. Nel circuito di sicurezza dell'alimentatore è inoltre presente un flussometro, il quale non permette l'avvio dell'alimentatore al di sotto di un valore di sicurezza di $10 \div 12$ lit/min. In uscita dall'alimentatore c'è un secondo collettore; il flusso viene diviso: una parte va al crogiolo mentre l'altra agli avvolgimenti superiori, per poi chiudersi su un'altro collettore. Il crogiolo, essendo suddiviso in spicchi, necessita di un'ulteriore coppia di collettori in ingresso e in uscita, per suddividere il flusso d'acqua e raffreddare ogni singolo spicchio. L'acqua va quindi allo scambiatore di calore a piastre per poi tornare al serbatoio.

Lo scambiatore preleva l'acqua dal sistema idraulico dell'edificio e viene scaricata all'esterno.

Per monitorare il sistema sono state collegate nove termocoppie nei punti indicati dallo schema riportato più avanti; ciò permette di mantenere sempre sotto controllo i valori di temperatura dell'acqua di raffreddamento e, una termocoppia in particolare, è posizionata in modo tale da misurare la temperatura dell'alluminio durante tutto il processo di fusione.

Il vuoto è ottenuto mediante l'impiego di una pompa a olio, la quale permette di ottenere valori di pressione di $2 \cdot 10^{-1}$ mbar. Oltre che in vuoto, il sistema permette di effettuare l'operazione di fusione in atmosfera controllata, nello specifico è stato utilizzato il gas Argon (Ar) per ridurre ulteriormente la presenza d'aria nella camera.

4.4 Modifiche apportate

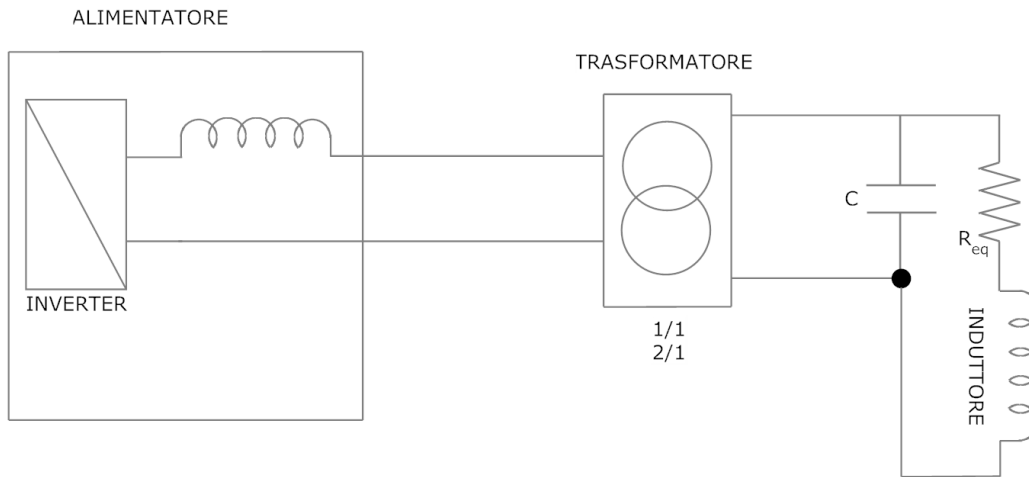
L'intero sistema ha subito diverse modifiche per ottenere una migliore levitazione e dei provini con porosità ridotte. Nello specifico, rispetto alle prove iniziali, i collettori di raffreddamento degli avvolgimenti sono stati spostati più in basso in quanto la loro massa metallica influiva sulla distribuzione del campo magnetico e quindi sulla stabilità del materiale; le spire superiori sono state lievemente abbassate per permettere una migliore stabilità in levitazione ed è stata migliorata la chiusura della seconda spira; ciò si è reso necessario perché il campo era più debole nella zona dove mancava l'effettiva chiusura della seconda spira e il metallo fuso tendeva a spostarsi verso quel punto invece che rimanere più al centro. Anche la pompa utilizzata all'inizio è stata sostituita per poter raggiungere pressioni più basse.

Inserita una nona termocoppia per misurare la temperatura dell'alluminio.

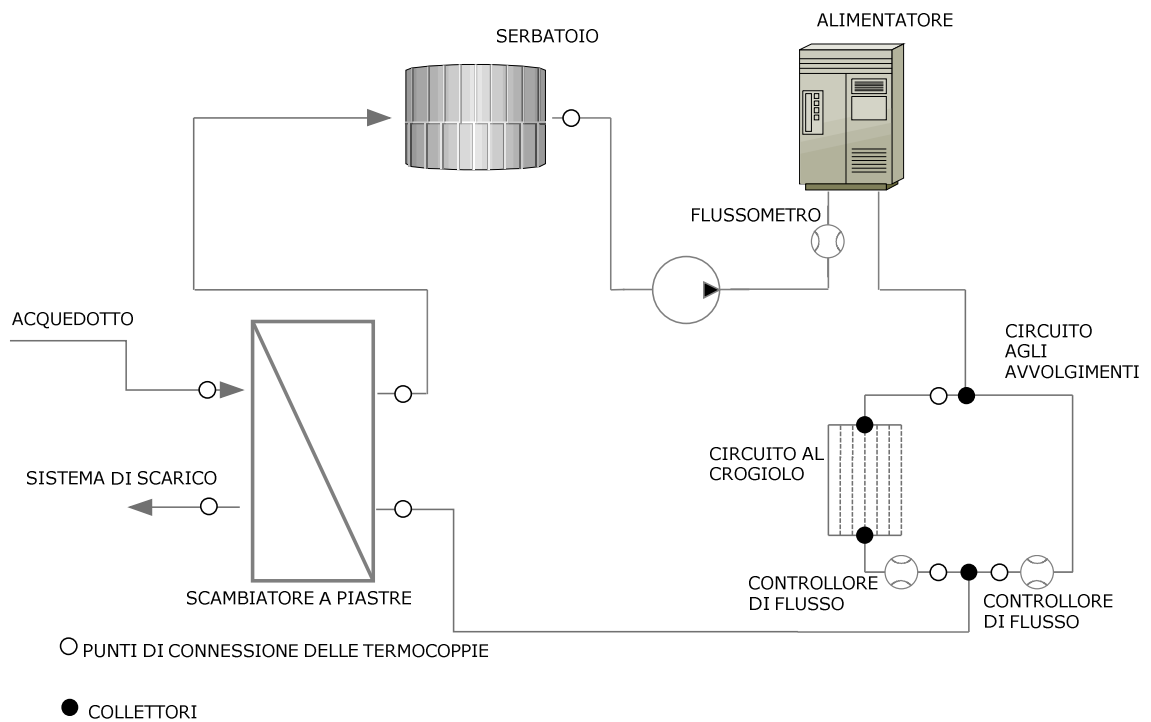
Ad ogni modifica del sistema segue una verifica di funzionamento controllando un circuito alla volta.

4.5 Schemi del sistema

4.5.1 Schema elettrico



4.5.2 Schema Idraulico



CAPITOLO 5

Procedimento e Analisi

5.1 Procedimento

Da un pane di alluminio 99% sono stati ricavati dei cubetti dal peso di circa 80g, di dimensioni 30x30x30 mm, in modo che, una volta fuso, potesse essere contenuto negli appositi provini ceramici. I cubetti sono stati ricavati dal cuore del pane di alluminio, per cercare di avere il minimo delle impurità dato che la parete esterna era già ossidata.

Una volta posizionato il cubo nel crogiolo, si chiude la camera e si avvia la pompa controllando che la calotta sia ben sigillata. Fatto ciò si attende che la pompa porti la camera al suo minimo valore di pressione e nel frattempo si avvia anche l'alimentatore così da riscaldare la camera e favorire la riduzione di pressione. Una volta raggiunta la minima pressione si aumenta gradualmente la potenza fino a raggiungere valori attorno a 20kW. Il pezzo inizia a levitare già a 10kW e progressivamente si riscalda fino a fondere completamente, pur rimanendo in levitazione.

Per permettere al materiale di far fuoriuscire i gas in esso contenuti, viene mantenuto allo stato fuso per venti minuti dopodiché la potenza viene progressivamente ridotta per permettere al metallo fuso di colare nel provino e solidificare. Si è notato come, una volta che la potenza è scesa a zero, si debba aspettare che l'alluminio smetta di ribollire all'interno dello stampo prima di aprire il circuito perché in tal modo si causerebbe la fuoriuscita a schizzo dell'alluminio dal contenitore cilindrico. Poi si riporta la camera in pressione e si estrae il provino.

Il procedimento in caso si voglia fondere l'alluminio non in vuoto semplice, ma in vuoto con cicli di pulitura, non si discosta molto dal precedente: raggiunto un livello di pressione ragionevolmente basso (circa $2 \cdot 10^{-1}$ mbar) si immette argon nella camera facendo aumentare la pressione e poi si aspetta che la pompa riporti la camera al suo stato di minima pressione; questo procedimento è ripetuto quattro o anche cinque volte e serve

principalmente a pulire la camera dall'aria; in tal modo ci si aspetta che l'alluminio fuso abbia una pellicola di ossido molto meno spessa e resistente e permetta un miglior degasaggio del materiale. Dopo qualche ciclo di pulitura si può anche chiudere la pompa e mantenere la camera in atmosfera ricca di argon, sempre allo scopo di ridurre la reazione chimica dell'alluminio con l'aria che porterebbe alla formazione della pellicola di ossido.

La rilevazione dei dati avviene per mezzo dello schermo dell'alimentatore, il quale fornisce una lettura del valore di potenza, frequenza e tensione dell'induttore; quest'ultima, in realtà, è letta sull'oscilloscopio perché il valore è più preciso: viene misurata ai capi dell'induttore e non è direttamente collegata all'oscilloscopio ma, prima di esso, il collegamento va ad una sonda differenziale di tensione e infine all'oscilloscopio. Quest'ultimo fornisce anche una lettura della tensione sulla sonda rogowski, la quale permette di calcolare la corrente del sistema: $I = \frac{V_{rog}}{(k \cdot f)}$, dove k è il fattore della sonda rogowski e vale $2,3 \cdot 10^{-6}$.

5.2 Analisi dei campioni

Uno dei due metodi di analisi utilizzati è l'osservazione della microstruttura al microscopio. Dopo una prima analisi, tale metodo non è più stato applicato in quanto i campioni avrebbero presentato una struttura pressoché uguale.

Dopo aver tagliato due sezioni di materiale dal provino cilindrico, queste vengono inglobate nella resina, la quale è di poliestere con aggiunta di un catalizzatore e, a scelta, anche pomice per analizzare meglio i bordi del pezzo.



Una volta solidificata la resina bisogna rimuoverne lo strato che ricopre il campione di alluminio e per farlo si usa una carta abrasiva a grana grossa (180).

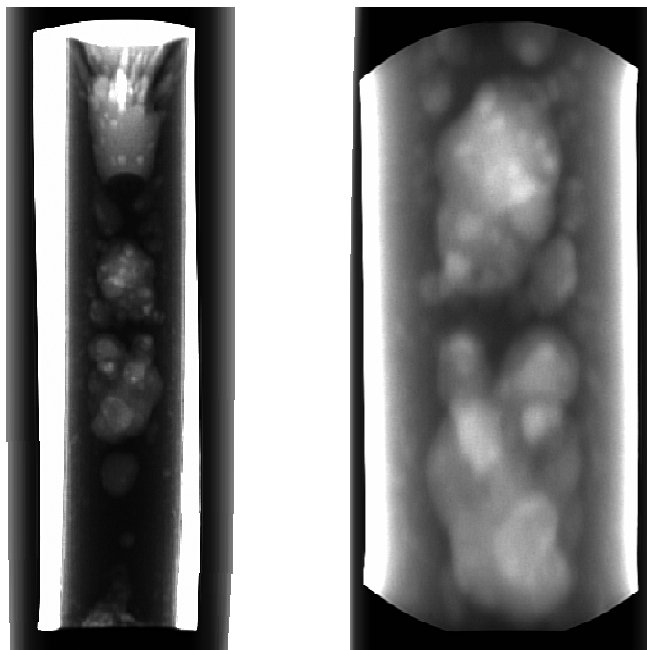
Il passo successivo è la pulitura: si effettua in quattro fasi, ognuna delle quali prevede l'uso di una carta con grana sempre più fina: 600, 1200 e infine 2400. Ogni passaggio serve ad eliminare i difetti di lavorazione della carta precedente fino ad ottenere una superficie abbastanza lucida.

Ultimo passaggio della preparazione è la finitura: effettuata con panni prima da $6\mu\text{m}$ e poi da $3\mu\text{m}$ con pasta diamantata, al fine di ottenere una superficie a specchio per un'analisi ottimale al microscopio.

Le prime analisi effettuate sui campioni hanno evidenziato la presenza di impurità inglobate nell'alluminio dovute probabilmente al processo di calcinazione a cui sono stati sottoposti i provini ceramici.

Un altro metodo di analisi dei campioni è ai raggi X; questo metodo è molto più veloce del precedente ma serve solo per controllare la presenza di porosità più o meno diffuse.

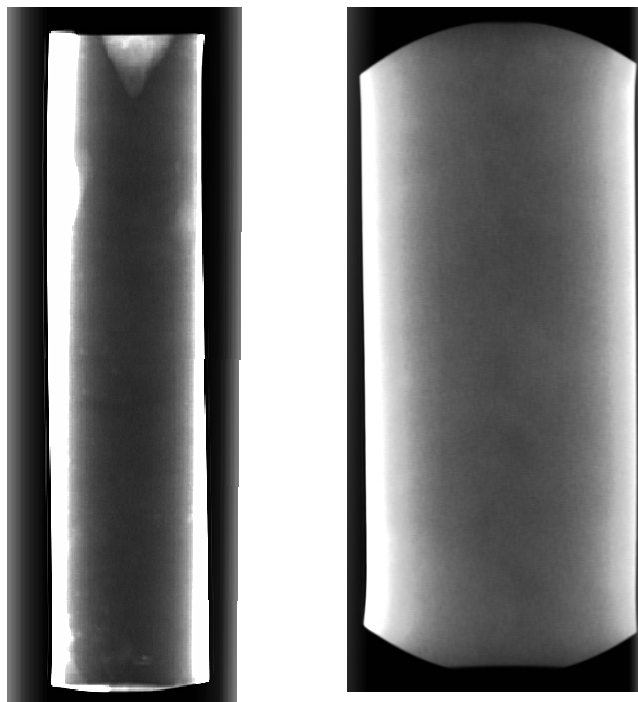
Campione 1:



Come si vede dalle immagini ai raggi X, il campione presenta numerose porosità al suo interno, oltre ad un ritiro sulla parte alta. La seconda immagine è un ingrandimento della parte centrale del provino e, vicino alle porosità più grandi, se ne possono vedere molte di più piccole.

Questa prova era stata condotta in vuoto, con una pressione di 1,6 mbar. Il metallo è stato mantenuto in levitazione per circa venti minuti dopodiché è stato colato nel provino ceramico.

Campione 2:



Il campione 2, escludendo il ritiro sulla testa, sembra presentarsi molto più uniforme ma osservando attentamente si possono notare alcune porosità sul fondo e vicino ai bordi.

Questa prova è stata condotta a pressione atmosferica ma con la camera per il vuoto chiusa.

CAPITOLO 6

Misure

Tutte le prove sono state effettuate con una particolare configurazione del sistema riportata nella seguente tabella:

Tabella 1

<i>Numero spire</i>	12	<i>Spire inverse</i>	2
<i>Alluminio</i>	SI	<i>Sezione spire</i>	10mm
<i>Configurazione induttanza</i>	0-4/4-0	<i>Induttanza</i>	3.23E-05
<i>Config. secondario trasformatore</i>	serie (1:1)	<i>Scheda</i>	D25.07
<i>Configurazione condensatori</i>	2x8.5 1x3 μ F	<i>Capacità</i>	0.00002 F
<i>Portata liquido di raffreddamento</i>	16.5 l/min	<i>Vuoto</i>	SI

Alcune prove di controllo, invece, sono state condotte senza alluminio da fondere oppure in atmosfera e la tabella di riferimento è:

Tabella 2

<i>Numero spire</i>	12	<i>Spire inverse</i>	2
<i>Alluminio</i>	NO	<i>Sezione spire</i>	10mm
<i>Configurazione induttanza</i>	0-4/4-0	<i>Induttanza</i>	3.23E-05
<i>Config. secondario trasformatore</i>	serie (1:1)	<i>Scheda</i>	D25.07
<i>Configurazione condensatori</i>	2x8.5 1x3 μ F	<i>Capacità</i>	0.00002 F
<i>Portata liquido di raffreddamento</i>	16.5 l/min	<i>Vuoto</i>	NO

A seguire sono riportate tutte le misure delle prove con una breve descrizione e una conclusione sintetica di ogni serie di prove.

Prove del 31/03/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	15	17560	167,5	15,7	388,73	57,00	Prova effettuata in 8 minuti, colando il fuso in maniera istantanea
2	20	17636	194,5	18,01	444,00	66,00	Prova effettuata in 8 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar, colando il fuso in maniera istantanea
3	20	17823	194,9	18,38	448,37	65,00	Prova effettuata in 8 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar, colando il fuso in maniera istantanea
4	20	17810	195,8	18,43	449,92	65,00	Prova effettuata in 8 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar, colando il fuso in maniera istantanea
5	20	17820	195,6	18,42	449,42	65,00	Prova effettuata in 5.30 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar, colando il fuso in maniera istantanea
6	20	17796	195,5	18,36	448,56	62,50	Prova effettuata in 5.30 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar, colando il fuso in maniera ritardata
7	20	17796	195,5	18,36	448,56	66,00	Prova effettuata in 4 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar a 20kW, colando il fuso dopo 4 min passando da 10 a 3kW in maniera ritardata

Conclusioni:

Dalle prove effettuate si notano dei problemi di degasaggio nell'istante in cui il fuso cola all'interno dello stampo. Questo causa un ribollimento dell'alluminio che crea dei difetti visibili a occhio nudo. Inoltre questo fenomeno è visibile sul vacuometro, il quale passa da una pressione di 1.6 mbar a una di 2.3 mbar.

Colare il fuso in maniera istantanea (spegnendo l'alimentatore) causa un

contraccolpo che fa schizzare alluminio sul crogiolo. Tale fenomeno non succede colando in modo ritardato (abbassando la potenza tramite il potenziometro).

Prove del 1/04/2010 - Tabella 1 e 2

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	10	17261	130,4	11,97	301,51		Prove preliminari
2	5	17040	86,6	8,02	204,63		
3	20	17492	191,1	17,38	432,00		
4	20	17769	193,3	18,14	443,86	61,00	Prova effettuata in 5,30 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar, colando il fuso in maniera istantanea nel crogiolo in gesso
5	20	17769	193,3	18,14	443,86	63,00	Prova effettuata in 5.30 minuti in vuoto alla pressione di 1.6mbar, colando il fuso in maniera istantanea nel crogiolo in ferro

Conclusioni:

Dalle prove effettuate si nota che le imperfezioni rilevate nell'alluminio sono causate dal crogiolo in gesso. Colando il fuso su uno stampo metallico (prova 5) l'inconveniente del degasaggio e ribollimento del fuso non risulta.

Prove del 14/04/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	20,7	17714	194,7	18,21	446,96	64,00	Prova effettuata in vuoto alla pressione di 1.6 mbar in 6 minuti, colando il fuso in maniera istantanea nello stampo ceramico con basamento in refrattario

Conclusioni:

Dalle prove effettuate con lo stampo in ceramica e basamento in refrattario (per recupero del fuso), si sono notati gli stessi problemi di degasaggio visti nelle precedenti prove. Inoltre la possibile presenza di umidità all'interno del basamento, ha causato una violenta espulsione del fuso imbrattando l'intera camera di alluminio.

La successiva prova, effettuata con il solo tubo ceramico, non ha dimostrato problemi.

Prove del 12/05/2010 - Tabella 2

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	10	17364	131,9	12,4	310,49		Prova effettuata con camera a vuoto
2	20	17586	193	17,88	442,05		Prova effettuata con camera a vuoto
3	20	17580	193	17,88	442,20		Prova effettuata con camera a vuoto senza
4	20,1	17505	193	17,71	439,87		Prova effettuata senza camera a vuoto
5	10,3	17260	131,4	12,22	307,82		Prova effettuata senza camera a vuoto

Conclusioni:

Le prove sono state condotte per verificare se e come la camera da vuoto influisse sul campo magnetico ma, come si può notare confrontando i dati delle altre tabelle, non ci sono differenze significative.

Prove del 21/05/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	20,1	17825	194,4	18,31	446,61	81,00	Prova effettuata a 1.7 mbar che dopo la colata sale a 2.1 mbar. La colata viene effettuata in modo istantaneo, ciò genera un colpo di ariete che schizza alluminio fuori dallo stampo e dal crogiolo
2	20,2	7812	194,4	18,27	445,96	79,58	Prova effettuata a 1.7 mbar che dopo la colata sale a 2 mbar. La colata viene effettuata in modo ritardato agendo sul regolatore di potenza.

Conclusioni:

Sebbene le colate siano state effettuate in modo diverso, sono presenti delle analogie. I provini presentano delle imperfezioni già viste in precedenza, dovute probabilmente a problemi di degasaggio degli stampi.

In una fase successiva si pensa di sottoporre gli stampi ad un ciclo termico per eliminare eventuali impurità e seccarli completamente così da evitare eventuali esplosioni dovute all'evaporazione immediata dell'umidità residua negli stampi.

Prove del 31/05/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	20,1	17825	194,4	18,31	448,67	79,40	Prova effettuata a 1.7 mbar; per 7 min a 20kW e per i successivi 8 min a 15 kW. La colata viene effettuata in modo istantaneo; ciò genera un colpo di ariete che schizza alluminio fuori dallo stampo e dal crogiolo.
2	20,1	17825	194,4	18,31	448,67	79,50	Prova effettuata a 1.7 mbar, per 7 min a 20kW e per i successivi 8 min a 15 kW. . La colata viene effettuata in modo ritardato e ciò non genera il colpo di ariete.

Conclusioni:

Dalle prove effettuate si è constatato che colando il materiale in modo istantaneo (togliendo bruscamente la tensione) si genera un colpo di ariete che fa schizzare alluminio fuori dallo stampo e dal crogiolo. Ciò non succede colando il materiale in modo ritardato, cioè abbassando lentamente la potenza fino a portarla a valore nullo (operazione fatta in un paio di secondi).

I problemi di degasaggio sono tuttora presenti.

Prove del 31/05/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	20	17812	195,7	18,46	450,60	79,40	Prova effettuata a 1.7 mbar; per 7 min a 20kW e per i successivi 8 min a 15 kW. La colata viene effettuata in modo istantaneo, ciò genera un colpo di ariete che schizza alluminio fuori dallo stampo e dal crogiolo.
2	20,5	17812	195,4	18,3	446,69	79,50	Prova effettuata a 1.7 mbar; per 7 min a 20kW e per i successivi 8 min a 15 kW. La colata viene effettuata in modo ritardato e ciò non genera alcun colpo di ariete.
3	20,8	17744	193,22	17,9	438,61	76,95	Prova effettuata a 100 mbar circa; per 7 min a 20kW e per i successivi 8 min a 15 kW. La colata viene effettuata in modo ritardato e ciò non genera un colpo di ariete.
4	20,7	17791	196,3	18,38	449,18	79,80	Prova effettuata a 100 mbar circa; per 7 min a 12kW e per i successivi 8 min a 20 kW. La colata viene effettuata in modo ritardato e ciò non genera un colpo di ariete.

Conclusioni:

Anche se in condizioni leggermente diverse, l'alluminio è stato colato in uno stampo metallico di raggio superiore a quello ceramico utilizzato nelle prove precedenti.

Sono comunque presenti porosità dovute al degasaggio del materiale durante la fusione.

Prove del 15/06/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	20,7	17791	196,3	18,38	449,18	77,00	Prova effettuata a 1.7 mbar, a 20kW con alluminio AISi 12
2	25,5	17823	215,75	20	487,89	80,90	Prova effettuata a 1.7 mbar, a 25kW con alluminio AISi 12
3	30	17935	236,7	21,67	525,33	81,30	Prova effettuata a 1.7 mbar, a 30kW con alluminio AISi 12

Conclusioni:

Le prove effettuate con lega AISi 12 non presentano le imperfezioni visibili sui provini di alluminio puro, ma, contrariamente alle altre prove, anche a potenza di 30 kW il materiale tende a colare.

La procedura di colata ottimale risulta essere quella ritardata (cioè togliendo la tensione in modo non istantaneo) e mantenendo acceso l'alimentatore fino a solidificazione del materiale. Sebbene a colata conclusa, se il materiale si trova ancora allo stato liquido, lo spegnimento dell'alimentatore causa comunque il colpo di ariete.

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	20	17752	194,7	18,21	446,00	79,90	Prova effettuata a 1.7 mbar, a 20kW per 45 min

Conclusioni

Sebbene la prova sia stata effettuata con alluminio puro per un tempo pari

a 45 minuti, si è notato che il degasamento del materiale non avviene. Nonostante il campione all'esterno sembri migliore dei successivi, l'analisi effettuata ai raggi X denota molte porosità al suo interno.

L'eccessivo irraggiamento generato dalla prova prolungata ha inoltre causato la deformazione della finestra posta sul coperchio sommitale, la quale dovrà essere sostituita con una in vetro pirex.

Prove del 21/06/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	<i>[kW]</i>	<i>[Hz]</i>	<i>[V]</i>	<i>[V]</i>	<i>[A]</i>	<i>[g]</i>	
1	20	17750	198,5	18,46	452,17	70,00	Prova effettuata a 1.7 mbar; a 20kW per 20 min con materiale degasato in precedenza
2	20	17750	198,5	18,46	452,17	81,00	Prova effettuata a 1.7 mbar; a 20kW per 20 min con materiale degasato in precedenza
3	20	17750	198,5	18,46	452,17	81,40	Prova effettuata a 1.7 mbar; a 20kW per 20 min con materiale degasato in precedenza, attuando 5 cicli di pulizia camera con argon

Conclusioni:

L'alluminio è stato fuso prima delle prove e vi è stato soffiato argon all'interno in modo da far fuoriuscire l'idrogeno al suo interno. Tuttavia non si sono riscontrati miglioramenti, anzi, i risultati sembrano peggiori rispetto alle precedenti prove.

Quando il fuso viene a contatto con lo stampo si nota un forte gorgogliamento.

Prove del 10/12/2010 - Tabella 1

Per le prove a seguire, se non specificato diversamente, è stato utilizzato uno stampo di colata in acciaio con capacità doppia rispetto ai vecchi stampi in materiale ceramico.

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	10,3	17860	133	12,97	315,74	160,00	Prova effettuata a 0.28 mbar a 20kW per 20 min. Il fuso si presenta molto fluido ed instabile.
2	20,3	17922	189	17,92	434,73		

La colata avviene utilizzando 160g di alluminio (due blocchetti). La camera da vuoto è provvista di due nuovi passanti (elettrico ed idraulico) i quali permettono valori di vuoto più spinti (0.2 mbar) rispetto ai precedenti tentativi.

Conclusioni:

Il fuso si presenta molto fluido e la pellicola di ossido si rompe e si riforma in continuazione. Ciò avviene probabilmente grazie alla continua rotazione del materiale sull'asse verticale. Dopo circa 20 min alla potenza di 20kW il fuso diventa instabile e viene proiettato tutto verso l'esterno.

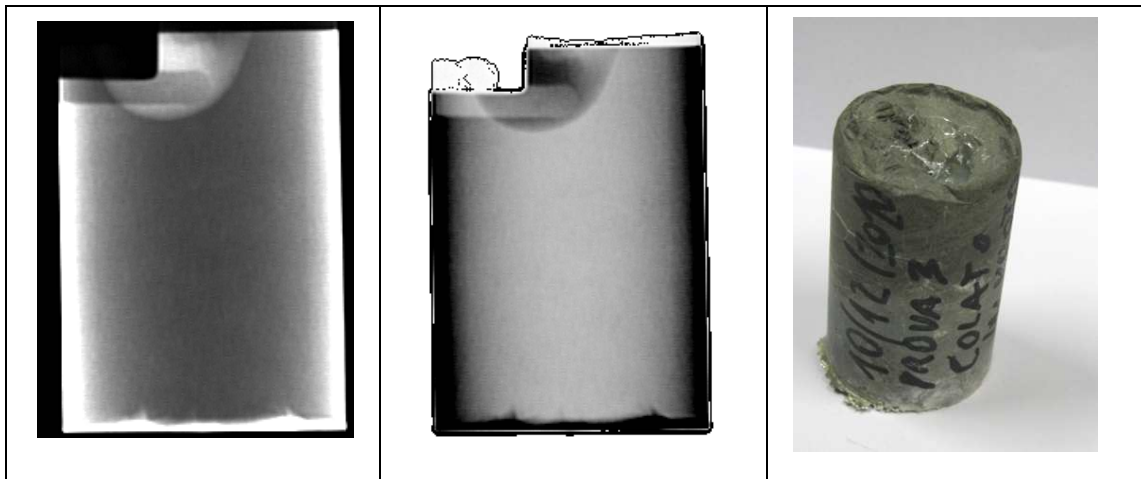
Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	13,4	17967	149,6	14,64	354,27	160,00	Prova effettuata in 15 min alla pressione media di 0.3 m bar
2	15,1	17960	158,9	15,44	373,78		

Conclusioni:

Il fuso si presenta molto fluido e la pellicola di ossido si rompe e si riforma in continuazione. L'instabilità non è però tale da proiettare l'alluminio all'esterno come accaduto nella prova precedente.

La pressione è costante a 0.33 mbar fino a 15kW poi cala a 0.19 mbar.

Foto del campione e analisi ai raggi X:



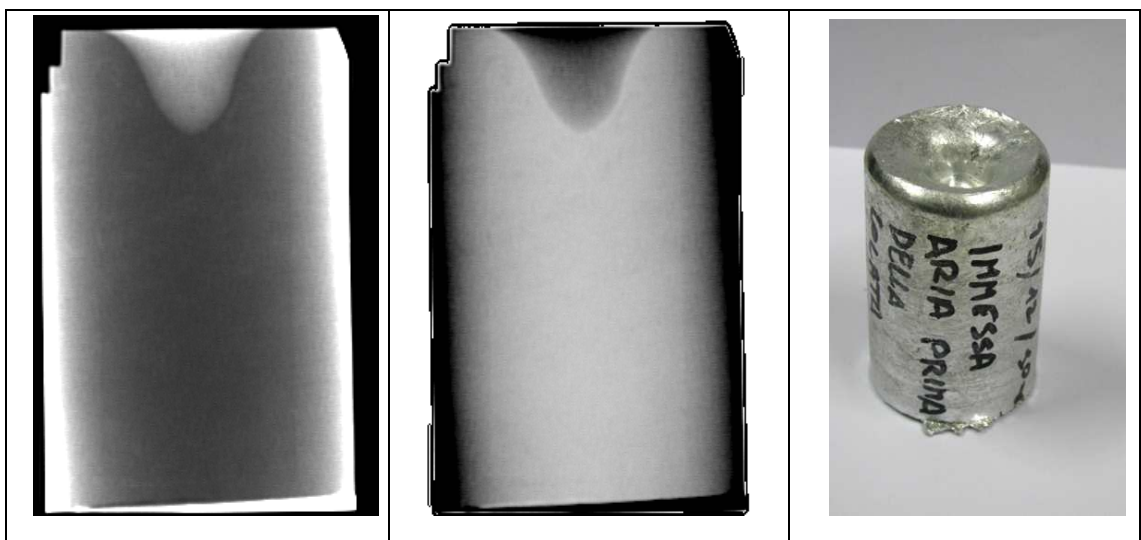
Prove del 15/12/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	10,1	17718	132,3	12,8	314,10	160,00	Prova effettuata in 20min alla pressione media di 0.3mbar immettendo aria prima di colare
2	15	17836	167	15,89	387,35		

Conclusioni:

Prova effettuata in 20min alla pressione media di 0.3 mbar immettendo aria prima di colare, la superficie del materiale risulta più lucida.

Foto del campione e analisi ai raggi X:



Prove del 20/12/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	10,1	17755	132,5	12,9	315,89	160,00	Prova effettuata in 20min alla pressione media di 0.3mbar con vari cicli di lavaggio con argon
2	15	17877	164,59	16	389,13		

Conclusioni:

In questa prova, dopo aver raggiunto la pressione di $2.4 \cdot 10^{-1}$ mbar, si sono fatti alcuni lavaggi con argon seguiti da pompaggi. Poi la potenza di riscaldamento/levitazione è stata aumentata fino a circa 15kW, e si è fuso il materiale dopo averlo mantenuto in fusione e levitazione per circa 20 min.

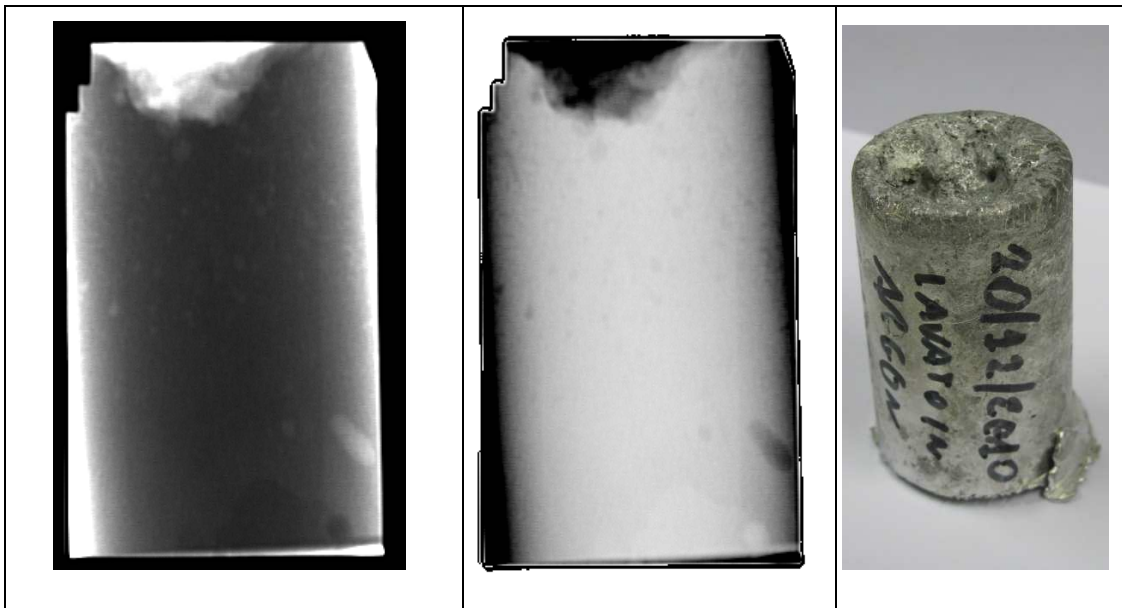
L'alluminio fuso si presentava molto fluido e la pellicola di ossido era piuttosto sottile e flessibile. La differenza di "mobilità" rispetto alle precedenti prove in aria e in vuoto a 1.5 mbar era evidente.

Tuttavia non si sono riprodotte esattamente le condizioni della prova a $2.4 \cdot 10^{-1}$ mbar e 20 kW effettuata il 10/12/2010, in cui temperatura era più alta e la pellicola attorno alla massa fusa era così sottile da strapparsi e chiudersi continuamente, rendendo evidenti i moti vorticosi all'interno del metallo fuso.

Durante la prova del 10/12/2010, alla potenza di 20 kW si era avuta un'improvvisa oscillazione crescente della massa fusa, che era rapidamente schizzata fuori dal crogiolo fino a colpire le finestre della camera da vuoto. Forse si trattava di un'instabilità magneto-idro-dinamica scatenata dallo strappamento della pellicola di ossido.

Temendo che si verificasse nuovamente tale instabilità, la potenza è stata mantenuta più bassa e si è colato l'alluminio nello stampo mantenendo il vuoto (circa $2.0 \cdot 10^{-1}$ mbar). Il materiale solidificato però presenta ancora ampie "soffiature" e la superficie risultava di colore grigio opaco piuttosto scuro (contrariamente alle colate in aria, che danno sempre un colore argento lucido).

Foto del campione e analisi ai raggi X:



Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	10	17694	132,2	12,61	309,86	160,00	Prova effettuata in 20min alla pressione media di 0.3mbar con vari cicli di lavaggio con argon
2	15	17923	166,8	16,25	394,20		

Conclusioni:

In questa prova si è ripetuto il procedimento della prova del 20/12/2010, con stampo in acciaio, ma questa volta si è spenta la pompa da vuoto e dato un flussaggio di argon varie volte prima della colata. Il materiale solidificato si presentava simile al precedente, le soffiature sono ancora presenti e la superficie del materiale solidificato era ancora grigia, anche se forse un po' meno scura ed opaca.

Si ritiene che ci siano 2 questioni da capire:

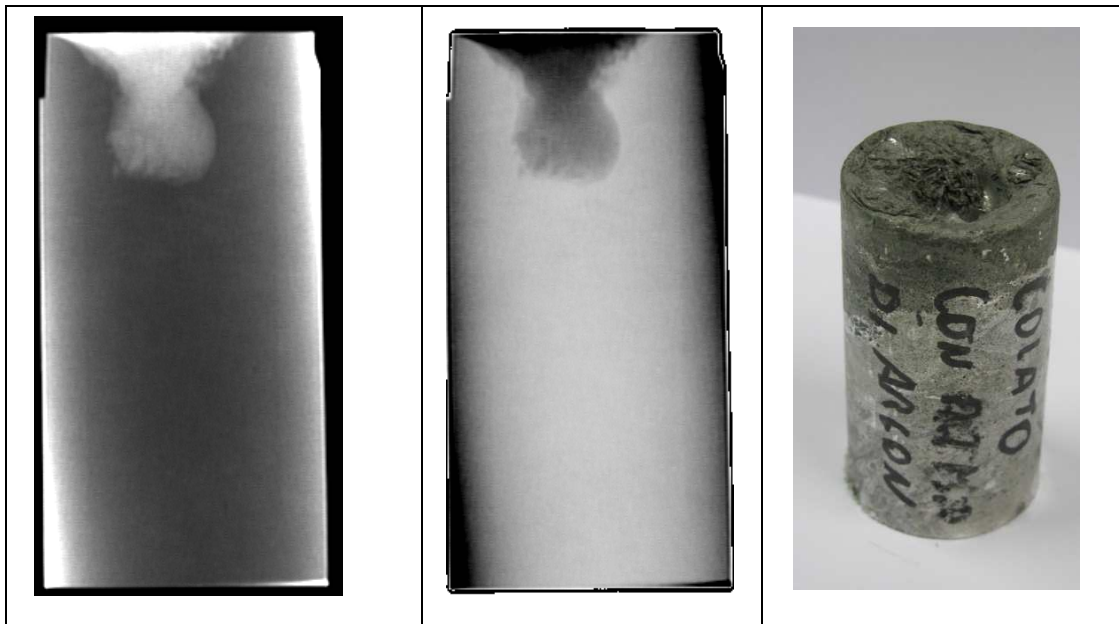
L'origine delle soffiature che si trovano nel materiale solidificato, soprattutto quando questo e' stato colato in vuoto.

Dopo aver provato lo stampo di acciaio, si può escludere che siano dovute allo stampo (anche se lo stampo di ceramica porosa può contribuire).

L'origine dello strato opaco sul materiale solidificato, che è più spesso, ruvido e scuro quando la fusione avviene in vuoto.

- i vapori di alluminio potrebbero essere relazionati anche all'annerimento riscontrato sulla faccia interna del crogiolo (dipinta con Nitruro di Boro) che si verifica sempre e solo nelle prove in vuoto.

Foto del campione e analisi ai raggi X:



Prove del 22/12/2010 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	10	17694	132,2	12,61	309,86	160,00	Prova effettuata in 20min alla pressione media di 0.3mbar con materiale rifuso
2	15	17923	166,8	16,25	394,20		

Conclusioni:

La prima prova in vuoto ($4 \cdot 10^{-1}$ mbar) e potenza limitata (10 kW) ha mostrato che il materiale già usato tende comunque a ribollire durante la discesa nello stampo e anche al momento in cui si spegne la corrente nell'induttore (forse il ribollimento è un po' più debole che con il materiale allo stato originale). Al termine della prova, si è ridotta la potenza fino a 2 kW e, mentre il materiale era ancora liquido nello stampo, si è spento l'alimentatore. Ciò ha causato una deformazione della superficie del

materiale solido e un piccolo schizzo di materiale fuso al di fuori dello stampo. Al momento dello spegnimento dell'alimentatore si genera una sovracorrente transitoria, la quale interagisce con il materiale ancora fuso, provocando una soffiatura sulla superficie superiore.

Il materiale solidificato si presentava sempre scuro e opaco.

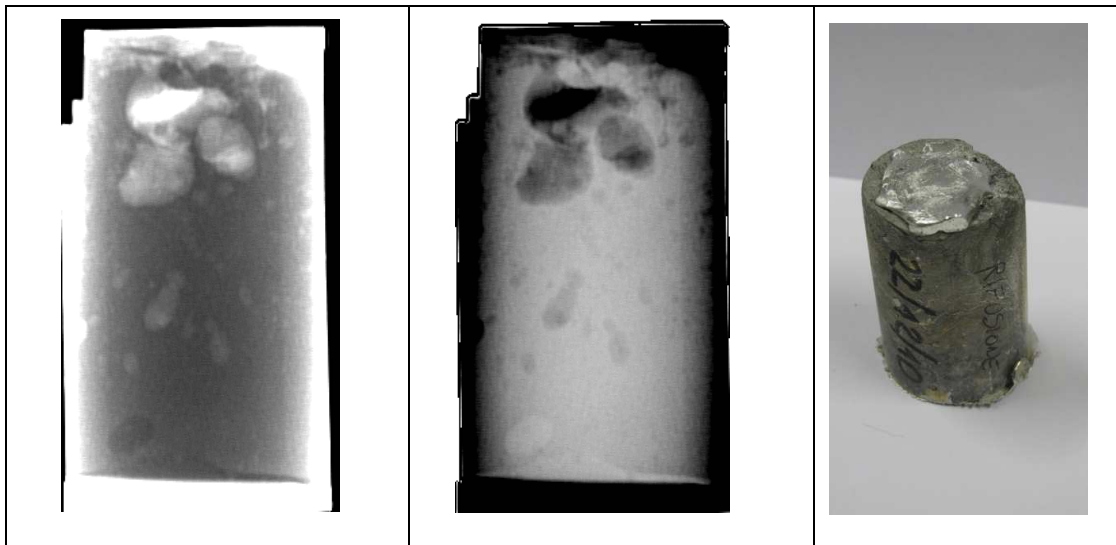
La seconda prova è stata identica alla prima, sempre in vuoto con il materiale della prima prova, salvo il fatto che si è aumentata la potenza fino a 20 kW per qualche minuto (e a 22 kW per pochi secondi).

Il materiale fuso è diventato molto caldo e fluido, assumendo una forma quasi sferica, palesemente diversa dalla forma a "lobi" o a "fiore" che si era vista di solito nelle prove precedenti. Dopo un po' il materiale ha iniziato a mostrare cicliche rotture della membrana di ossido causate da evidenti moti vorticosi, che davano luogo anche a oscillazioni di tutta la massa. Prima che l'ampiezza delle oscillazioni divenisse eccessiva, si è ridotta la potenza a 10 kW, apparentemente stabilizzando le oscillazioni, ma senza grandi riduzioni di temperatura. Tuttavia, dato che qualche goccia del materiale aveva cominciato a colare nello stampo, la potenza è stata ulteriormente ridotta in maniera graduale fino a 2.5 kW facendo scendere quasi completamente la massa fusa. Durante la discesa, si è verificata nuovamente un'instabilità simile a quella avvenuta in data 10/12/2010 (anche se meno violenta). Alcune gocce di alluminio sono schizzate nella camera da vuoto, stavolta senza causare danni. Questo fenomeno è sicuramente legato all'elevata temperatura della massa fusa.

Successivamente è stata fatta entrare aria nella camera, atteso che il poco materiale rimasto nel crogiolo si raffreddasse e infine si è spento completamente l'alimentatore.

Il materiale si è solidificato nello stampo sopra a quello sceso precedentemente, mettendo ancor meglio in evidenza la differenza tra la parte di colata effettuata in vuoto (di colore grigio scuro opaco) e quella effettuata in aria (di colore argento chiaro).

Foto del campione e analisi ai raggi X:



Prove del 17/01/2011 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	15,8	17915	168	16,68	404,81	160,00	Prova effettuata in 20min alla pressione media di 0.3mbar
2	10	18024	119,7	12,53	302,25		

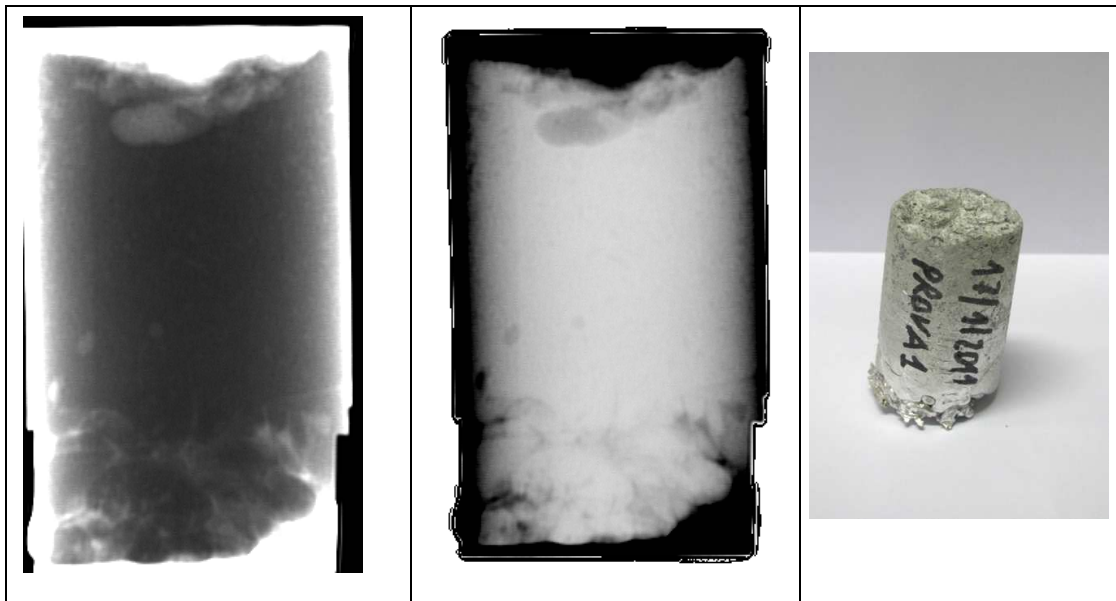
Conclusioni:

Nella prima prova, dopo aver raggiunto il vuoto, si sono eseguiti tre lavaggi di Argon seguiti da pompaggio a $2.3 \cdot 10^{-1}$ mbar, prima della fusione.

Poi si è iniziato a riscaldare il materiale e registrando la temperatura della massa metallica con una termocoppia. La fusione è avvenuta ad una temperatura di circa 650 °C. Durante la fase di fusione era visibile un evidente plateau nell'andamento della temperatura. Applicando una potenza di 15-17 kW, la massa fusa ha raggiunto e superato i 1000 °C e non si sono avute manifestazioni di instabilità. Riducendo poi la potenza fino a 10 kW, la temperatura è stata riportata a circa 750 °C. Diminuendo ancora la potenza, alcune gocce di metallo fuso iniziavano a colare nello stampo.

La colata e' stata effettuata in vuoto ($2.3 \cdot 10^{-1}$ mbar) e la massa solidificata presenta diverse soffiature.

Foto del campione e analisi ai raggi X:



Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	15	17833	165,3	16,1	392,53	160,00	Prova effettuata in 10min alla pressione media di 0.3mbar

Conclusioni:

In questa seconda prova i lavaggi di Argon sono stati effettuati prima e durante la fusione, la quale è avvenuta quando la termocoppia indicava una temperatura di circa 560 °C. Successivamente la potenza è stata aumentata fino a 20 kW (per qualche secondo) e la temperatura indicata ha raggiunto i 900 °C. Questa volta la massa fusa ha iniziato ad essere più fluida e mobile e la pellicola di ossido ha iniziato a rompersi, ma non si sono avute instabilità.

Non si è insistito con l'applicazione dei 20 kW, ma piuttosto la potenza è stata subito ridotta a 15 kW. Si è poi colato il materiale nello stampo mantenendo un flusso continuo di argon con la pompa da vuoto spenta, raggiungendo una pressione di circa 1 atm (assoluta); il sensore di pressione però non è affidabile in atmosfera di argon poiché indicava circa 8mbar). Dopo aver aperto la camera si è potuto constatare che la guaina di

Inconel della termocoppia era distrutta nella parte terminale. E' possibile che la guaina si fosse già danneggiata durante la prima prova e che per questo le temperature indicate durante la seconda prova fossero affette da errore in difetto.

Questa volta la prova è durata meno tempo della precedente e il materiale solidificato non presenta soffiature, ma solo una grossa cavità da ritiro.

Prove del 24/01/2011 - Tabella 1

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
1	15	17792	163,2	15,84	387,08	108,00	

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
2	15	17795	165,7	15,83	386,77	109,00	

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
3	15	17794	164	15,84	387,04	97,60	

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
4	15	17817	166,7	19,96	413,87	123,00	

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
5	15	17815	165,7	16	390,49	109,00	

Misure	Potenza	Frequenza	Tensione Induttore	Tensione Rogowski	Corrente Induttore	Peso Alluminio	Descrizione
<i>n</i>	[kW]	[Hz]	[V]	[V]	[A]	[g]	
6	15	17854	164,9	15,92	387,69	102,00	

Conclusioni:

Le prove hanno mostrato che la temperatura di fusione dell'alluminio non sembra dipendere dalla pressione residua del gas nella camera.

Le misure indicano che il plateau nell'andamento della temperatura si verifica tra i 645 e i 660 °C (valore medio 652 °C). E' possibile che la termocoppia o il sistema di acquisizione siano leggermente starati di qualche grado °C in valore assoluto, (la temperatura di fusione dovrebbe essere 660 °C) ma comunque si tratta di un risultato ben ripetibile e il confronto tra i valori misurati nelle prove è certamente significativo.

Nelle stesse prove si è constatato che la quantità di gas disciolto (e le porosità della colata) sembrano dipendere della temperatura a cui viene portata la massa fusa. Mantenendo la temperatura abbastanza bassa, (sotto i 750 °C circa), e per un periodo di tempo inferiore a 20 min, il gas nella colata sembra nettamente ridotto.

n. prova	Peso [g]	Descrizione
Prova 1	108,00	Fuso a 0,34 mbar. La termocoppia non è rimasta a contatto col materiale.
Prova 2	109,00	Fuso a 0,3 mbar. La termocoppia è stata posizionata all'interno di un foro praticato sul materiale ma durante la fusione si è staccata.
Prova 3	97,60	Fuso a 2,8 mbar. La termocoppia è stata posizionata all'interno di un foro praticato sul materiale ed è rimasta all'interno della massa fusa per tutta la durata della fusione.
Prova 4	123,00	Fuso alla pressione atmosferica. I movimenti levitativi hanno portato la termocoppia nella parte alta del crogiolo dove il campo magnetico è più debole.
Prova 5	109,00	Fuso alla pressione atmosferica. La termocoppia è stata posizionata all'interno di un foro praticato sul materiale.
Prova 6	102,00	Fuso alla pressione atmosferica. La termocoppia è stata posizionata all'interno di un foro praticato sul materiale.

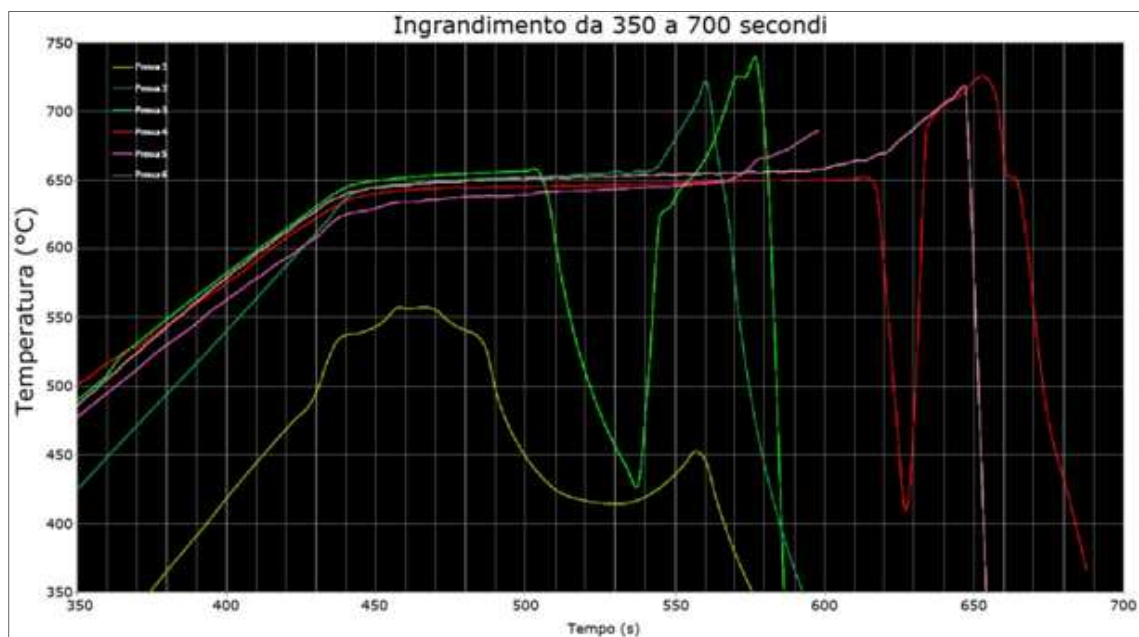
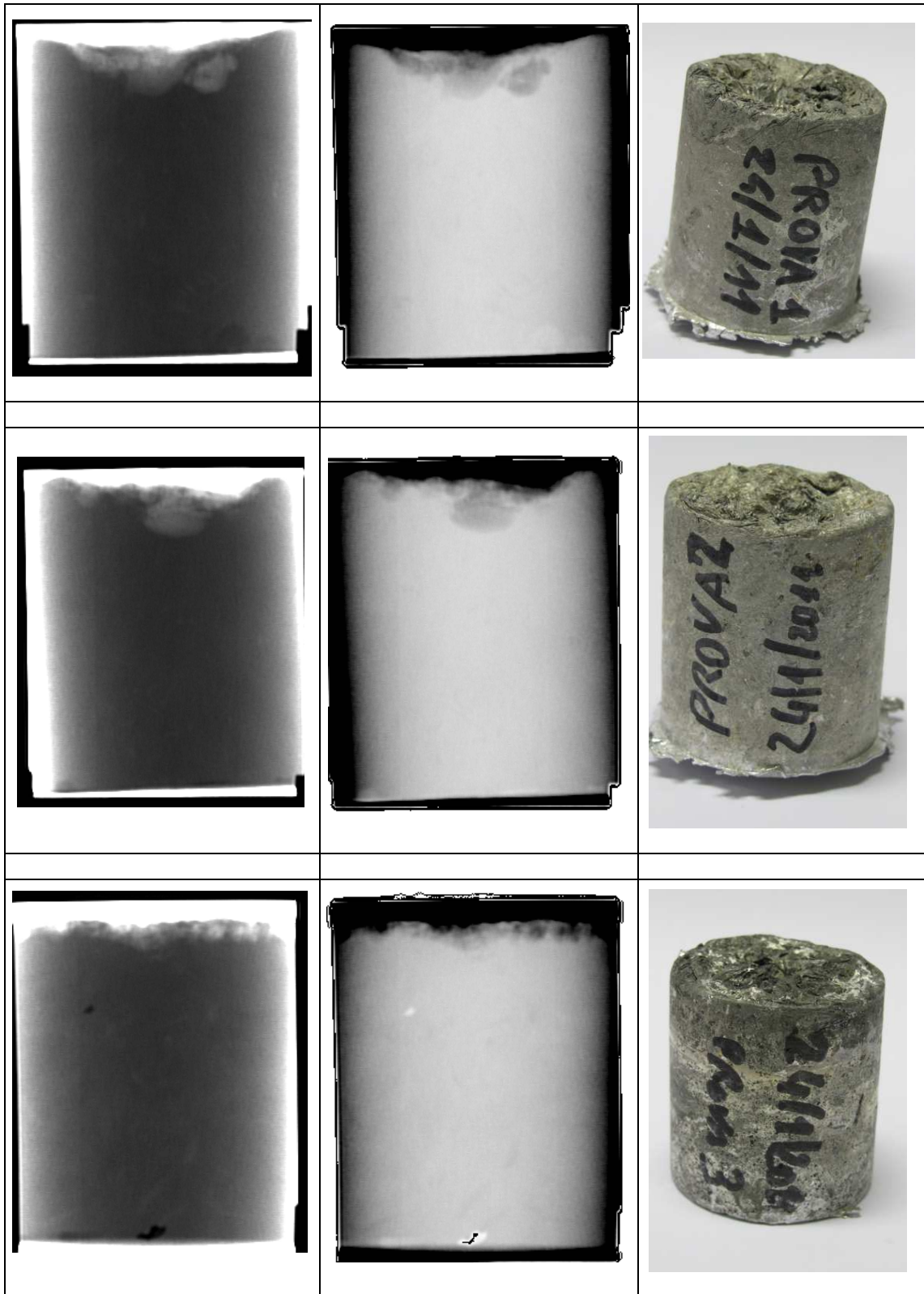
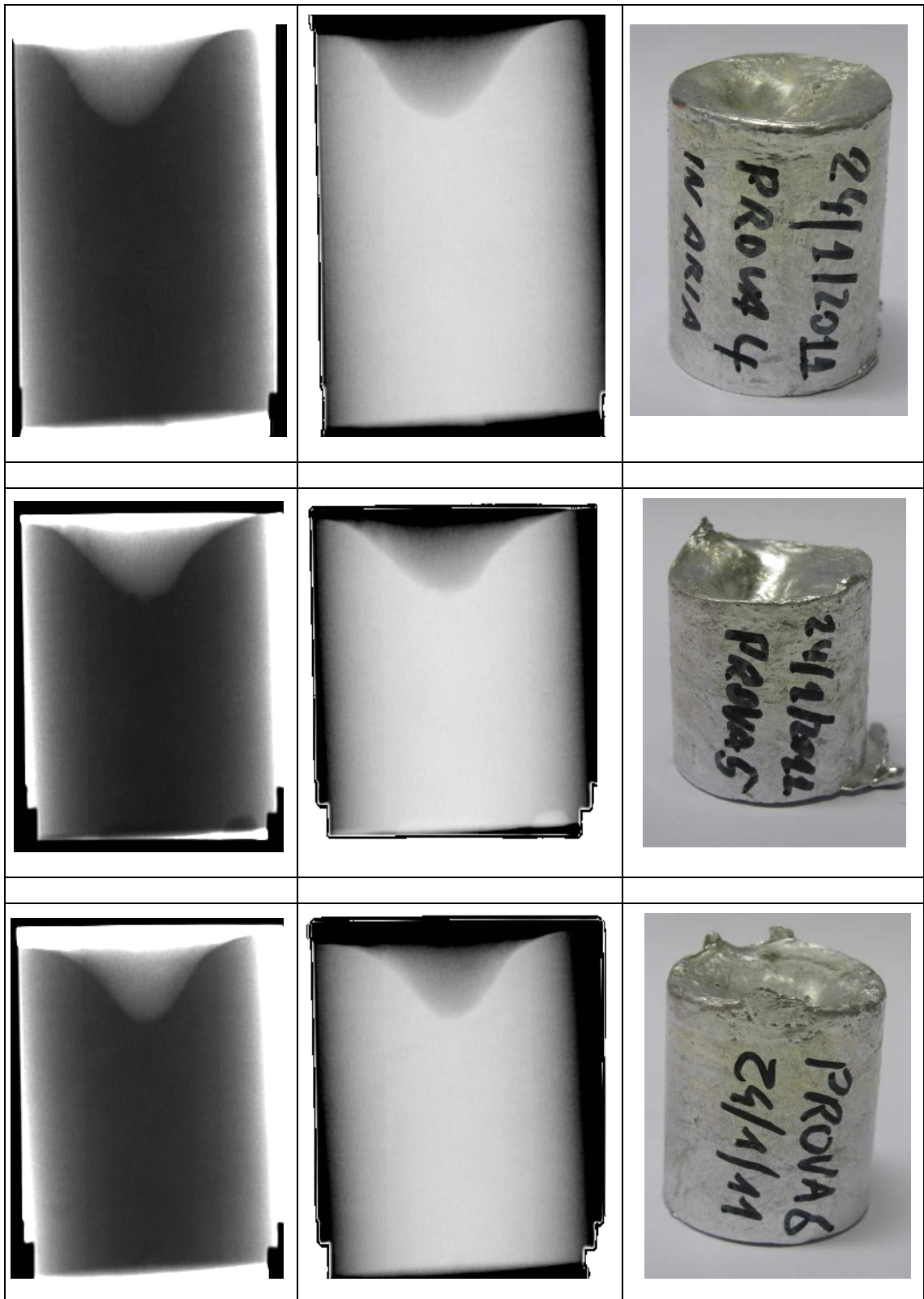


Foto dei campioni e analisi ai raggi X:

Prove in vuoto



Prove a pressione atmosferica



Conclusioni

Inizialmente, lo scopo degli esperimenti è stato quello di analizzare in maniera generale il comportamento dell'alluminio e dell'intero sistema durante il processo di fusione e solidificazione.

Successivamente le prove sono state condotte più metodicamente: prima riproducendo le stesse condizioni di alimentazione nei tre casi di pressione atmosferica, atmosfera controllata e vuoto, per analizzare le differenze sui campioni ottenuti, poi ci si è concentrati sull'ottenimento di campioni di buona qualità con minima percentuale di porosità. Arrivare a ciò non è stato facile perché erano molte le variabili che potevano compromettere l'ottenimento di un campione di qualità accettabile e, prova dopo prova, si sono evidenziati alcuni aspetti fondamentali per la buona riuscita dell'esperimento.

Il primo che è stato individuato è lo spegnimento ritardato dell'alimentatore per permettere all'alluminio di solidificare abbastanza da non farlo schizzare fuori dallo stampo. Si è visto come, in generale, si siano ottenuti risultati migliori con gli stampi in acciaio piuttosto che quelli ceramici; questi ultimi tendono a trattenere dell'umidità residua che, al contatto con l'alluminio fuso, lo fa gorgogliare e talvolta fuoriuscire dallo stampo.

Tuttavia, i fattori decisivi per ottenere dei buoni campioni sono, secondo gli esperimenti effettuati, la temperatura raggiunta dall'alluminio e, anche se meno rilevante rispetto a quest'ultima, il tempo di permanenza a tale temperatura.

Si noti come nel caso di un valore di temperatura non molto superiore a quella di fusione (con una durata totale di massimo 10 minuti) comporti la buona riuscita dell'esperimento. Questo perché la solubilità dell'idrogeno nell'alluminio è molto maggiore a temperature più elevate rispetto a quella di fusione e perciò, il breve mantenimento in fusione con una temperatura massima di 750°C, si è rivelato decisivo.

Per quanto riguarda il tempo di permanenza in fusione, secondo l'esperimento trattato nel riferimento bibliografico [6], dovrebbe essere superiore ai 10 minuti per poter ottenere un minor numero di porosità ma, in tale esperimento, la temperatura di mantenimento in fusione dell'alluminio era di 800°C.

Ciò evidenzia come la temperatura influisca in maniera più rilevante sulla buona riuscita dell'esperimento rispetto al tempo.

La conferma sono gli ultimi campioni ottenuti, i quali, sia in vuoto che in aria, dalle analisi ai raggi X presentano un ristretto numero di porosità o quasi nullo.

Ci sono comunque notevoli margini di miglioramento e aspetti da considerare in modo da trovare una relazione più precisa tra il numero di porosità, temperatura e tempo.

Bibliografia

- [1] "Alloying titanium and tantalum by cold crucible levitation melting (CCLM) furnace" Arimichi Morita, Hisao Fukui, Hideaki Tadano, Shizuo Hayashi, Jiro Hasegawa, Mitsuo Niinomi, articolo, 2000
- [2] "Melting and solidification of TiNi alloys by cold crucible levitation method and evaluation of their characteristics" K. Matsugi, H. Mamiya, Y.-B. Choi, G. Sasaki, O. Yanagisawa and H. Kuramoto, articolo, 2008
- [3] "Application of high magnetic fields in advanced materials processing" MA Yanwei, XIAO Liye & YAN Luguang, articolo, 2006
- [4] "Materials processing in magnetic levitation furnaces" Kohki Takahashi, Iwao Mogi, Tetsuya Onogi, Satoshi Awaji, Mitsuhiro Motokawa, Kazuo Watanabe, articolo, 2006
- [5] "A feasibility study of the partial squeeze and vacuum die casting process" E.S. Kima, K.H. Leeb, Y.H. Moon, articolo, 1999
- [6] "The behaviour of double oxide film defects in liquid Al alloys under atmospheric and reduced pressures" R. Raiszadeh, W.D. Griffiths, articolo, 2009
- [7] "Control of solidified structures in aluminum-silicon alloys by high magnetic fields" Qiang Wang, Chun-jiang Wang, Tie Liu, Kai Wang, Ji-cheng He, articolo, 2007
- [8] "Undercooling and solidification of Al-50Si alloy by electromagnetic levitation" R.P. Liu, D.M. Herlach, M. Vandyoussefi, A.L. Greer, articolo, 2004