



**Università degli Studi di Padova**

**Facoltà di Ingegneria**

**DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA GESTIONALE**

**TESI DI LAUREA**

**FUSIONE AD INDUZIONE E LEVITAZIONE  
MAGNETICA IN CROGIOLO FREDDO (CCLM)**

**Recenti sviluppi**

**Relatore: Ch.mo Prof. GIUSEPPE CHITARIN**

**Laureando: ROANA ANDREA**

**Anno Accademico 2010-2011**



# SOMMARIO

INTRODUZIONE .....	V
1. ELETTRIMAGNETISMO .....	- 1 -
1.1 CAMPO ELETTRICO.....	- 1 -
1.2 CAMPO MAGNETICO.....	- 1 -
1.3 FORZA ESERCITATA DA UN CAMPO MAGNETICO SU UN CIRCUITO PERCORSO DA CORRENTE .....	- 3 -
1.4 PROPRIETA' DEL CAMPO ELETTRIMAGNETICO – EQUAZIONI DI MAXWELL .....	- 4 -
1.5 LE CORRENTI DI FOUCAULT .....	- 6 -
2. BASI TEORICHE DI FUNZIONAMENTO DEL CROGIOLO FREDDO (CCLM) .....	- 7 -
2.1 DISTRIBUZIONE DELLE CORRENTI INDOTTE NELLA CARICA METALLICA.....	- 10 -
2.2 FENOMENI PROVOCATI DALLE CORRENTI INDOTTE .....	- 11 -
2.2.1 POTENZA TERMICA.....	- 11 -
2.2.2 FORZE ELETTRIMAGNETICHE .....	- 12 -
2.2.3 STIRRING ELETTRIMAGNETICO .....	- 13 -
2.2.4 LEVITAZIONE MAGNETICA .....	- 16 -
2.2.5 STABILIZZAZIONE.....	- 16 -
2.3 FORMA E CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL CROGIOLO .....	- 17 -
3. APPLICAZIONI SPERIMENTALI .....	- 21 -
3.1 FUSIONE E SOLIDIFICAZIONE IN LEVITAZIONE .....	- 21 -
3.2 VERIFICA DEL MODELLO ANALITICO DI UN CROGIOLO PER FUSIONE A GUSCIO IN SEMI-LEVITAZIONE (ISM) .....	- 22 -

3.3 SOLIDIFICAZIONE DIREZIONALE NEL CROGIOLO FREDDO.....	- 31 -
3.4 FUSIONE DI UNA LEGA DI TITANIO E TANTALIO .....	- 34 -
3.5 REALIZZAZIONE DI BARRE A FASE SINGOLA DI LAVES .....	- 38 -
4. SISTEMA CCLM DEL DTG .....	- 41 -
4.1 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO E DEI SUOI COMPONENTI .....	- 41 -
4.1.1 CROGIOLO .....	- 42 -
4.1.2 INDUTTORE ED ALIMENTATORE.....	- 45 -
4.1.3 CIRCUITO ELETTRICO .....	- 47 -
4.1.4 CIRCUITO IDRAULICO.....	- 49 -
4.1.5 CAMERA A VUOTO.....	- 50 -
4.1.6 STRUMENTI DI MISURA .....	- 51 -
4.2 PROVE DI LABORATORIO .....	- 52 -
4.2.1 MISURA DELLA TEMPERATURA DI FUSIONE AL VARIARE DELLA PRESSIONE.....	- 53 -
4.2.2 VARI PROCEDIMENTI DI FUSIONE E COLATA ESEGUITI .....	- 57 -
CONCLUSIONI .....	- 63 -
BIBLIOGRAFIA .....	- 65 -

# INTRODUZIONE

Lo sviluppo tecnologico è spesso caratterizzato dalla produzione di nuovi materiali con qualità sempre crescente e proprietà particolari.

In molti casi il processo di produzione è il fattore che determina il successo di un materiale sul mercato perché né influenza direttamente sia il prezzo sia la possibilità che un'azienda investa sulla produzione di tale materiale.

La semplificazione di un processo produttivo consente a chi produce di risparmiare tempo e denaro, e quindi di offrire una merce che abbia un costo inferiore. Se a ciò vi si aggiunge un miglioramento della qualità del materiale si otterrà un prodotto molto competitivo.

In questa tesi verrà presentata una tecnologia che è potenzialmente in grado di migliorare la qualità dei metalli prodotti, semplificarne la produzione riducendone così i costi; inoltre permette il trattamento di metalli che sono difficilmente realizzabili da altri sistemi.

Ciò di cui si parla è la fusione ad induzione e levitazione magnetica in crogiolo freddo.

Il lavoro svolto ha incluso sia una ricerca bibliografica sia una raccolta dati direttamente nel laboratorio del Dipartimento (DTG).

Dopo un breve riassunto delle leggi fisiche che governano i fenomeni elettromagnetici verranno presentate le caratteristiche principali del funzionamento di questo tipo di fusione; verranno analizzati i vantaggi, le problematiche e le soluzioni per migliorare la tecnica.

In seguito troverà spazio una descrizione degli esperimenti più recenti e significativi che si possono trovare attualmente nella letteratura internazionale.

Infine verranno proposti alcuni dei temi principali affrontati nell'attività di ricerca nel

Laboratorio di Elettrotecnica del DTG comprendendo la descrizione delle apparecchiature usate, i dati raccolti e l'analisi dei risultati ottenuti.

# Capitolo 1

## ELETTROMAGNETISMO

Nell'elettromagnetismo le due grandezze più importanti sono il *campo elettrico*  $\vec{E}$  e il *campo magnetico*  $\vec{B}$ , che sono dei campi vettoriali, cioè sono dei vettori  $\vec{v}(x, y, z, t)$  definiti in generale ad un certo istante  $t$  e in ogni punto dello spazio di coordinate  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

### 1.1 CAMPO ELETTRICO

In una distribuzione continua di carica con una densità di volume  $\rho$  ogni infinitesimo  $dV$  di volume porta una carica  $dQ = \rho dV$ . Il campo elettrico prodotto da tale distribuzione è dato da:

$$(1.1) \quad \vec{E} = \int_V \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\rho dV \vec{r}}{r^2 |\vec{r}|}$$

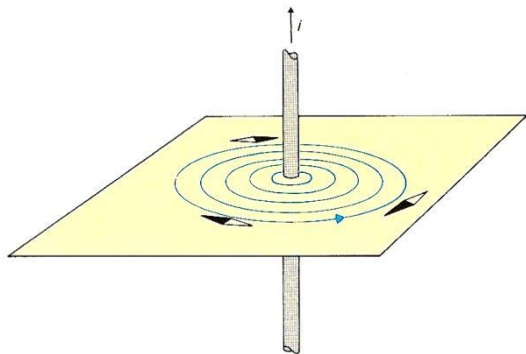
Per rappresentare il campo si utilizzano delle linee curve, che partono dalle cariche positive e finiscono sulle cariche negative, tali che il vettore campo elettrico sia sempre tangente a queste linee che vengono dette *linee di forza del campo elettrico*.

### 1.2 CAMPO MAGNETICO

Nel 1820 il fisico danese Hans Christian Oersted si accorse, forse in modo del tutto

casuale, che una corrente che scorre in un conduttore può produrre effetti magnetici, cioè può cambiare l'orientamento di un ago magnetico, posto nelle vicinanze, che si dispone in posizione perpendicolare rispetto al filo.

Spostando l'ago magnetico nello spazio vedremo che il suo orientamento varia a seconda della posizione rispetto al conduttore; se per ogni posizione tracciamo una linea in modo che l'ago ne sia sempre tangente e ripetiamo questa operazione per tutti i punti di un piano perpendicolare al conduttore otterremo una serie di linee circolari concentriche chiuse attorno al conduttore stesso. Se a queste linee assegniamo un verso tale che esse entrino nel polo Sud dell'ago magnetico ed escano dal polo Nord avremmo così ottenuto le *linee di forza del campo magnetico* generato dalla corrente che scorre all'interno di un conduttore rettilineo (Figura 1). Da notare è che il senso del campo magnetico può essere determinato con la regola della vite (o della mano destra): la direzione del campo è coincidente con quella in cui occorre ruotare una vite



**Figura 1 – Linee di forza del campo magnetico prodotto da un filo percorso da corrente**

destrorsa, avente l'asse parallelo al conduttore, per farla avanzare nel senso della corrente.

Se adesso consideriamo una serie di spire avvolte l'una vicino all'altra attorno ad un cilindro, in modo da formare un solenoide, il campo magnetico assumerà una forma quasi rettilinea ed uniforme nella zona in prossimità dell'asse longitudinale del cilindro.

Una legge generale che permette di

calcolare il campo magnetico  $\vec{B}_0$  generato da un qualsiasi circuito di lunghezza  $l$ , sommando i contributi  $d\vec{B}_0$  prodotti da tratti infinitesimi  $d\vec{l}$  del circuito percorso da una corrente  $i$ , che scorre nel verso del vettore  $d\vec{l}$ , ad una distanza  $\vec{r}$  dall'elementino considerato, è:

$$(1.2) \quad d\vec{B}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} i \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$



$$(1.3) \quad \vec{B}_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} i \int_l \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

La (1.2) viene solitamente chiamata *prima formula di Laplace* e mostra come ogni contributo  $d\vec{B}_0$  sia perpendicolare sia al vettore  $d\vec{l}$  che al vettore distanza  $\vec{r}$ .

### **1.3 FORZA ESERCITATA DA UN CAMPO MAGNETICO SU UN CIRCUITO PERCORSO DA CORRENTE**

Se si osserva il moto di una carica  $q$  nelle vicinanze di un polo magnetico, si nota una deviazione della sua traiettoria: si deduce che il campo magnetico esercita una forza sulle cariche elettriche in movimento.

Tale forza è chiamata *forza di Lorentz* ed è definita dalla formula:

$$(1.4) \quad \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}_0$$

Dove  $\vec{v}$  è il vettore velocità della carica e  $\vec{B}_0$  è il vettore campo magnetico che ha la direzione delle *linee di forza*.

Anche un tratto di filo percorso da corrente  $\vec{i}$  in un campo magnetico sarà soggetto ad una forza dovuta all'azione che la forza di Lorentz esercita sulle cariche di conduzione che si muovono nel filo, applicando la (1.4) su un tratto infinitesimo di filo  $d\vec{l}$  si ottiene:

$$(1.5) \quad d\vec{F} = \vec{i} d\vec{l} \times \vec{B}_0$$

In seguito si vedrà che quest'effetto è di fondamentale importanza per il funzionamento del crogiolo.

## 1.4 PROPRIETA' DEL CAMPO ELETTROMAGNETICO – EQUAZIONI DI MAXWELL

Fu J.C. Maxwell che mostrò com'è possibile riassumere tutte le proprietà dei campi elettrici e magnetici con solo quattro leggi, che possono essere divise in due gruppi: le prime due, cioè la (1.6) e la (1.7), rappresentano i campi elettrici e magnetici nei casi stazionari ed entrambi appaiono separatamente. La (1.8) e la (1.9), invece, rappresentano i casi in cui i campi sono variabili nel tempo, ed essi appaiono legati in modo tale che lo studio di uno è dipendente dallo studio dell'altro. Queste quattro leggi sono spiegate con, appunto, le quattro equazioni di Maxwell che, in forma differenziale<sup>1</sup>, sono:

Teorema di Gauss per il campo elettrico: se si considera una qualunque superficie chiusa  $S$  il flusso del vettore  $\vec{E}$  uscente da essa dipende solo dalle cariche interne alla superficie. La (1.6) rappresenta la forma differenziale del teorema di Gauss.

$$(1.6) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E}_0 = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

Teorema di Gauss per il campo magnetico: se si considera una qualunque superficie chiusa  $S$  il flusso del vettore  $\vec{B}$  uscente da essa è sempre uguale a zero, ovvero la somma delle cariche magnetiche di un segno è uguale alla somma di quelle dell'altro segno; in altre parole si può dire che non esistono cariche magnetiche isolate, ma ad ogni polo nord magnetico corrisponde sempre anche un polo sud. In forma differenziale il teorema è rappresentato dalla (1.7).

$$(1.7) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B}_0 = 0$$

---

<sup>1</sup> Con  $\vec{\nabla}$  si indica il Laplaciano:  $\vec{\nabla} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ . Quindi, indicando con  $\vec{V}$  un generico vettore si definisce il rotore come  $\overline{rotV} = \vec{\nabla} \cdot \vec{V}$  e la divergenza di  $\vec{V}$  come  $\overline{divV} = \vec{\nabla} \times \vec{V}$

Legge di Faraday-Neumann: se il flusso del vettore  $\overline{\mathbf{B}}$  concatenato con un circuito varia nel tempo, nel circuito viene indotta una FEMi (Forza ElettroMotrice indotta) che si oppone alla causa che l'ha generata; è la legge di induzione elettromagnetica secondo cui un campo magnetico variabile nel tempo produce un campo elettrico. La (1.8) rappresenta la forma locale della legge di Faraday.

$$(1.8) \quad \overline{\nabla} \times \overline{\mathbf{E}}_0 = - \frac{\partial \overline{\mathbf{B}}_0}{\partial t}$$

Legge di Ampère-Maxwell: i campi magnetici sono prodotti dalle correnti di conduzione concatenate e dalle variazioni temporali del campo elettrico  $\overline{\mathbf{E}}$ ; in quest'ultimo caso s'introduce la corrente di spostamento che non viene generata da cariche elettriche in movimento ma produce effetti magnetici paragonabili ad una corrente vera e propria. La (1.9) rappresenta la forma locale della legge di Ampere-Maxwell.

$$(1.9) \quad \overline{\nabla} \times \overline{\mathbf{B}}_0 = \mu_0 \left( \overline{\mathbf{J}}_e + \varepsilon_0 \frac{\partial \overline{\mathbf{E}}_0}{\partial t} \right) = \overline{\mathbf{J}}$$

Per completare la descrizione si enuncia la legge di Ohm che esprime la proporzionalità fra la densità di corrente  $J$ , il campo elettrico  $E$  e la conducibilità elettrica  $\sigma$ :

$$(1.10) \quad J = \sigma E$$

Inoltre si definisce il *vettore intensità del campo magnetico*  $\overline{\mathbf{H}}$ :

$$(1.11) \quad \overline{\mathbf{B}} = \mu_0 \mu_r \overline{\mathbf{H}}$$

dove  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica del vuoto e  $\mu_r$  è la permeabilità magnetica relativa del materiale.

Le equazioni di Maxwell possono essere scritte anche in forma integrale e rispettivamente si ottiene:

$$(1.12) \quad \oint_S (\overline{\mathbf{E}}_0) \cdot \overline{\mathbf{u}}_n dS = \frac{1}{\varepsilon_0} \int_V \rho d\tau = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0}$$

$$(1.13) \quad \oint_S (\overline{\mathbf{B}}_0) \cdot \overline{\mathbf{u}}_n dS = 0$$

$$(1.14) \quad \oint \overline{\mathbf{E}}_0 d\overline{\mathbf{s}} = - \frac{d\phi(\overline{\mathbf{B}}_0)}{dt}$$

$$(1.15) \quad \oint \mathbf{B} ds = \mu_0 \left( i_c + \varepsilon_0 \frac{d\phi(\mathbf{E}_0)}{dt} \right)$$

Queste equazioni sono valide sia se riferite al vuoto a cui sono associate le costanti  $\mu_0$  e  $\varepsilon_0$  sia ad un qualsiasi mezzo materiale con le relative  $\mu$  e  $\varepsilon$ .

### 1.5 LE CORRENTI DI FOUCAULT

Per enunciare la (1.8) si è parlato di correnti indotte e flusso concatenato con dei circuiti (e quindi comunemente formati da fili sottili), ma tale legge è valida anche nel caso in cui i conduttori siano dei blocchi metallici. Quando un blocco metallico è immerso in un campo magnetico variabile in accordo con la (1.8) al suo interno vengono indotte delle correnti, dette *correnti parassite* o *correnti di Foucault*, che nascono in opposizione alla causa che le ha generate.

Genericamente per effetto Joule le correnti parassite danno origine a perdite di energia che si traducono in un riscaldamento del blocco metallico e forze di interazione con il campo magnetico.

Per dare una descrizione matematica del legame fra il campo magnetico e le correnti indotte si deve introdurre il *potenziale elettrico*  $V$  ed il *vettore potenziale magnetico*  $\bar{A}$  definiti in modo tale che :

$$(1.16) \quad \bar{E} = -grad V$$

$$(1.17) \quad \bar{B}_0 = \bar{\nabla} \times \bar{A}$$

$$(1.18) \quad \bar{\nabla} \cdot \bar{A} = 0$$

Utilizzando le relazioni (1.8),(1.10),(1.17) si ottiene:

$$(1.19) \quad \bar{J} = -\sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \sigma \bar{\nabla} V = \bar{J}_e + \bar{J}_s$$

dove  $\bar{J}_e$  è la densità della corrente indotta e  $\bar{J}_s$  è la densità della corrente applicata.

## Capitolo 2

# BASI TEORICHE DI FUNZIONAMENTO DEL CROGIOLO FREDDO (CCLM)

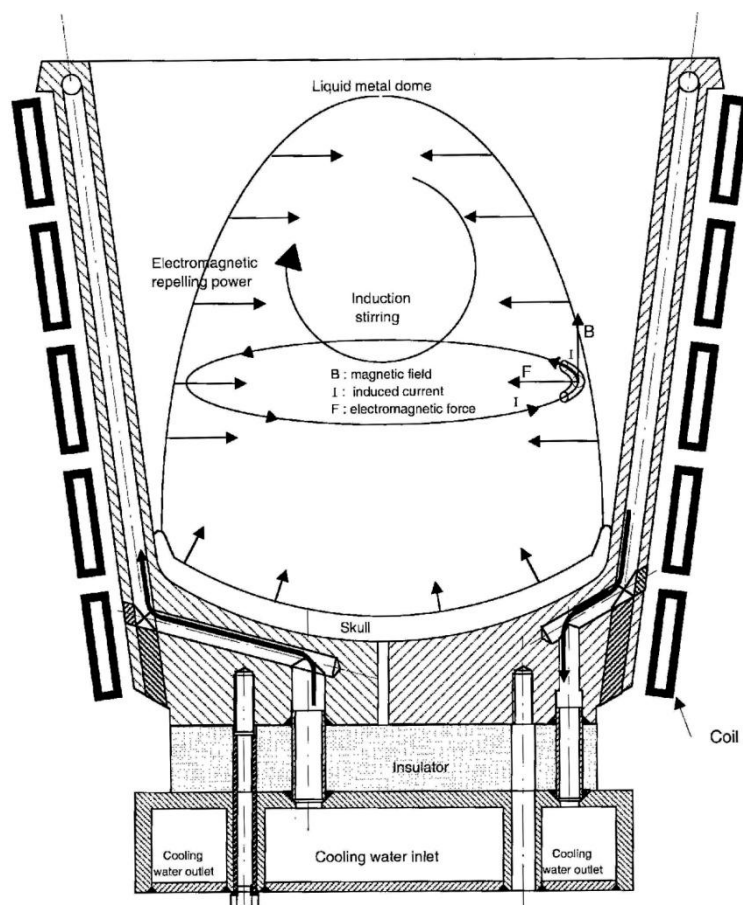
La tecnica di fusione a crogiolo freddo sfrutta gli effetti che si ottengono dall'induzione delle correnti di Foucault. La carica metallica viene posizionata all'interno di un crogiolo raffreddato internamente e circondato da delle spire conduttrici nelle quali scorre una corrente variabile nel tempo che genera il campo magnetico necessario per il funzionamento dell'apparecchiatura. All'interno del metallo, immerso così in un campo magnetico variabile, vengono indotte delle correnti parassite che producono sia un effetto termico, scaldando il metallo, sia un effetto meccanico che si manifesta con delle forze, le quali, interagendo col campo magnetico, sono in grado di confinare la carica metallica e mantenerla in sospensione. La denominazione di questa tecnica, "a crogiolo freddo", deriva proprio dal fatto che l'effetto riscaldante non viene trasmesso attraverso il contatto del materiale con il crogiolo che rimane, quindi, ad una temperatura inferiore. A seconda dei casi si può distinguere il crogiolo a semi-levitazione ed il crogiolo a levitazione (Figura 2 e Figura 3). Nel primo caso il materiale resta appoggiato alla base del crogiolo sia quando si trova allo stato solido, sia quando è fuso, ma nella fase liquida il metallo si discosta dalle pareti laterali. Quindi il crogiolo a semi-levitazione funge da appoggio per il metallo fuso. Nel secondo caso, a differenza dei metodi di fusione tradizionali, il metallo può essere fuso senza che ci sia il contatto fisico tra il metallo stesso ed il crogiolo: nella fusione in levitazione il metallo resta appoggiato solamente quando l'attrezzatura è spenta; durante la fase di riscaldamento

e fusione il materiale resta completamente sollevato ed, in condizioni ottimali, non tocca alcuna parte del crogiolo che non ha più lo scopo di contenere il metallo mediante il contatto fisico, ma ha lo scopo di direzionare e distribuire opportunamente le linee di forza del campo elettromagnetico; in questo modo sono le forze elettromagnetiche a confinare il metallo fuso.

Tale caratteristica offre la possibilità di fondere alcuni metalli come titanio, zirconio, vanadio e molibdeno che sono difficili da trattare sia per l'elevata temperatura a cui devono essere riscaldati sia per la loro aggressività quando si trovano allo stato fuso. Il primo problema viene risolto dal fatto che l'assenza di contatto unita al raffreddamento interno permette di mantenere il crogiolo ad una temperatura molto più bassa di quella raggiunta dal metallo fuso; il secondo problema non si presenta dal momento che (sempre se ci si trova in condizioni ottimali) non vi è contatto tra la massa fusa ed il crogiolo. Il risultato è un allungamento considerevole della vita utile del crogiolo e

l'assenza di contaminazioni nel metallo dovute, ad esempio, al contatto con materiali ceramici che vengono normalmente impiegati nelle fusioni ad alta temperatura tradizionali.

Un altro vantaggio nell'uso di questa tecnica è quello di poter ottenere, per effetto dell'interazione tra il campo prodotto dalle correnti indotte ed il campo inducente, un forte rimescolamento interno del fuso senza che sia necessario introdurre altri



**Figura 2 – Schematizzazione di un crogiolo a semi-levitazione**

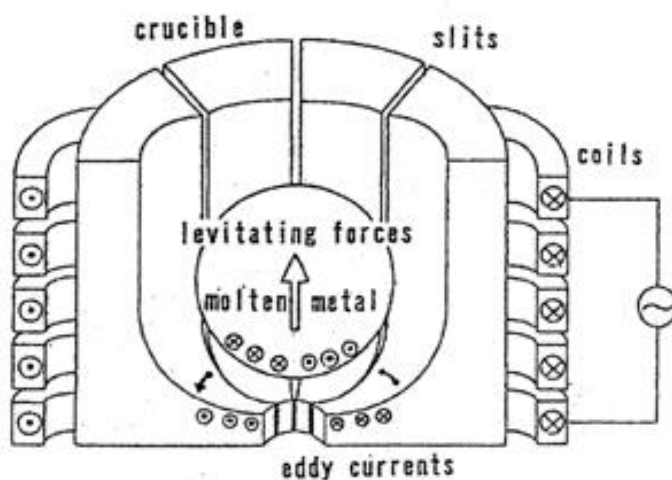
dispositivi fisici ottenendo una elevata qualità finale del getto sia in termini di raffinazione che di uniformità.

Costruttivamente il sistema di fusione è costituito da tre componenti principali: il crogiolo vero e proprio, il sistema induttore e il relativo gruppo di alimentazione, il sistema di raffreddamento.

Il crogiolo è realizzato in rame e diviso in settori raffreddati solitamente ad acqua; il suo compito è quello di contenere il materiale sia allo stato solido ma soprattutto quando il metallo viene fuso; in questa seconda fase, infatti, anche se non c'è il contatto fisico col metallo, il crogiolo riveste un ruolo molto importante perché esso influenza la distribuzione delle forze di repulsione che confinano e sollevano la carica.

Il sistema induttore è costituito da spire, formate da conduttori cavi ed avvolte attorno al crogiolo; anche questi conduttori sono raffreddati internamente.

Il sistema di raffreddamento è di fondamentale importanza perché è necessario il controllo delle temperature dei vari componenti: raffreddando le spire è possibile l'impiego di correnti elevate che normalmente causerebbero un sovra riscaldamento dei conduttori; il raffreddamento del crogiolo (unitamente all'assenza di contatto) permette di riscaldare il fuso a temperature molto più elevate rispetto ad altri metodi di fusione senza danneggiare le pareti che lo contengono.



**Figura 3 – Schematizzazione di un crogiolo a levitazione magnetica.**

## 2.1 DISTRIBUZIONE DELLE CORRENTI INDOTTE NELLA CARICA METALLICA

Le correnti parassite indotte nel blocco metallico non si distribuiscono in modo uniforme lungo le sezioni trasversali, ma si concentrano prevalentemente sulla superficie.

Se si considera un corpo omogeneo semi-infinito immerso in un campo elettromagnetico la densità di corrente indotta segue una legge esponenzialmente decrescente a mano a mano che si procede dalla superficie verso l'interno del pezzo:

$$(2.1) \quad J_x = J_0 e^{(-x/\delta)}$$

dove:  $J_x$  è il valore efficace della densità di corrente ad una distanza  $x$  dalla superficie,

$J_0$  è la densità di corrente sulla superficie,

$\delta$  è lo skin depth o spessore di penetrazione

Lo spessore di penetrazione dipende da:

- proprietà del materiale: conducibilità elettrica ( $\sigma = 1/\rho$ ) e permeabilità magnetica  $\mu$ ;
- frequenza angolare ( $\omega = 2\pi f$ ) con cui varia il campo magnetico generato da una corrente alternata con frequenza  $f$ ;

il legame con queste grandezze è espresso dalla (2.2):

$$(2.2) \quad \delta = \sqrt{2/(\mu\sigma\omega)}$$

La distribuzione delle correnti non dipende solo dal parametro  $\delta$  ma dipende anche dalla forma e dalle dimensioni del pezzo. In particolare s'introduce il parametro  $R_\omega$  che viene detto *parametro di schermatura* che rappresenta l'opposizione alla penetrazione della corrente:

$$(2.3) \quad R_\omega = \mu\sigma\omega L^2 \approx \left(\frac{L}{\delta}\right)^2$$



Quindi, tanto più piccolo sarà il valore di  $R_\omega$  tanto più grande sarà lo strato interessato dalle correnti parassite in relazione allo spessore complessivo del pezzo.

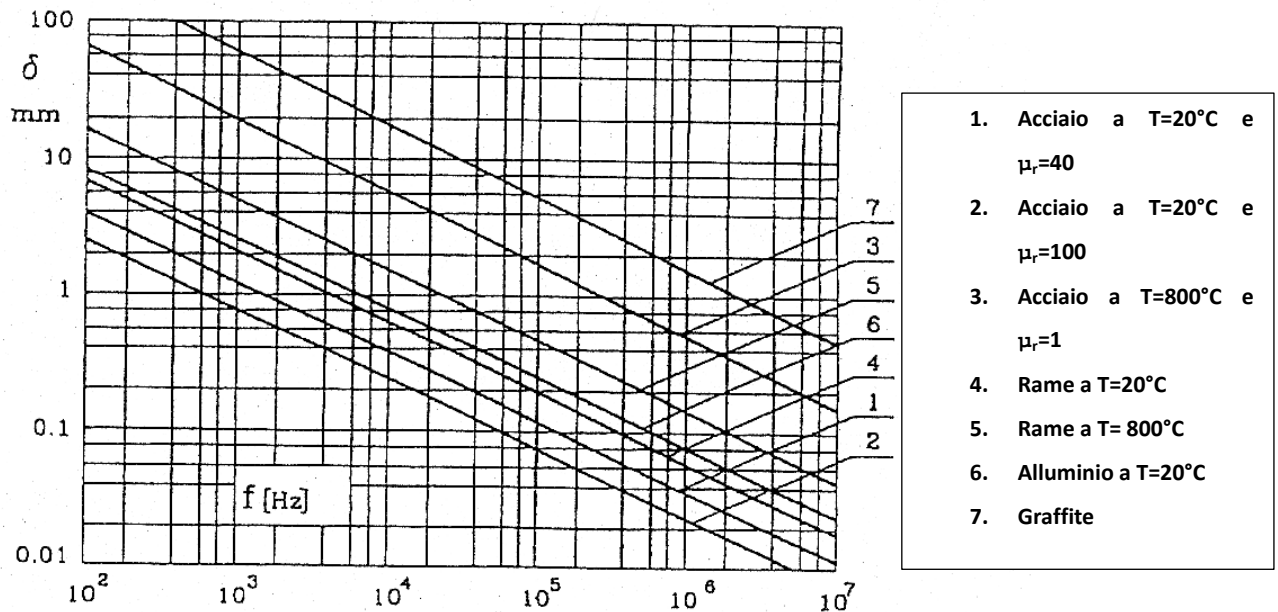


Figura 4 – Spessore di penetrazione in funzione della frequenza

Tale fenomeno viene già sfruttato, ad esempio, nei trattamenti termici come la tempra superficiale dove è necessario controllare la profondità di riscaldamento del materiale.

## 2.2 FENOMENI PROVOCATI DALLE CORRENTI INDOTTE

Come è stato accennato all'inizio del capitolo il funzionamento del crogiolo ad induzione magnetica si basa principalmente sugli effetti prodotti dalle correnti parassite indotte nella carica metallica.

### 2.2.1 POTENZA TERMICA

L'effetto termico dato dal calore sviluppato dalle correnti parassite è paragonabile alla potenza dissipata nel mezzo per *effetto Joule*; in un punto del materiale con resistività  $\rho$  ed in presenza di una densità di corrente  $J$  la densità di potenza volumetrica è data da:

$$(2.4) \quad P_v = \rho J^2$$

Ricordando la distribuzione della densità di corrente descritta con la (2.1) otteniamo l'andamento della densità di potenza volumetrica:

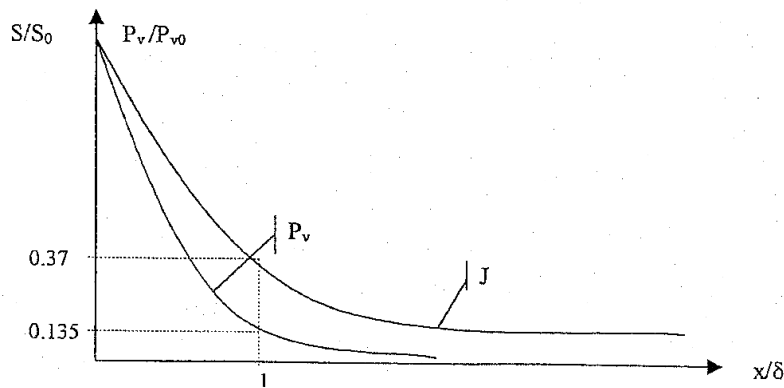
$$(2.5) \quad P_{v_x} = P_{v_0} e^{(2x/\delta)}$$

### 2.2.2 FORZE ELETTROMAGNETICHE

L'interazione tra il campo magnetico e le correnti indotte si manifesta con la comparsa della *forza di Lorentz* descritta dall'equazione (1.4). Con l'utilizzo della legge di *Ampere* (1.9) si può scrivere la seguente relazione:

$$(2.6) \quad \bar{F} = \frac{1}{\mu} (\bar{B} \cdot \nabla) \bar{B} + \nabla \left( \frac{\bar{B}^2}{2\mu} \right)$$

Separando i due addendi si ottiene:



**Figura 5 – Distribuzione della densità di corrente e di potenza termica in un corpo piatto**

$$(2.7) \quad \bar{F}_{rot} = \frac{1}{\mu} (\bar{B} \cdot \nabla) \bar{B}$$

$$(2.8) \quad \bar{F}_{irrot} = \nabla \left( \frac{\bar{B}^2}{2\mu} \right)$$

La (2.7) rappresenta la componente rotazionale della forza che causa lo stirring elettromagnetico all'interno del pezzo fuso.

La (2.8) rappresenta la componente non rotazionale. Questa è una forza repulsiva che

si instaura tra la massa fusa e le pareti del crogiolo (dove vengono indotte delle correnti con verso opposto a quelle indotte nel pezzo) ed è diretta verso l'alto e sempre verso il centro del crogiolo. Tale componente genera una pressione sulla massa fusa che permette la levitazione elettromagnetica ed il confinamento del metallo fuso.

Non va dimenticato, però, che data la natura centripeta della componente irrotazionale il suo contributo lungo l'asse verticale del crogiolo risulta essere sempre nullo; per questo il metallo fuso presente nelle vicinanze dell'asse è sostenuto solamente dalla tensione superficiale del liquido e questo limita fortemente le dimensioni d'utilizzo del CCLM.

La prevalenza di una componente sull'altra dipende dalla frequenza di applicazione della corrente negli avvolgimenti. Esiste infatti un valore ottimale della frequenza per massimizzare un effetto piuttosto che un altro. A questa frequenza è possibile associare un valore di  $R_\omega$  ricavando così un valore ottimale del parametro di schermatura per il rimescolamento piuttosto che per la levitazione.

Ad esempio, per i metalli, i valori ottimali sono riportati di seguito nella Tabella 1

Effetto principale	$R_\omega$
Rimescolamento	40
Levitazione	~32

**Tabella 1**

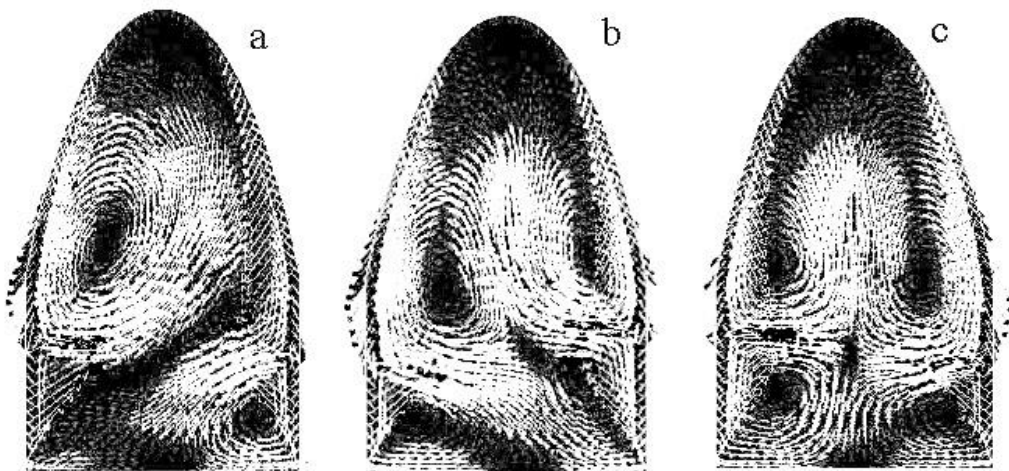
### 2.2.3 STIRRING ELETTROMAGNETICO

Un aspetto molto importante che caratterizza la tecnologia di fusione a crogiolo freddo è la capacità di rimescolamento della massa di metallo fuso dovuta alla formazione di vortici a regime turbolento. Questo fenomeno, detto *stirring* elettromagnetico, è generato dalla distribuzione disomogenea delle correnti indotte ed è in grado di modificare la stabilità della massa fondente, la distribuzione di temperatura, e la struttura che viene generata dalla solidificazione.

In particolare un buon rimescolamento permette di:

- incrementare la qualità dei grani e renderli il più omogenei possibili,
- ridurre le inclusioni non metalliche che tendono a spostarsi verso la superficie,
- ridurre la porosità del metallo, quindi di migliorare l'uniformità e le caratteristiche meccaniche del getto.

Per comprendere l'importanza dello *stirring* basta pensare che la distribuzione della velocità di spostamento è uno dei principali elementi che vengono calcolati in ogni modello matematico creato per studiare il comportamento del metallo fuso nel crogiolo. Nella Figura 6 sono rappresentati tre casi tipici di rimescolamento che si possono ottenere nel crogiolo a semi-levitazione.



**Figura 6 – Rappresentazione della velocità di spostamento della massa fusa nella tecnica ISM**

Un parametro che influenza lo stirring è  $R_\omega$ . In generale si possono distinguere due casi:

- $R_\omega \gg 1$ . Con un valore elevato del parametro di schermatura la profondità di penetrazione delle correnti è molto ridotta; questo comporta che la maggior parte della potenza viene dissipata in corrispondenza degli angoli della struttura creando la situazione rappresentata in Figura 7.

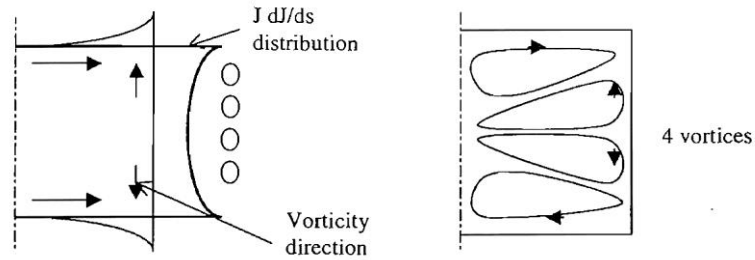


Figura 7 – Stirring nel caso di  $R_\omega \gg 1$

- $R_\omega > 1$ . In questo secondo caso lo skin depth è maggiore, di conseguenza la distribuzione delle correnti risulta più omogenea e lo stirring è meno efficace; inoltre non è presente l'effetto di concentrazione delle correnti come nel caso precedente. Il risultato è schematizzato dalla Figura 8.

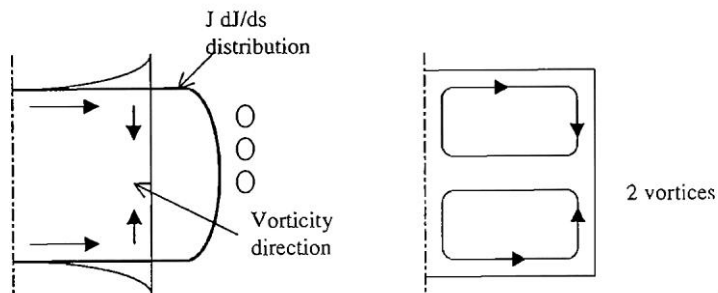


Figura 8 – Stirring nel caso di  $R_\omega > 1$

### 2.2.4 LEVITAZIONE MAGNETICA

La levitazione magnetica avviene quando l'interazione delle forze elettromagnetiche è tale da bilanciare la spinta gravitazionale.

Quando il metallo è allo stato solido è sufficiente che l'effetto totale dato dalla distribuzione della pressione magnetica presente sulla superficie della carica sia tale da contrastare la forza di gravità rispettando l'equazione (2.9):

$$(2.9) \int_s \frac{B^2}{2\mu} ds = \int_V \rho g dV$$

Quando il metallo raggiunge lo stato liquido il fenomeno è molto più complicato da analizzare e realizzare, in particolare risulta difficile controllare la stabilità della massa fusa. Innanzitutto la distribuzione della pressione magnetica deve essere tale da bilanciare la pressione idrostatica in ogni punto della superficie e correggere le eventuali instabilità che causano un fenomeno di "gocciolamento" del metallo. Ma è necessario anche che la massa fusa formi un tutt'uno e che sia stabile rispetto agli spostamenti laterali oltre che a quelli verticali.

### 2.2.5 STABILIZZAZIONE

Uno dei maggiori problemi che si presentano con l'utilizzo del sistema CCLM è quello di mantenere stabile il metallo allo stato liquido. Il controllo della posizione della massa fusa risulta piuttosto difficile perché sono coinvolti un gran numero di parametri di funzionamento del dispositivo, (come intensità di corrente, intensità del campo elettromagnetico, frequenza, distribuzione dei conduttori e delle forze, ecc.) assieme ai parametri del materiale (ad esempio temperatura, velocità, pressione, conducibilità elettrica, viscosità ecc.) che non sempre risultano semplici da controllare. A ciò si aggiunge il fatto che molti dei parametri appena citati varia durante la fusione ed è quindi necessario apportare delle correzioni anche durante un singolo processo di fusione. Se l'instabilità è tale da portare il crogiolo ed il metallo fuso a contatto verrebbe meno il principale vantaggio dell'uso di questa tecnica che si propone di creare un getto più puro possibile privo, quindi, di contaminazioni.

Una possibile soluzione al problema dell'instabilità può essere quella di aggiungere al campo magnetico alternato un forte campo magnetico statico. Tale

campo deve essere disomogeneo in modo da creare un gradiente in grado di dirigere il materiale in una zona stabilita (precisamente dove il gradiente  $dB/dz$  è nullo); così facendo è possibile controllare separatamente l'effetto di riscaldamento e l'effetto di sollevamento.

L'applicazione di questa tecnica (rif. [1]) ha reso possibile fondere e successivamente

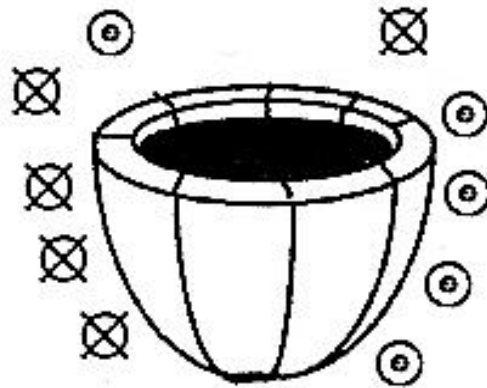


**Figura 9 – Campione solidificato in levitazione**

solidificare  $17 \text{ cm}^3$  di una lega TiAl mantenendo sempre il materiale in levitazione (Figura 9). Altri risultati ottenuti verranno presentati nel capitolo successivo.

### ***2.3 FORMA E CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE DEL CROGIOLO***

La forma del crogiolo e la distribuzione dei conduttori attorno ad esso giocano un ruolo fondamentale nel controllo della levitazione: una configurazione particolarmente adatta è rappresentata da un crogiolo di forma conica in grado di concentrare gran parte delle forze alla base della struttura così da permettere la levitazione. Inoltre sulla sommità del crogiolo aggiungendo qualche avvolgimento con direzione opposta a quelli sottostanti si ottiene una regione dove il campo magnetico si annulla con un conseguente miglioramento della stabilità verticale (Figura 10).



**Figura 10 – Configurazione di un crogiolo conico con l'aggiunta di una spirale inversa**

Tradizionalmente (rif. [3]) il crogiolo veniva realizzato con forma emisferica, anziché conica, ma tale configurazione dava origine a forze minori, peggiorando quindi la levitazione. In entrambi i casi si sono riscontrate sia delle concentrazioni di forze in certe zone (ad esempio alla base del crogiolo) ma anche una drastica diminuzione di esse in altri punti; questa disomogeneità porta ad avere instabilità col rischio del contatto fra la massa fusa e crogiolo. Questo problema è attenuato se il crogiolo è realizzato con uno spessore costante tale da rendere uniforme la distanza tra il metallo fuso e gli avvolgimenti che lo circondano. Dati ottenuti da calcoli analitici (v. Tabella 2 – Variazione della forza esercitata sul metallo in relazione allo spessore del crogiolo Tabella 2) confermano come uno spessore minore permetta di ottenere forze maggiori sulla carica metallica. Oltre alla configurazione a spessore costante sono state studiate altre soluzioni a spessore variabile: i risultati (rif. [3]) hanno dimostrato che realizzare un crogiolo con spessore crescente verso la base porta al peggioramento del problema delle “zone deboli” dove c’è il rischio di contatto, mentre un crogiolo con uno spessore decrescente porta al rischio di surriscaldamento dovuto a problemi di smaltimento del calore della zona meno spessa.



Spessore crogiolo	5 mm	10 mm	15 mm
Numero spire	32	29	32
Corrente (3 kHz)	250 A	300 A	250 A
Forza sul pezzo	6.13 N	4.97 N	4.5 N

**Tabella 2 – Variazione della forza esercitata sul metallo in relazione allo spessore del crogiolo (rif. [10])**

Quindi la determinazione dello spessore ideale diventa un parametro di progetto molto importante sia per quanto riguarda la progettazione elettrica dovendo determinare l'interazione tra crogiolo e campo elettromagnetico, sia per la progettazione meccanica dovendo assicurare una sezione che sia in grado di sopportare il calore sviluppato offrendo sufficiente spazio per il passaggio del liquido di raffreddamento.

Oltre alla forma, anche le dimensioni del crogiolo influenzano il processo di fusione. Esiste infatti un legame tra il diametro del crogiolo, lo *skin depth*, e l'efficienza energetica del crogiolo. Al *Moscow Scientific and Industrial Association* (rif. [11]) è stato creato un modello empirico che afferma che per ottenere un trasferimento di energia con efficienza intorno all' 80% si debba rispettare la seguente relazione:

$$(2.10) \quad 3 < \left[ \frac{D_c}{\delta \cdot \sqrt{2}} \right] < 5 \quad \text{dove } D_c \text{ è il diametro del crogiolo.}$$

Un altro parametro costruttivo che influenza la stabilità della levitazione è il numero di sezioni in cui viene diviso il crogiolo. In corrispondenza delle fessure fra una sezione e l'altra si ha il massimo effetto delle forze elettromagnetiche. E' stato dimostrato sperimentalmente che un numero maggiore di sezioni (e parallelamente un numero maggiore di fessure) comporta una distribuzione più uniforme della pressione

magnetica con il conseguente aumento di stabilità della massa fusa. Quando il numero di sezioni è troppo basso possono esserci delle zone dove la pressione è insufficiente a mantenere sollevato il metallo e quindi si possono verificare dei contatti indesiderati fra fuso e crogiolo. Non va dimenticato che esiste un limite all'aumento del numero delle sezioni dovuto al fatto che le dimensioni delle stesse devono essere tali da permettere la realizzazione, al loro interno, del condotto per il passaggio del liquido di raffreddamento.

## Capitolo 3

### APPLICAZIONI SPERIMENTALI

In questo capitolo verranno presentati alcuni esperimenti condotti allo scopo di studiare il funzionamento della tecnica di fusione in crogiolo. Verranno presentate anche delle tecniche, come la Induction Skull Melting (ISM), che pur essendo diverse dalla CCLM né condividono i principi di funzionamento e gran parte dello studio teorico oltre che parte della realizzazione pratica; inoltre, è da sottolineare che i più recenti studi sono stati condotti in particolare sul crogiolo per fusione in semi-levitazione in quanto comporta delle minori complicazioni rispetto alla levitazione completa di cui, in letteratura, sono stati trovati pochi aggiornamenti.

#### ***3.1 FUSIONE E SOLIDIFICAZIONE IN LEVITAZIONE***

Il seguente esperimento condotto in Francia da E. Fourreaux e P. Gillon (rif. [1]) è stato in grado di dimostrare che sovrapponendo al campo magnetico alternato un campo magnetico statico è possibile separare l'effetto di riscaldamento e di levitazione.

Il crogiolo di rame utilizzato è composto da 10 settori e può essere sottoposto ad una tensione di 6 kV ad una frequenza da 115 kHz. Questo ha reso possibile la fusione e la solidificazione di un campione di 17 cm<sup>3</sup> composto da una lega Ti-Al. Una spira superconduttrice della Oxford Instrumens fatta di Niobio e Titanio viene utilizzata per generare un campo magnetico statico che può raggiungere un'intensità di 8 T ed un gradiente di 250 T/m. Il crogiolo è posto all'interno di una camera raffreddata e sottovuoto con un diametro 120 mm. Una finestra di Pyrex ed uno specchio rendono

possibile il controllo visivo con una telecamera e la misura della temperatura del metallo con un pirometro.

I parametri che possono essere controllati sono la frequenza e l'intensità del campo magnetico alternato e l'intensità di quello statico. Aumentando l'intensità del campo alternato si ottiene il riscaldamento del metallo. Con l'incremento del campo statico viene prodotta la levitazione ed in contemporanea un aumento di temperatura dovuto all'assenza di contatto con il crogiolo raffreddato ad acqua. Infine una diminuzione del campo alternato ed un aumento del gradiente del campo statico permette di solidificare il metallo mantenendolo in levitazione. Il risultato ottenuto è già stato presentato nel paragrafo 2.2.5 in Figura 9. Inoltre delle analisi effettuate con un EBM hanno evidenziato che la solidificazione in levitazione influenza la dimensione dei grani. I campioni solidificati in levitazione, rispetto a quelli solidificati a contatto con il crogiolo, presentano meno grani e più grandi. Questo è dovuto al fatto che la solidificazione in levitazione risulta essere più omogenea e più lenta.

### ***3.2 VERIFICA DEL MODELLO ANALITICO DI UN CROGIOLO PER FUSIONE A GUSCIO IN SEMI-LEVITAZIONE (ISM)***

La fusione (Induction Skull Melting) nel crogiolo a semi-levitazione (Figura 2) si differenzia da quella in levitazione dal fatto che il materiale resta appoggiato sul fondo del crogiolo. La bassa temperatura del crogiolo, che viene raffreddato a liquido, permette la creazione di un guscio ("skull") di metallo solido che circonda quello fuso e crea una barriera che lo separa dalle pareti del crogiolo. Il più importante progetto di studio su questa tecnica nel Regno Unito (Rif. [4]) è stato realizzato grazie alla stretta collaborazione tra la University of Birmingham e la University of Greenwich. La prima ha svolto delle ricerche sulla pratica di fusione e colata, mentre la seconda si è occupata dello sviluppo di un modello computerizzato che aiutasse a capire il funzionamento di un sistema per la ISM. Lo scopo di questi studi è il miglioramento della qualità del fuso (nel caso specifico si tratta di una lega TiAl) mediante il controllo della temperatura e della posizione del metallo liquido durante la fusione. Uno degli

obbiettivi è infatti quello di ridurre al minimo il contatto con le pareti del crogiolo. Il controllo della forma e della posizione del metallo fuso risulta essere molto complessa in quanto è il risultato di una delicata combinazione tra le forze elettromagnetiche indotte, la pressione del fluido, le forze d'inerzia e la gravità. Inoltre le forze associate al campo elettromagnetico sono strettamente legate alla dinamica del metallo liquido sulla superficie libera, ai moti turbolenti che si generano all'interno di esso ed al fenomeno di scambio del calore.

Il modello matematico sviluppato per la simulazione del processo si basa sulle equazioni di Navier-Stokes, sulle equazioni di continuità per un fluido incomprimibile, e sulle equazioni di conservazione dell'energia termica fra le zone liquide e solide del metallo. L'analisi numerica ha lo scopo di descrivere le condizioni di temperatura, velocità, viscosità, diffusione termica e relazionarle alla distribuzione del campo e delle forze elettromagnetiche responsabili sia del riscaldamento sia del confinamento del materiale e della sua disposizione all'interno del crogiolo. I dati operativi che devono essere rilevati sperimentalmente servono sia per convalidare il modello matematico sia per lo sviluppo stesso dei calcoli. Questi dati includono la corrente che realmente scorre negli avvolgimenti, la temperatura durante la fusione, il flusso di calore attraverso il sistema di raffreddamento e le dimensioni del menisco del metallo liquido.

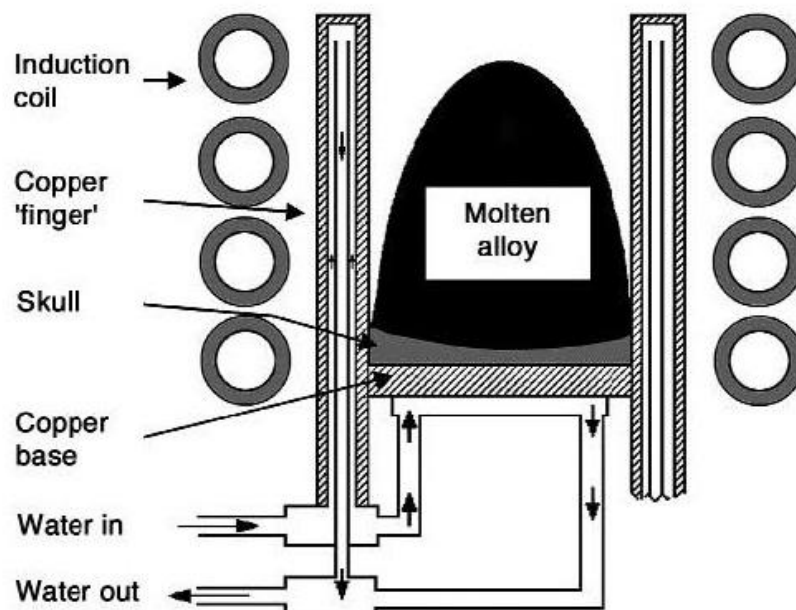
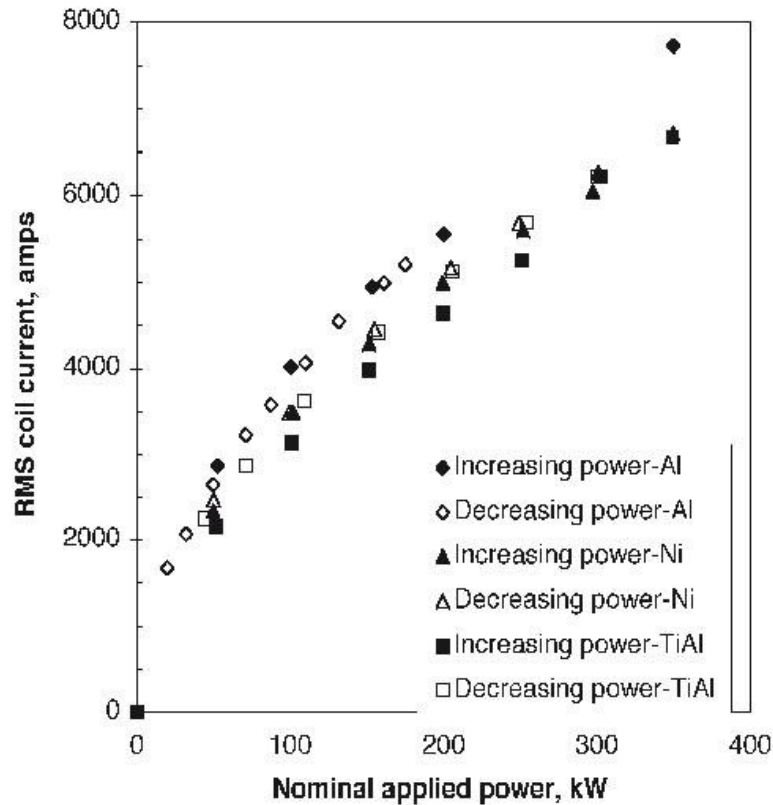


Figura 11 - Crogiolo per ISM della Consarc Engineerin

Tutte le misure necessarie a questo esperimento sono state effettuate utilizzando un crogiolo per ISM fornita dalla Consarc Engineering Ltd (Schematizzato in Figura 11 ). Il crogiolo avente una capacità nominale di circa 4.5 kg di TiAl è posto all'interno di una camera che permette di fondere il metallo in vuoto o con una pressione parziale di Argon. Le spire inducenti sono alimentate da un VIP (Variable Induction Power) fornito dalla Inductotherm Europe Ltd. che è in grado di fornire una potenza nominale di 350 kW a circa 7 kHz. Uno dei dati necessari alla compilazione del modello matematico è il valore effettivo della corrente che scorre all'interno di queste spire; il VIP può senz'altro fornire una potenza precisa di cui è possibile decidere e misurare l'entità (in kW), ma questo valore (anche se mantenuto costante) non origina un'intensità di corrente costante negli avvolgimenti. Questo accade perché le proprietà elettromagnetiche del materiale da fondere non sono costanti. Esse cambiano ovviamente da materiale a materiale, ma cambiano anche in un determinato materiale durante le varie fasi di fusione. Ad esempio si è visto sperimentalmente (Figura 12) che a parità di potenza la corrente effettiva misurata durante la fusione di una lega TiAl è minore durante la fase di riscaldamento quando il metallo è ancora solido, mentre è maggiore quando il materiale è fuso. Ma si è visto anche che utilizzando dell'alluminio puro (99.99%) non solo questa differenza è molto meno evidente, ma per valori di potenza inferiori a 200 kW tende addirittura ad invertirsi, cioè la corrente maggiore è stata misurata in fase di riscaldamento.



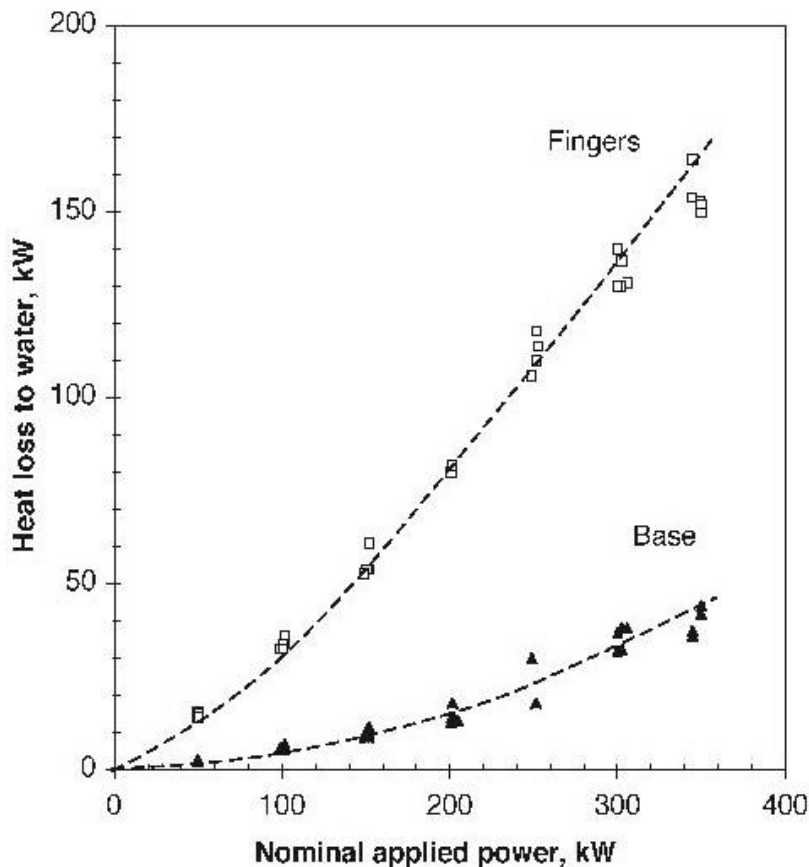
**Figura 12 – Calibrazione della corrente negli avvolgimenti durante la fusione di diversi materiali.**

Un altro parametro da considerare è la temperatura. Rilevare la temperatura del metallo durante la fusione si è rivelato particolarmente difficile. Infatti con l'utilizzo di un pirometro ad infrarossi i dati ottenuti non erano molto attendibili a causa del vapore di alluminio presente nell'atmosfera della camera che falsava la misurazione. L'utilizzo di una termocoppia ha permesso di ottenere misure più accurate ma discontinue perché l'aggressività del metallo fuso è tale da limitare la vita utile della termocoppia. Anche altre misure di temperatura possono essere molto utili. In particolare conoscendo le caratteristiche del fluido di raffreddamento (tra cui portata di massa, temperatura e calore specifico) è possibile determinare il flusso termico che esso è in grado di assorbire; sottraendo la potenza termica assorbita dal refrigerante da quella totalmente impiegata si otterrà l'effettiva potenza di riscaldamento a cui è sottoposto il materiale. Il circuito di raffreddamento ha una capacità stimata intorno ai 3000 L; il fluido di raffreddamento è composto da acqua deionizzata contenente il 25%

di MEG (glicole monoetilenico) e viene pompato da un serbatoio di raccolta fino al crogiolo. Qui il circuito si divide: una parte di fluido raffredda la base del crogiolo (con una portata di circa 24 L/min) mentre l'altra parte raffredda i settori verticali (circa 206 L/min). Il fluido caldo viene inviato ad un radiatore per essere raffreddato, ed infine ritorna nel serbatoio. La temperatura del fluido viene monitorata con l'utilizzo di termocoppie; le tre temperature che servono per il calcolo del flusso termico sono la temperatura del fluido in ingresso al crogiolo, la temperatura del fluido in uscita dalla base e la temperatura del fluido in uscita dalle pareti laterali. Conoscendo la portata di massa (ricavabile dalla portata volumetrica e dalla densità), il calore specifico e la differenza di temperatura si ricava la potenza termica scambiata:

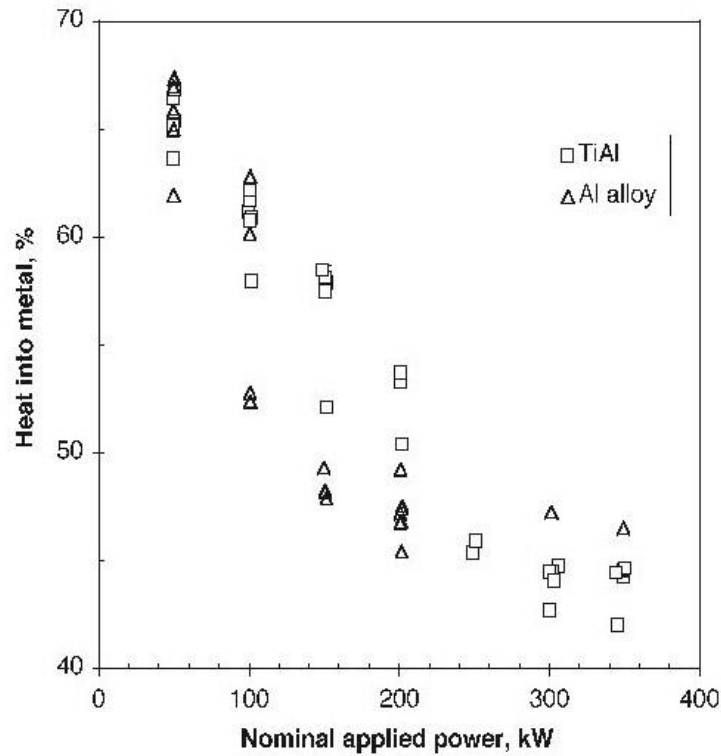
$$(3.1) \quad Q_{base} = 1.579 \cdot \Delta T \quad [kW]$$

$$(3.2) \quad Q_{pareti} = 13.551 \cdot \Delta T \quad [kW]$$



**Figura 13 – Calore assorbito dal circuito di raffreddamento in funzione della potenza nominale applicata**





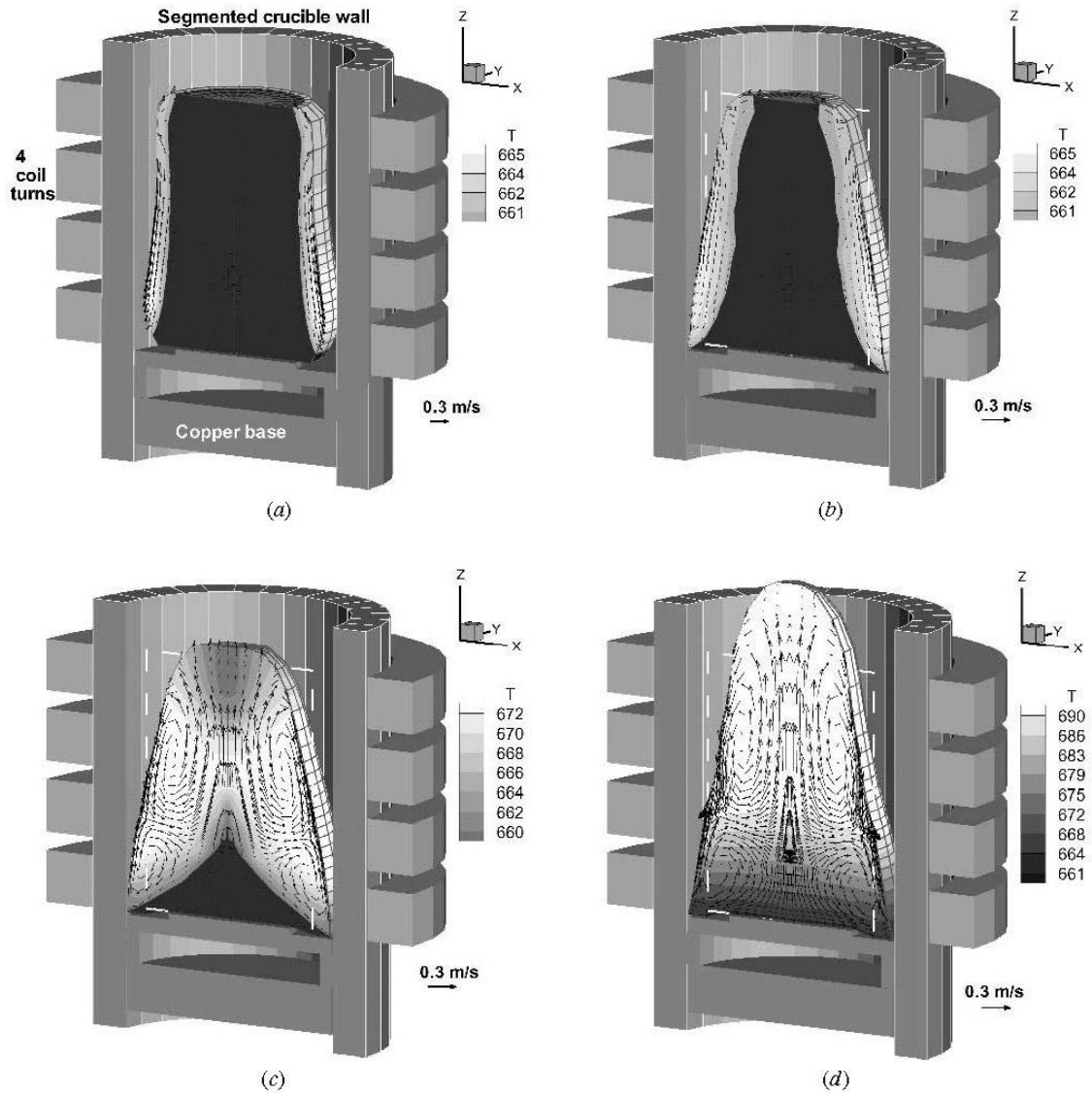
**Figura 14 – Efficienza energetica espressa in percentuale**

Il rapporto tra l'energia effettivamente assorbita per il riscaldamento del materiale e quella impiegata per il funzionamento del crogiolo rappresenta l'efficienza del sistema. I risultati ottenuti sono riportati in Figura 13 ed in Figura 14; si nota come all'aumentare della potenza totale impiegata l'efficienza diminuisce, ed inoltre non sono rilevabili sostanziali differenze tra la fase in cui il materiale è allo stato solido da quella in cui è allo stato liquido. Quando il metallo è completamente fuso e la sua temperatura è stabile si crea un equilibrio tra il calore sviluppato per effetto Joule ed il calore estratto dal circuito di raffreddamento.

La simulazione numerica ottenuta descrive una completa fusione di un campione di alluminio in atmosfera di argon; nella simulazione la corrente negli avvolgimenti viene progressivamente aumentata agendo sulla potenza nominale e sfruttando i dati riportati in Figura 12. I grafici riportano la temperatura e la velocità del metallo rappresentata da vettori.

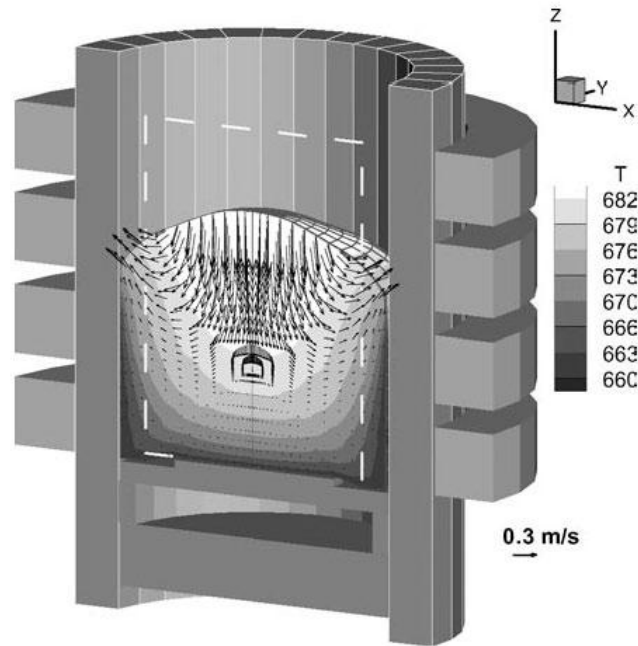
Il primo frame (Figura 15a) rappresenta l'inizio della fusione: con una corrente di 4000

A a 408 secondi la parte di metallo che inizia a fondere è quella sulla superficie cilindrica adiacente agli avvolgimenti; in questa zona il calore sviluppato è maggiore perché è massimo l'effetto delle correnti indotte; lentamente per conduzione termica il calore si distribuisce verso il centro; per effetto gravitazionale lo strato liquido tende a scivolare verso il basso riempiendo lo spazio presente mentre le forze elettromagnetiche, che spingono radialmente verso l'asse verticale, tendono a limitare questo movimento. A 435 secondi e 4900 A (Figura 15b) il metallo fuso riempie la base del crogiolo e da questo momento le correnti indotte tendono a concentrarsi sulla parte bassa della superficie laterale, ovvero quella che si trova ad una distanza minore dagli avvolgimenti. A 525 secondi e 4900 A (Figura 15c) è ancora presente del metallo solido sul fondo del crogiolo mentre iniziano a svilupparsi dei moti turbolenti che sono ora il principale veicolo di scambio termico. Raggiungendo i 838 secondi e 5560 A (Figura 15d) il metallo è completamente fuso anche alla base e l'aumento della corrente porta all'aumento dell'intensità dei moti turbolenti. In fine a 840 secondi viene spento l'alimentatore (Figura 16) ed il metallo liquido si appiattisce. Inizialmente, a causa dei moti turbolenti che rimangono ancora intensi, il raffreddamento è molto veloce ma diventa significativamente più lento quando le pareti diventano solide.



**Figura 15 – Simulazione numerica della fusione di 2.8 kg di Al**

Le prove pratiche hanno rivelato che il modello rappresenta molto bene la situazione ottenuta con il crogiolo reale aiutando così la comprensione dei complicati fenomeni ed interazioni che avvengono durante la fusione. Ciò permette di studiare le specifiche costruttive ed operazionali che possono essere modificate per migliorare il processo. Ad esempio dall'analisi della forma che assume il metallo fuso sottoposto alle forze elettromagnetiche è possibile variare la posizione e distribuzione degli avvolgimenti in modo da minimizzare il contatto con le pareti.



**Figura 16 – Fase di raffreddamento dopo la fusione di 2.8 kg di Al**

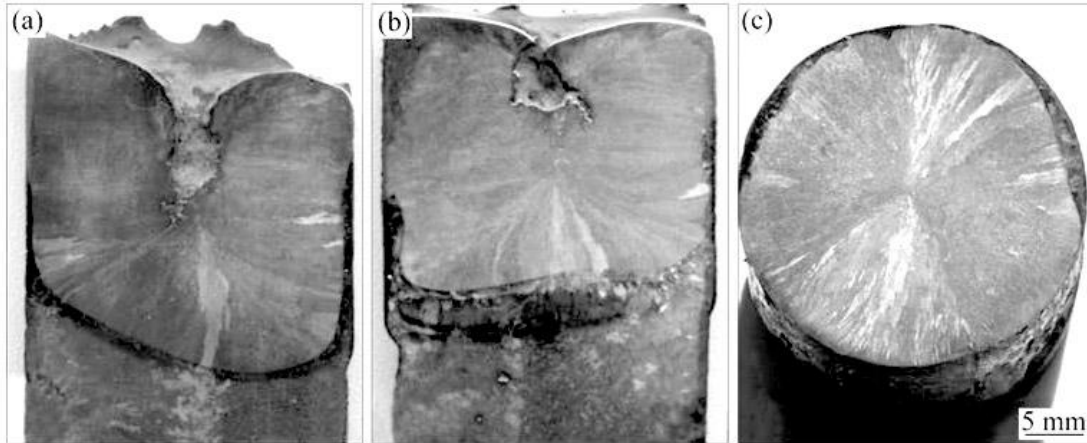
Oltre a quanto già esposto sono stati condotti altri studi; uno di questi ha evidenziato come aumentando la quantità di materiale che viene fuso sia stato possibile raggiungere valori di temperatura più elevati diminuendo, però, la stabilità. Altri esperimenti hanno dimostrato che applicando una corrente costante in ampiezza il surriscaldamento del fuso aumenta all'aumentare della frequenza con una maggiore richiesta di energia; per una potenza di alimentazione costante, invece, il surriscaldamento aumenta al diminuire della frequenza, ma a basse frequenze il metallo fuso tende ad essere instabile. Inoltre è stato possibile verificare che l'impianto di raffreddamento è in grado di sopportare diversi valori di potenza impiegata alla fusione di quantità diverse di metallo.

Un ulteriore studio condotto sfruttando il modello matematico creato per il crogiolo per ISM ha permesso di determinare gli effetti prodotti dall'aggiunta di un campo magnetico statico. Aggiungendo delle spire alla base del crogiolo ed alimentandole con una corrente continua di 10 kA si crea un campo magnetico statico che, contrariamente al campo AC, penetra facilmente all'interno della massa fusa; l'effetto principale che si ottiene è una diminuzione della turbolenza e della velocità del fluido. Questo, oltre a comportare un miglioramento della stabilità superficiale, fa diminuire le perdite di

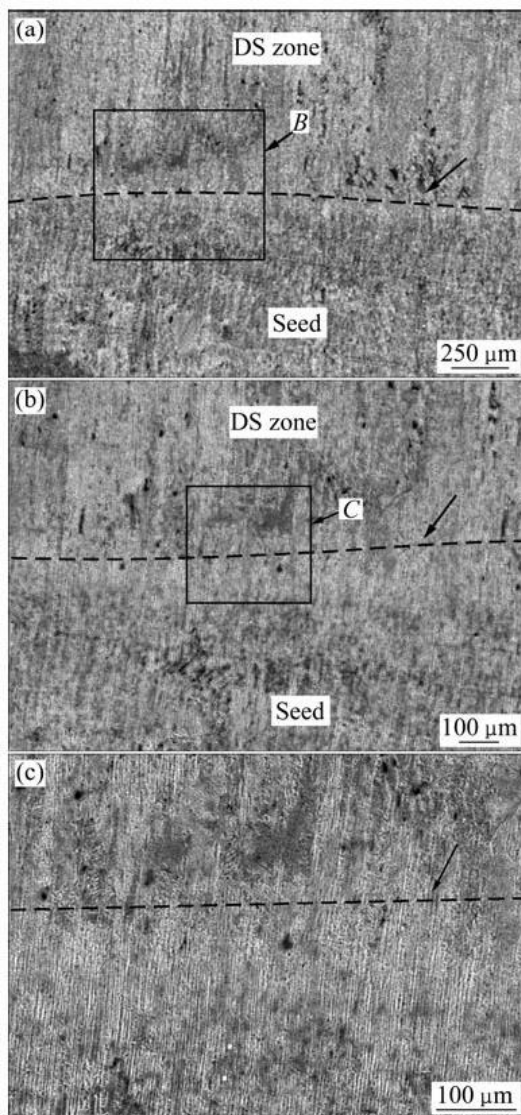
calore dalla base del crogiolo dovute in gran parte al rimescolamento turbolento, migliorando così l'effetto di riscaldamento ed aumentando la temperatura del metallo.

### **3.3 SOLIDIFICAZIONE DIREZIONALE NEL CROGIOLO FREDDO**

Una particolare applicazione del crogiolo freddo, che nel seguente esperimento (rif. [6]) è del tipo a semi-levitazione, consiste nel sfruttare il raffreddamento forzato delle pareti per indurre una solidificazione direzionale del metallo. In questo caso il materiale usato è una lega TiAl; l'obiettivo è quello di ottenere una particolare struttura lamellare, composta da  $\gamma$ -TiAl e da  $\alpha_2$ -Ti<sub>3</sub>, le cui proprietà meccaniche sono considerate ottime. Per avere il miglior risultato bisogna che la struttura lamellare si sviluppi nella direzione adatta per offrire la migliore resistenza del materiale sottoposto ad un carico in una determinata posizione; a questo scopo viene utilizzato il crogiolo freddo per ottenere una struttura che abbia tali proprietà e che sia sufficientemente stabile da essere utilizzata per controllare e semplificare la formazione di nuovi grani con le proprietà richieste. La composizione migliore per questo scopo è basata su una lega TiAl che contenga una quantità di alluminio intorno al 45%; la percentuale di alluminio presente è molto importante e dev'essere scelta opportunamente per permettere il svilupparsi della struttura lamellare. Le due composizioni usate sono: Ti-43%Al-3%Si e Ti-46%Al-1.5%Mo-1.2%Si.



**Figura 17 – Struttura colonnare trasversale ottenuta mediante solidificazione direzionale nel crogiolo freddo**



**Figura 18 – Immagini ottenute con un SEM dell' interfaccia tra la zona di nucleazione e la zona rifusa del campione "D"**

Per rendere efficace la nucleazione e la crescita nella direzione voluta bisogna controllare la temperatura durante la fusione, in modo da mantenerla sufficientemente bassa, e successivamente occorre raffreddare in modo deciso il metallo fuso; a questo scopo viene appunto impiegato il sistema di raffreddamento di un crogiolo freddo. Quello che si vuole ottenere è una struttura colonnare trasversale.

Il campione "A" viene ottenuto con la seguente procedura: il materiale (Ti-43%Al-3%Si) posto all'interno del crogiolo viene riscaldato con una potenza gradualmente aumentata fino a

60 kW; questa potenza è mantenuta per cinque minuti e poi viene azzerata improvvisamente. Altri tre campioni, due dei quali ("B" e "C") formati da Ti-43%Al-3%Si, e uno ("D") formato da Ti-46%Al-1.5%Mo-1.2%Si vengono prodotti riscaldando a 60 kW per tre minuti per poi diminuire la potenza fino a 55 kW per permettere una diminuzione della temperatura. Dopo altri cinque minuti la potenza viene tolta improvvisamente e il materiale viene lasciato raffreddare. L'intera operazione viene svolta sottovuoto.

I primi tre campioni ottenuti (Figura 17) confermano che la struttura colonnare si è ben sviluppata dimostrando l'efficacia del raffreddamento nel crogiolo. Tuttavia nel campione "A" si nota una grande cavità da ritiro, dovuta alla contrazione volumetrica del metallo durante il raffreddamento, che rende inutilizzabile la parte alta del pezzo. Nel campione "B", grazie al controllo della temperatura ottenuto abbassando la potenza di riscaldamento, la cavità da ritiro è molto più piccola ed è presente una zona adatta ad essere utilizzata come base di partenza per la nucleazione in un nuovo processo di solidificazione direzionale. Nel campione "C", sezionato trasversalmente, si possono osservare le stesse condizioni del campione "B".

Per verificare la stabilità della struttura colonnare, il campione "D" viene parzialmente rifuso fino alla zona utile per la nucleazione e poi raffreddato in modo da ottenere una solidificazione direzionale. Quello che si ottiene viene analizzato al SEM (Figura 18); nelle immagine la linea tratteggiata rappresenta l'interfaccia tra la zona originale e quella rifusa ed è possibile vedere come la struttura colonnare sia rimasta la stessa da entrambe le parti; le lamelle hanno mantenuto la stessa orientazione anche dopo la rifusione. Questo significa che la zona scelta è adatta alla nucleazione e la tecnica impiegata ha avuto successo.

Un vantaggio di questo metodo consiste nel fatto che la zona di nucleazione è creata senza effettuare altre lavorazioni meccaniche sul materiale eliminando, così, eventuali contaminazioni semplificando il processo di produzione.

### 3.4 FUSIONE DI UNA LEGA DI TITANIO E TANTALIO

La tecnologia CCLM può essere impiegata per realizzare dei particolari materiali per uso biomedico (rif. [8]). In questo campo sono di particolare interesse le leghe di titanio per la loro ottima combinazione fra biocompatibilità, resistenza alla corrosione e proprietà meccaniche. Al momento le leghe più utilizzate hanno lo svantaggio di contenere elementi come alluminio e vanadio che risultano tossici. Nuovi tipi di lega utilizzano altri materiali come tantalio e niobio che non sono tossici. Tuttavia Ti e Ta (o Nb) sono difficili da combinare per ottenere una composizione solida uniforme. Utilizzando i metodi classici di fusione, come la fusione ad arco o ad induzione, si ha la difficoltà di uniformare una lega composta da metalli che hanno punti di fusione e pesi specifici molto diversi. Il confronto fra Ti e Ta è riportato in Tabella 3. Oltre alla differenza di 11.5 g/cm<sup>3</sup> nel peso specifico e di 1310 °C del punto di fusione si aggiunge il fatto che allo stato liquido questi metalli sono molto aggressivi.

Materiale	Titanio	Tantalio
Punto di fusione	1680 °C	2990 °C
Peso specifico stato solido	4.5 g/cm <sup>3</sup>	16.6 g/cm <sup>3</sup>
Peso specifico stato liquido	4.1 g/cm <sup>3</sup>	15.0 g/cm <sup>3</sup>

**Tabella 3 – Confronto fra Ti e Ta**

Il metodo fin' ora utilizzato per ottenere la lega  $\beta$ Ti voluta consiste nel fondere delle polveri metalliche la cui produzione richiede molti procedimenti. La possibilità di creare questa lega in un unico passaggio utilizzando la tecnica CCLM può portare ad un miglioramento delle caratteristiche di omogeneità della stessa ed ad un abbattimento dei costi di produzione. Infatti grazie al forte *stirring* che può essere generato si può creare una composizione omogenea e, grazie alla levitazione, priva di impurità.



FUJI-CCLM (A)	
Potenza di alimentazione max avvolgimento superiore	30 kHz – 1000 kW
Potenza di alimentazione max avvolgimento inferiore	3 kHz – 1000 kW
Capacità del crogiolo	10000 cm <sup>3</sup> (7000 cm <sup>3</sup> utilizzabili)
Dimensioni del crogiolo	ϕ 260 mm x h 320 mm
Numero di sezioni	30
Tempo impiegato per la fusione	5 min per 50 kg di acciaio
Potenza utilizzata nell'avvolgimento superiore	400 kW
Potenza utilizzata nell'avvolgimento inferiore	200 kW

**Tabella 4 – Specifiche dell'apparecchiature FUJI-CCLM (A)**

L'apparecchiatura utilizzata è la FUJI-CCLM ed è composta da due crogioli; le loro caratteristiche sono riportate nella Tabella 4 e nella Tabella 5.

FUJI-CCLM (B)	
Potenza di alimentazione max avvolgimento superiore	50 kHz – 350 kW
Potenza di alimentazione max avvolgimento inferiore	3 kHz – 100 kW
Capacità del crogiolo	700 cm <sup>3</sup> (500 cm <sup>3</sup> utilizzabili)
Dimensioni del crogiolo	ϕ 120 mm x h 200 mm
Numero di sezioni	20
Tempo impiegato per la fusione	3 min per 2 kg di titanio puro

FUJI-CCLM (B)	
Potenza utilizzata nell'avvolgimento superiore	100 kW
Potenza utilizzata nell'avvolgimento inferiore	50 kW

**Tabella 5 – Specifiche dell'apparecchiature FUJI-CCLM (B)**

In entrambi i casi sono presenti due avvolgimenti: quello superiore, che coinvolge la maggior parte della potenza impiegata, è adibito al riscaldamento e alla fusione del materiale; quello inferiore, invece, è utilizzato per controllare la levitazione. Il crogiolo "B" inoltre è chiuso all'interno di una camera per il vuoto che permette di raggiungere la pressione di  $10^{-3}$  Pa e di introdurre gas inerte, come l'argon, per controllare le condizioni dell'atmosfera durante la fusione e la colata.

L'esperimento è stato condotto utilizzando 850 g di titanio e 150 g di tantalio (Ti-15wt.%Ta), fusi e colati in atmosfera di argon. Per permettere l'uniformazione dei componenti, il materiale è stato mantenuto in levitazione allo stato fuso per 30 minuti. Il campione ottenuto è stato sezionato ed analizzato; le immagini ottenute sono riportate nella Figura 19.

La struttura è piuttosto omogenea, infatti è possibile vedere come in ogni punto dove è stata effettuata la micrografia è presente una quantità costante di tantalio riconoscibile dalla presenza delle zone più scure. Quindi è stato dimostrato che nonostante le differenze delle caratteristiche dei due metalli il risultato finale, ottenuto con un singolo processo di fusione, è compatto e uniforme.

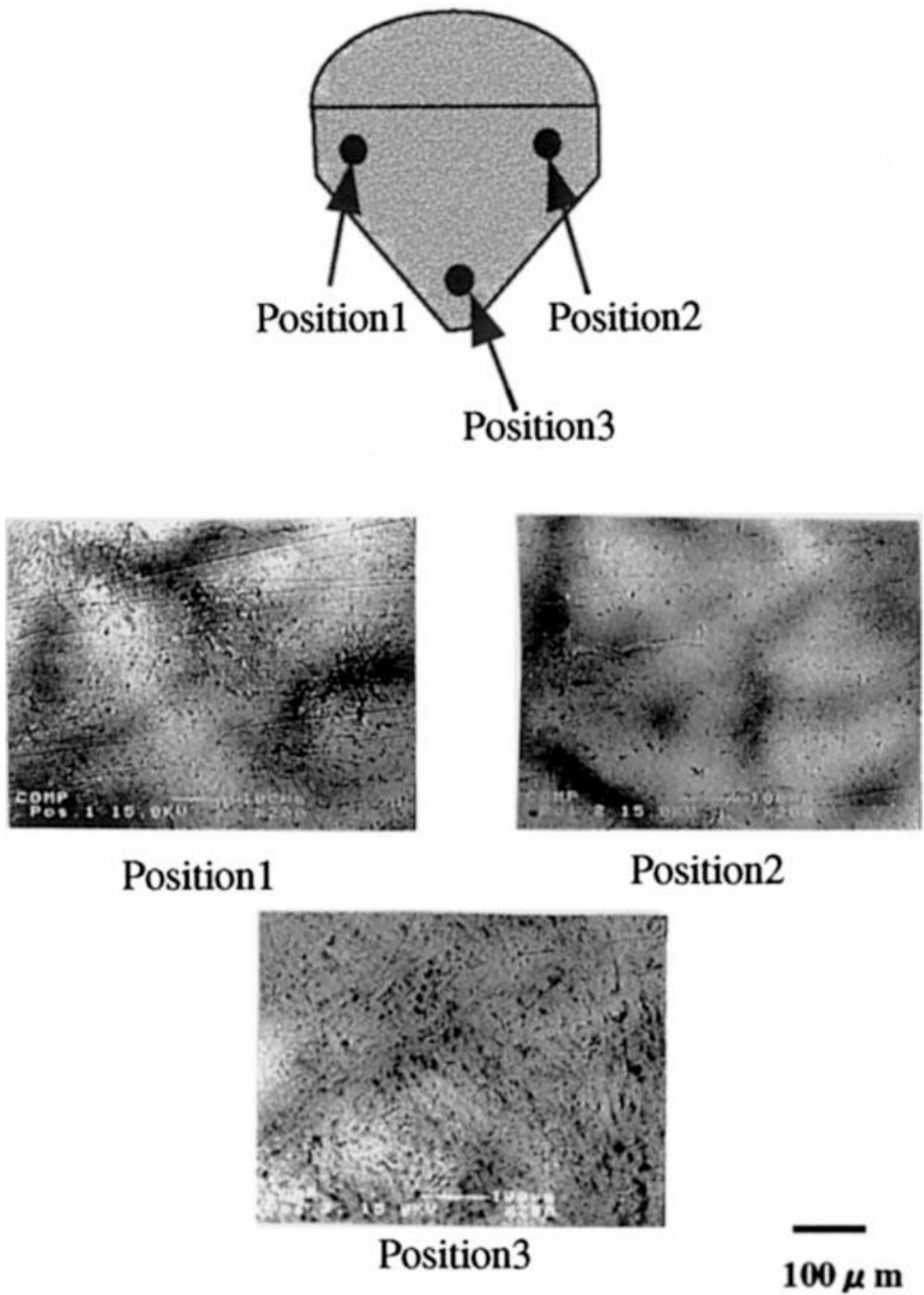


Figura 19 – Microstruttura della lega Ti-15wt.%Ta

### 3.5 REALIZZAZIONE DI BARRE A FASE SINGOLA DI LAVES

Le fasi di Laves rappresentano il tipo di fasi intermetalliche più abbondante; questi composti hanno un'eccellente resistenza alle elevate temperature ed un punto di fusione molto elevato che le rende particolarmente adatte in un impiego strutturale anche sopra i 1000 °C.

Tuttavia molte delle loro proprietà non sono ancora ben capite o documentate sperimentalmente; la causa principale di questa lacuna potrebbe trovare spiegazione nel fatto che queste fasi presentano un comportamento fragile anche alle elevate temperature, il che rende molto difficile la produzione di campioni sufficientemente grandi privi di difetti da poter essere studiati.

Quello che si cercherà di fare nel seguente esperimento (Rif. [12]) è la realizzazione di una lega sufficientemente pura con l'utilizzo di un crogiolo a levitazione magnetica opportunamente modificato per adattarlo alle particolari condizioni richieste.

Il sistema (rappresentato in Figura 20) è costituito da un crogiolo per fusione in levitazione e da un secondo crogiolo, posto esattamente sotto al primo, circondato da una fornace per il trattamento termico; il tutto è rinchiuso all'interno di una camera a vuoto.

Prima della fusione vengono eseguiti dei lavaggi della camera creando il vuoto ed

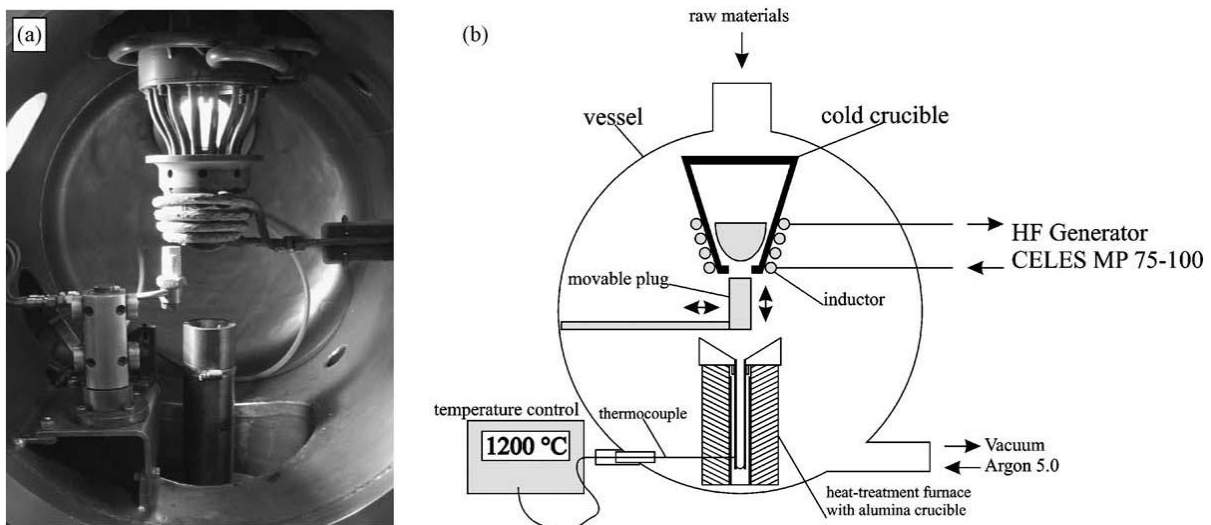


Figura 20 – CCLM modificato e relativa rappresentazione schematica

introducendo dell' argon; l'ultimo lavaggio viene effettuato fino ad una pressione di  $6 \cdot 10^{-5}$  hPa ed inserendo argon fino a 1100 hPa. La leghe ottenute sono dei composti di Nb,Fe,Co,Al e sono state prodotte mantenendo in levitazione per alcuni minuti il metallo allo stato liquido per poi colarlo all'interno del secondo crogiolo preriscaldato a 1200 °C. Questa temperatura è stata scelta in quanto dovrebbe essere superiore a quella di transizione del comportamento fragile-duttile definita intorno al 60-70% della temperatura di fusione. La lega è mantenuta per 45 minuti in queste condizioni per permettere una distribuzione uniforme della temperatura all'interno del crogiolo. Dopo questo tempo si effettua un raffreddamento controllato di 5 K/min.

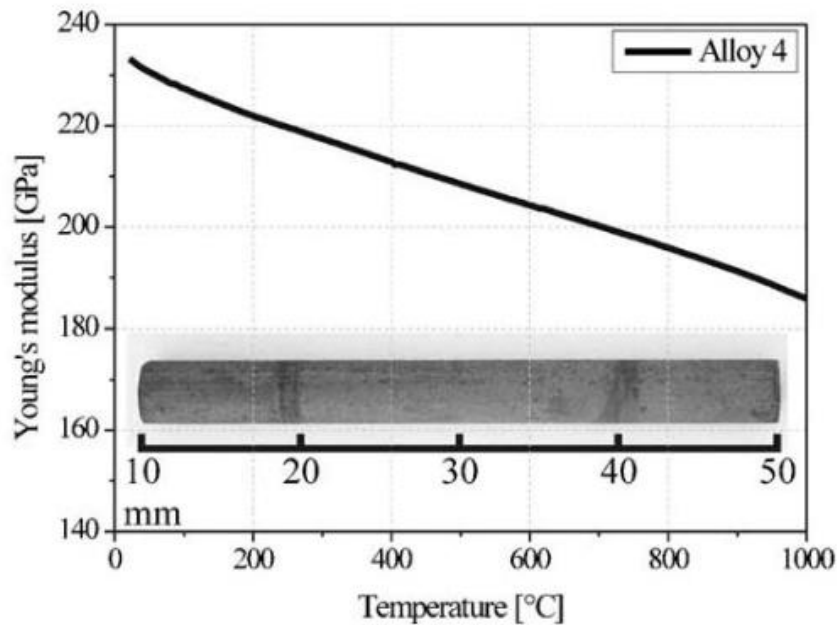
Le fasi prodotte in questo esperimento presentano un alto punto di fusione che va dai 1480 °C del NbCo<sub>2</sub> fino ai 1657 °C del Nb(Fe,Al)<sub>2</sub>.

Inoltre è stato possibile ottenere un fuso omogeneo direttamente dai metalli di partenza senza l'utilizzo di leghe intermedie; tutti i metalli sono stati completamente fusi nonostante le differenze tra le loro proprietà come la differenza di densità fra Nb e Al.

Le barre ottenute di 15 mm di diametro e lunghe fino a 120 mm sono piene e non presentano fratture a livello macroscopico; la dimensione media dei grani ottenuti è di 100 µm e sono presenti solo poche microfratture. E' stato anche osservato che la composizione chimica è omogenea sia all'interno che sugli strati più superficiali della barra ed i carburi e ossidi sono presenti in quantità molto limitata; il confronto tra le analisi chimiche del materiale prima della fusione con quelle del materiale fuso hanno rivelato che il carbonio che ha originato i carburi era presente già nel materiale di partenza e non vi è stato un aumento durante la fusione. La presenza del carbonio e dell'ossigeno in quantità limitate denota il fatto che le fasi di Leaves creatisi sono "pure" in quanto la solubilità delle impurità interstiziali è molto bassa.

In alcuni campioni si possono trovare alcune fasi secondarie, formate in prevalenza da Fe e Nb, che però sono eliminabili attraverso una omogeneizzazione a 1350 °C per 50 ore.

Infine è stato misurato il modulo di Young (v. Figura 21), in funzione della temperatura, della lega NbFe<sub>2</sub> ottenendo un valore di 233 GPa alla temperatura ambiente che decresce linearmente fino a 180 GPa per una temperatura di 1000 °C. Da notare è che la dispersione della serie di dati ottenuti è molto limitata, e questo significa che il



**Figura 21 – Modulo di Young in funzione della temperatura di una lega NbFe<sub>2</sub>**

materiale è privo di difetti significativi che avrebbero causato una dispersione maggiore. E' stato anche verificato che dopo il riscaldamento e raffreddamento a 1000 °C non vi sono state fratture nonostante la fragilità del materiale; ciò significa che non ci sono state microfratture rilevanti durante la fusione.

Con questo esperimento è stato possibile creare per la prima volta dei campioni delle dimensioni adatte per essere analizzati con le macchine di prova per capirne e verificarne le proprietà meccaniche; in particolare è stata stabilita la dipendenza del modulo di Young con la temperatura, descrivendone la dinamica fino a 1000 °C.

## Capitolo 4

### SISTEMA CCLM DEL DTG

Nel seguente capitolo verrà descritto l'impianto sperimentale utilizzato dal Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali (DTG) nella sede di Vicenza dell'Università degli Studi di Padova, presentando , poi, le ultime prove di laboratorio eseguite per studiarne il funzionamento.

#### ***4.1 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO E DEI SUOI COMPONENTI***

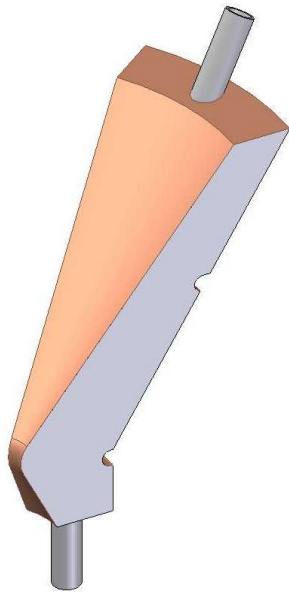
L'apparecchiatura sperimentale è situata nel Laboratorio di Elettrotecnica del DTG. Si tratta di un crogiolo per fusione and induzione e levitazione magnetica di forma conica raffreddato a liquido e dotato di una camera per il vuoto. Il campo magnetico viene generato alimentando un induttore avvolto attorno al crogiolo.

I principali componenti sono:

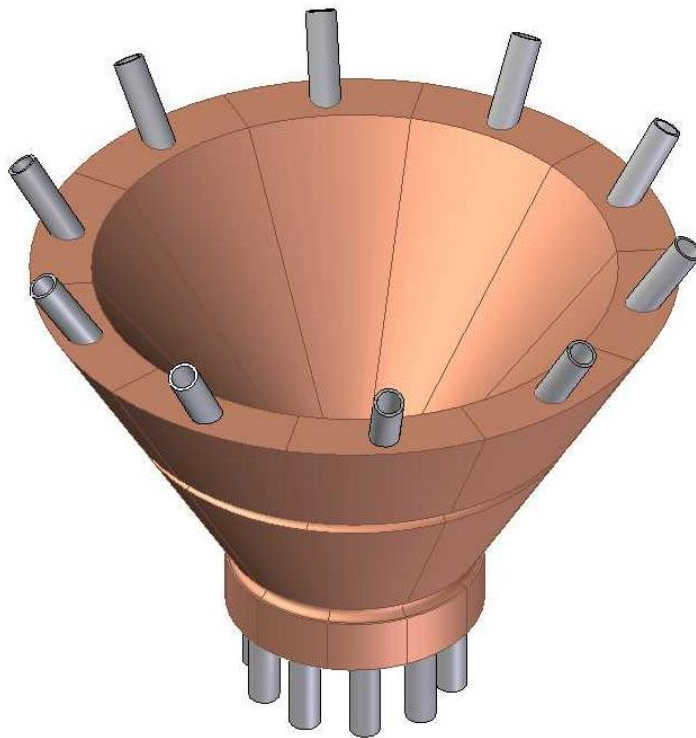
- Crogiolo di rame raffreddato a liquido
- Induttore raffreddato a liquido
- Gruppo condensatori
- Pompa per il liquido di raffreddamento
- Scambiatore a piastra
- Convertitore IFC
- Camera e pompa per il vuoto
- Strumentazioni di misura

#### 4.1.1 CROGIOLO

Il crogiolo è una delle parti fondamentali dell'impianto; come visto in precedenza la sua forma e le dimensioni influenzano direttamente il risultato che si andrà ad ottenere durante il processo di fusione e per questo la progettazione richiede una particolare



**Figura 23 – Una singola sezione del crogiolo**



**Figura 22 – Rappresentazione dell'intero crogiolo provvisto di tubi il raffreddamento**

attenzione. Dopo svariati studi e simulazioni ottenute con l'utilizzo di software ad elementi finiti la geometria scelta è rappresentata in Figura 22. Si tratta di una struttura a tronco di cono con diametro maggiore di 86mm, diametro minore di 10.6mm e altezza di 52.71mm

Il crogiolo è costituito da 10 sezioni in rame Oxygen-free, isolate tra loro tramite del nastro in Kapton. Ogni sezione è provvista di sistema di raffreddamento, costituito da un foro che attraversa tutta la sezione, accessibile tramite due tubi di acciaio che fuoriescono dalle estremità della sezione stessa.

Il crogiolo viene realizzato da un pieno di rame con le specifiche riportate in Figura 24. Successivamente praticando dei tagli con elettroerosione da 0.3mm si ottengono le 10



sezioni da 36°.

Il foro di raffreddamento viene realizzato (si veda la Figura 25) con un diametro di 4mm mentre alle due estremità di 6mm. Ciò permette l'alloggiamento del tubo di raffreddamento di diametro 6mm.

Le due scanalature di diametro 3mm, praticate sul lato esterno del crogiolo, permettono di alloggiare un o-ring che consentirà di mantenere unita l'intera struttura.

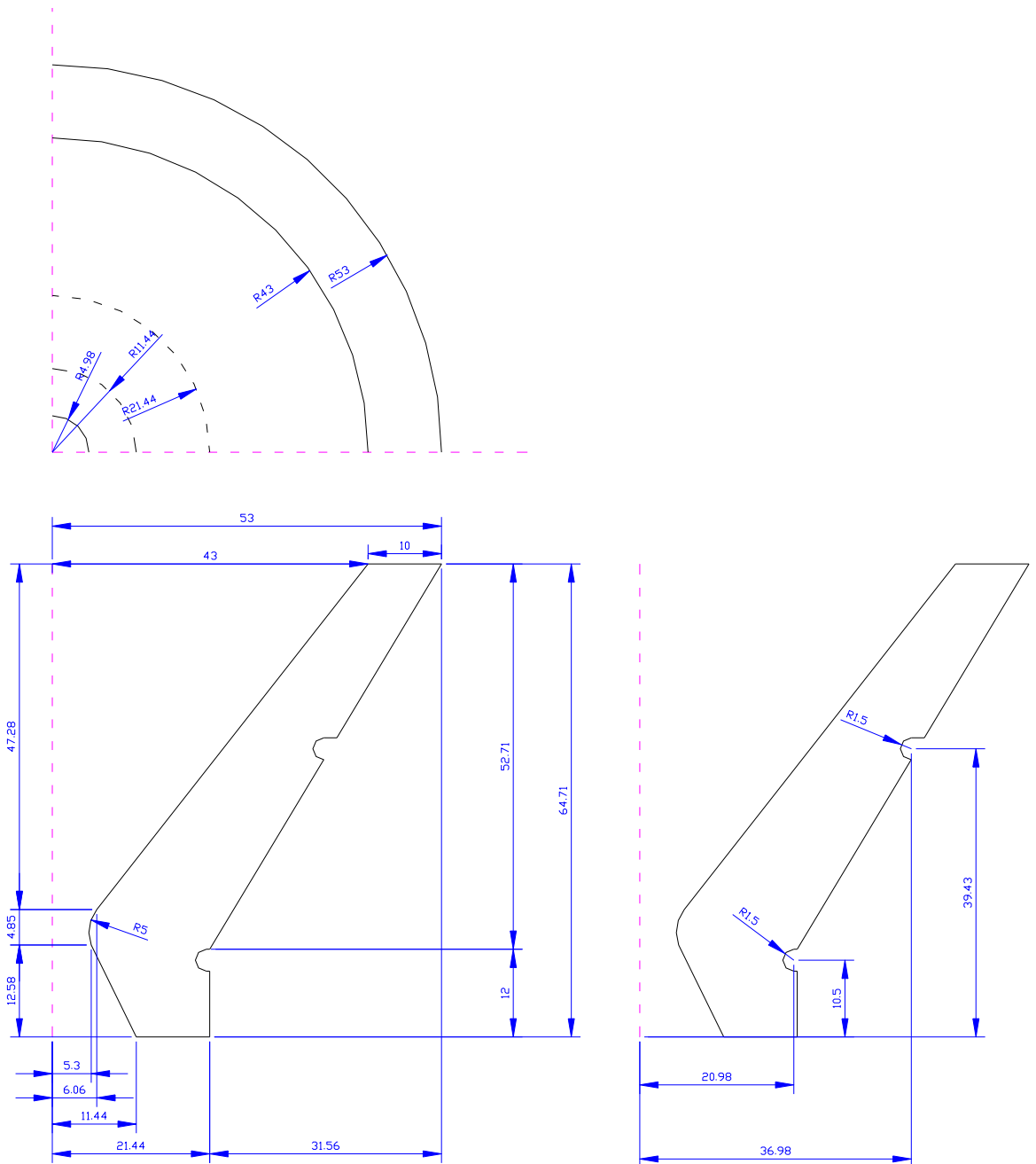


Figura 24 – Quote di realizzazione del crogiolo

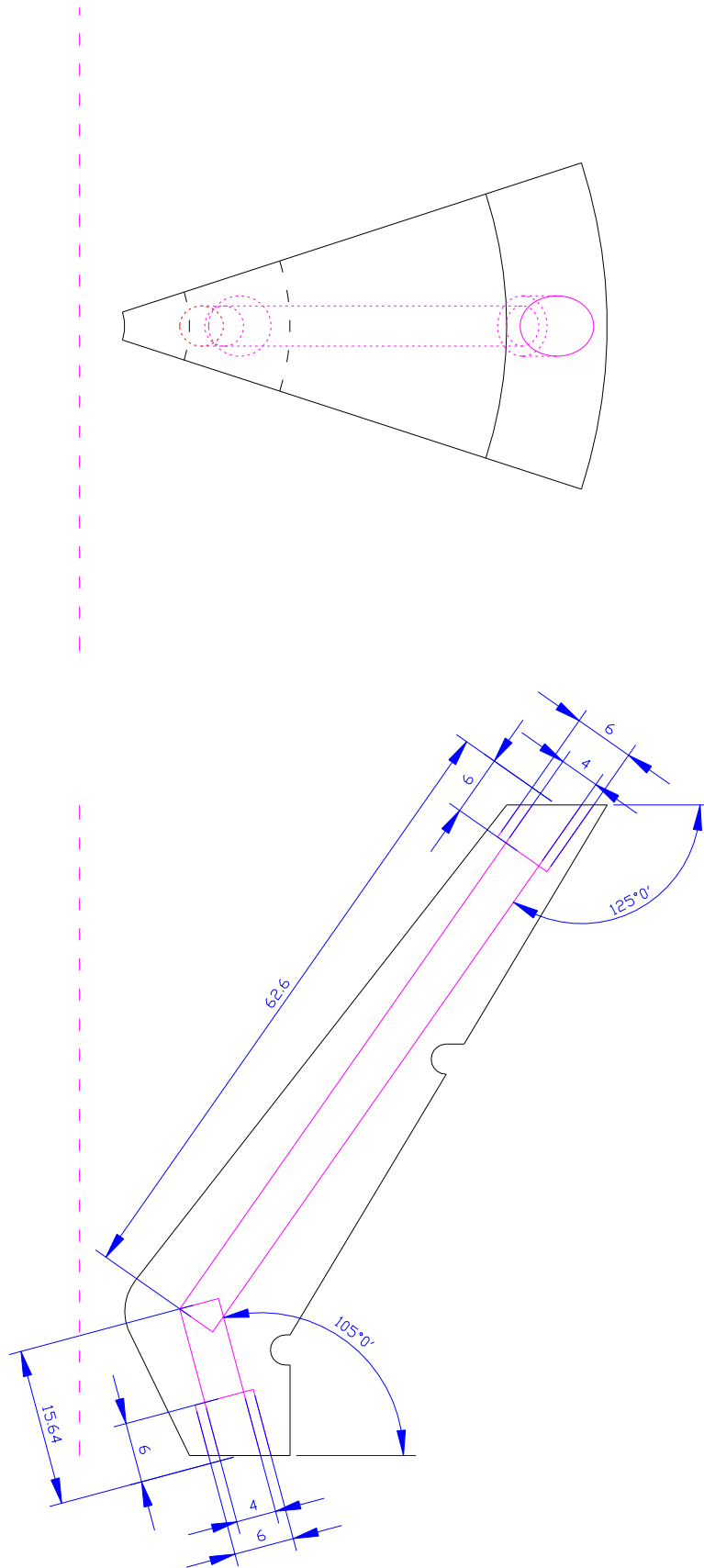


Figura 25 – Specifiche di realizzazione dei fori per il raffreddamento

#### 4.1.2 INDUTTORE ED ALIMENTATORE

Il campo magnetico viene generato alimentando un conduttore cavo con una sezione di 10mm che forma 12 spire avvolte attorno al crogiolo e 2 spire inverse posizionate superiormente per la stabilizzazione.

Gli avvolgimenti vengono alimentati da un convertitore di frequenza ATE IFC-30; i convertitori IFC costituiscono una semplice ma efficace soluzione circuitale che utilizza la flessibilità e l'affidabilità di un inverter a IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) per alimentare sistemi di riscaldamento a media frequenza. Il convertitore MF è formato da:

- Convertitore AC/DC a ponte di Graetz è alimentato dalla linea trifase a 400V;
- Inverter DC/AC che alimenta il circuito ad alta frequenza e relativa scheda di comando; è costituito da 4 coppie di IGBT, ciascuna delle quali è connessa ad un



**Figura 26 – Il conduttore avvolto attorno al crogiolo**

terminale P N dell'alimentatore e p n del carico. Mediante l'attivazione di una coppia di IGBT si ottiene la configurazione Pp-Nn, mentre attivando l'altra coppia si ottiene la configurazione Pn-Np. L'inverter, variando continuamente le coppie di IGBT attive alla frequenza desiderata, alimenta il carico con una corrente che così è diventata alternata ed ad una frequenza controllabile. La frequenza di alimentazione è "agganciata" a quella del circuito risonante per ottimizzare le prestazioni del convertitore.

Inoltre è presente un circuito RC di soppressione delle sovratensioni ed un'induttanza interna che assieme all'induttanza dell'avvolgimento del crogiolo ed al gruppo di condensatori costituisce il circuito risonante.

I dati di targa del convertitore IFC sono riportati in Tabella 6.

<b>ALIMENTAZIONE APPARATO</b>		
Potenza apparente nominale	36	kVA
Tensione nominale ( $\pm 10\%$ )	3x400	V
Frequenza ( $\pm 1\%$ )	50	Hz
Corrente nominale	52	A
Potere d'interuzione	70	kA
Fattore di potenza (a pieno carico)	0,9	
<b>SEZIONE M.F.</b>		
Potenza nominale	30	kW
Tensione nominale M.F.	400	V
Frequenza nominale M.F.	4÷25	kHz
Campo di regolazione della potenza	5÷100	%
Rendimento di conversione	0,9	

**Tabella 6 – Caratteristiche elettriche del convertitore IFC**

### 4.1.3 CIRCUITO ELETTRICO

Nella Figura 27 è rappresentato lo schema elettrico del circuito di alimentazione del crogiolo.

Il circuito risulta essere piuttosto semplice in quanto può essere sintetizzato in un circuito RLC alimentato da un generatore di tensione con un'induttanza in serie.

Nella parte sinistra del disegno è raffigurato uno schema a blocchi del convertitore IFC, descritto nel paragrafo precedente, che viene collegato al carico attraverso un trasformatore d'isolamento 1:1. Il carico è un circuito risonante RLC composto dalla resistenza e dall'induttanza del conduttore avvolto attorno al crogiolo, e dal gruppo di condensatori. Il gruppo di condensatori dev'essere dimensionato a seconda della frequenza di risonanza che si desidera ottenere; ad esempio per far lavorare il circuito ad una frequenza di 17.9 kHz vengono impiegati 3 condensatori: 2 da 8.5 $\mu$ F e uno da 3  $\mu$ F.

Sul conduttore dell'avvolgimento è anche presente una sonda Rogowski utilizzata per la misura della corrente. Le misure di potenza, tensione e frequenza vengono effettuate direttamente all'interno del convertitore IFC e da un collegamento ai capi del gruppo condensatori che funge da feedback per il controllo della frequenza di risonanza.

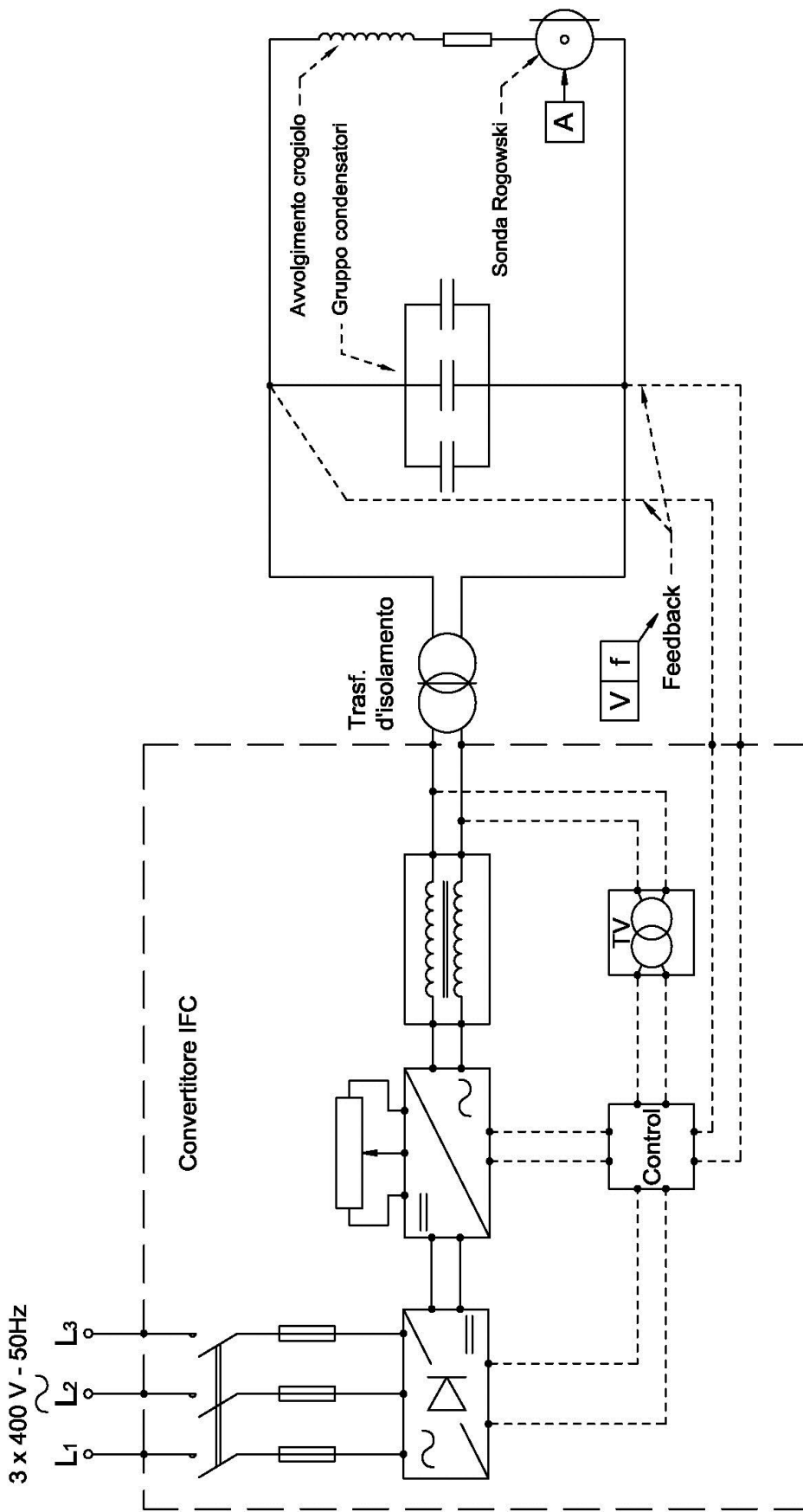


Figura 27 – Schema elettrico del circuito di alimentazione

#### 4.1.4 CIRCUITO IDRAULICO

Il sistema di raffreddamento rappresentato in Figura 28 è di fondamentale importanza perché le potenze in gioco sono molto alte (fino 30kW) ed è necessario raffreddare l'impianto elettrico oltre che il crogiolo stesso.

L'impianto di raffreddamento è costituito da due circuiti, il primo è un circuito chiuso e garantisce il raffreddamento dell'intero sistema, usando come accumulo un serbatoio da 50 litri. Il secondo invece, collegato al sistema idrico, tramite uno scambiatore a piastra 30 kW Cipriani smaltisce il calore accumulato. Il circuito primario è costituito da una pompa centrifuga monogirante (LOWARA CEA 70/5A) che funge da cuore del circuito che viene utilizzato con una portata di 14 l/min. In cascata poi troviamo l'alimentatore composto da Inverter IGBT, induttanza interna e trasformatore di adattamento, in parallelo avvolgimento e crogiolo, scambiatore a piastra ed in fine il serbatoio di accumulo.

<b>CARATTERISTICHE CIRCUITO DI RAFFREDDAMENTO CONVERTITORE IFC</b>		
Portata minima di acqua	1.3	m <sup>3</sup> /h
Pressione min./max. di acqua	3/6	Bar
Min./max. temperatura acqua	20/30	°C
Massima conducibilità elettrica acqua	200	μS/cm
pH	6-8	

**Tabella 7 – Specifiche raffreddamento convertitore IFC**

Il controllo della temperatura del liquido di raffreddamento viene effettuato in sei punti diversi con delle termocoppie e precisamente viene misurata la temperatura all'uscita dell'avvolgimento, all'uscita dai settori del crogiolo, e i due ingressi e le due uscite dello scambiatore. Tutti i dati vengono campionati e raccolti da un apposito software sia allo

scopo di analizzare il processo sia per il mantenimento dei parametri all'interno di un range di sicurezza che permetta di non danneggiare l'apparecchiatura.

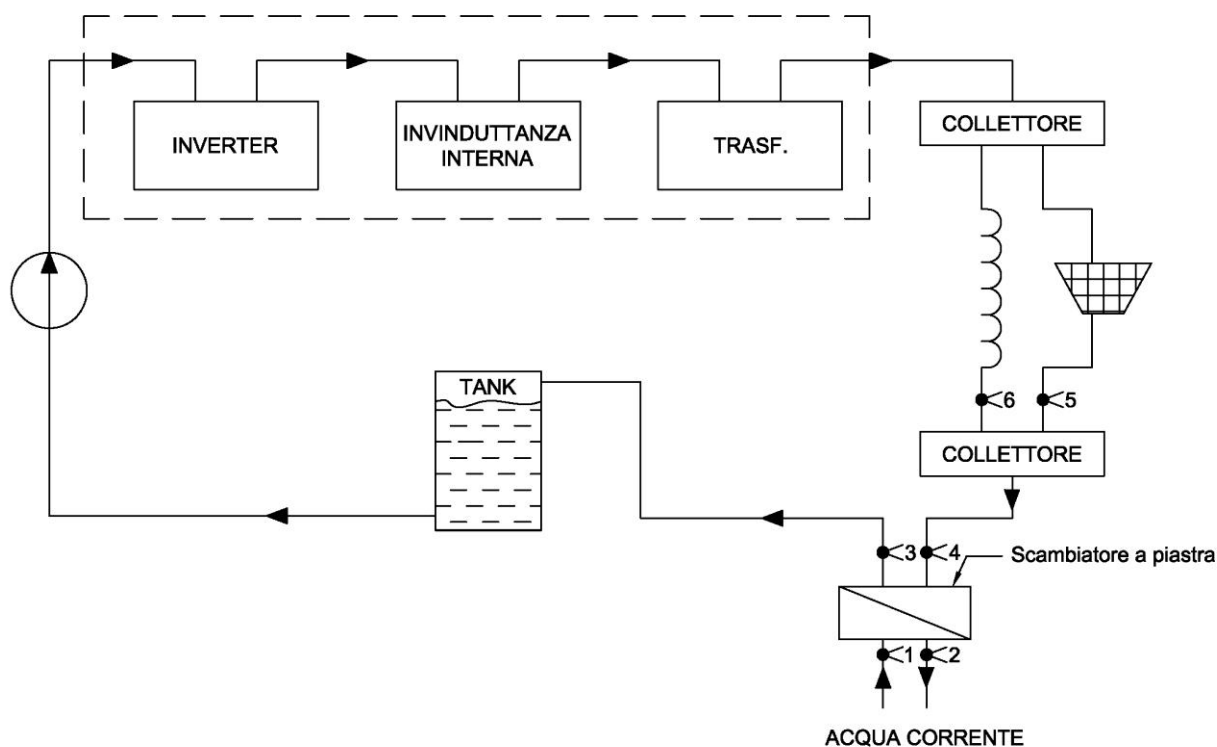


Figura 28 – Schematizzazione del circuito di raffreddamento

#### 4.1.5 CAMERA A VUOTO

Il crogiolo è alloggiato all'interno di una camera a vuoto per poter controllare l'atmosfera che lo circonda durante la fusione. La camera di acciaio inox è stata realizzata secondo lo standard KF e ISO-KF; in particolare sono presenti:

- 2 flange DN 320 ISO-KF che costituiscono il fondo ed il coperchio della camera
- 1 flangia DN 100 ISO-KF sul coperchio munita di finestra in vetro;
- 4 flange DN 100 ISO-KF laterali dotate anch'esse di finestre in vetro;
- 4 flange DN 50-KF applicate al fondo della camera provviste da frange ceche in acciaio inox sulle quali vengono realizzati i passanti per i tubi di raffreddamento, i conduttori di alimentazione, il condotto di misura del vacuometro e il tubo di



aspirazione della pompa Rotary Vane Vacuum Pump TRIVAC C D5E.

Oltre a ciò è stato recentemente aggiunto un tubo per l'insufflazione di gas inerte (Argon) durante la fusione che permette sia di effettuare dei lavaggi per eliminare il più possibile sostanze, come il vapor d'acqua, presenti nell'aria, sia di ottenere una pressione parziale per limitare gli effetti negativi causati dal vuoto mantenendo i vantaggi di un'atmosfera inerte.

#### 4.1.6 STRUMENTI DI MISURA

Le misure che vengono effettuate sono misure di temperatura, pressione, tensione, corrente, frequenza e potenza; la strumentazione utilizzata è costituita da:

- Sistemi di misura interni del convertitore IFC che forniscono una lettura di tensione, corrente, frequenza e potenza di alimentazione;
- Sonda Rogowski;
- Oscilloscopio digitale a 4 canali 200 MHz - LeCroy LT224;
- Unità di acquisizione dati Agilent HP 34970A;
- Sonda per misura differenziale di tensione;
- Vacuometro Catodo freddo / Pirani Adixen ACC 2009 e Digital controller Adixen ACS 2000;

Con l'oscilloscopio vengono misurate la tensione e la corrente dell'avvolgimento induttore.

La misura di corrente viene effettuata con una sonda Rogowski; questo dispositivo è costituito da un conduttore avvolto attorno ad un supporto fino a formare una bobina circolare; il suo funzionamento si basa sulla Legge di Ampère e consente quindi di ottenere una tensione proporzionale alla derivata temporale della corrente che viene misurata. Per ciò il valore di tensione fornito dalla sonda è proporzionale non solo all'intensità della corrente, ma anche alla sua frequenza; per questo sarà necessario modificare il fattore di proporzionalità in base al valore di frequenza utilizzato.

Questa sonda è particolarmente adatta per la misura delle correnti ad alta frequenza in quanto non essendo presente un'anima in ferro ha un'induttanza bassa.

Per attenuare dei disturbi che causano picchi di corrente si utilizza un filtro RC che dev'essere calibrato a seconda del range di frequenza. Per le frequenze utilizzate viene impiegata una resistenza di 100 ohm assieme ad un condensatore da 5.6 nF. L'uscita della sonda così filtrata costituisce uno degli ingressi dell'oscilloscopio.

La misura di tensione dell'avvolgimento, invece, viene effettuata con una sonda per misure differenziali di tensione; il fatto che l'avvolgimento non abbia alcun punto collegato a terra e la tensione elevata a cui è sottoposto impedisce il collegamento diretto all'oscilloscopio. Entrambi i problemi vengono risolti usando una sonda differenziale collegata ai capi dell'induttore. Questa sonda misura la differenza di potenziale fra i 2 punti del circuito e restituisce in uscita una differenza di potenziale proporzionale a quella misurata, scalata di un fattore 1:200, e riferita a massa. In queste condizioni è possibile collegare l'oscilloscopio ed ottenere la misura.

Un altro strumento usato è l'unità di acquisizione. Questo strumento raccoglie i dati provenienti dalle sonde e dalle termocoppie e permette, attraverso un software d'interfacciamento, di inviarli ad un computer per essere monitorati e registrati.

Infine si utilizza un vacuometro, collegato con un giunto ad una delle flange della camera a vuoto, per misurare la pressione appunto all'interno della camera.

## **4.2 PROVE DI LABORATORIO**

Il carattere fortemente sperimentale e l'unicità dell'apparecchiatura ha condotto la sperimentazione verso molte direzioni differenti; i risultati che si possono ottenere con il sistema CCLM dipendono da svariati fattori, ad esempio pressione, temperatura, frequenza, tipo dello stampo ecc.. Nelle prove che verranno descritte si è cercato di capire in che modo alcuni di questi parametri influiscano sul processo di fusione soprattutto per eliminare i difetti riscontrati nei campioni ottenuti.

Il materiale usato per gli esperimenti è alluminio sia nuovo che riciclato.

#### 4.2.1 MISURA DELLA TEMPERATURA DI FUSIONE AL VARIARE DELLA PRESSIONE

Uno degli esperimenti che sono stati svolti riguarda lo studio degli effetti della pressione sui parametri di fusione. In particolare sono state rilevate delle differenze nell'andamento della temperatura a seconda che la fusione venga condotta in vuoto od a pressione atmosferica.

Per studiare tale fenomeno sono state fatte 6 fusioni di cui 3 in vuoto e 3 a pressione atmosferica rilevando con una termocoppia la temperatura del metallo. I dati raccolti sono stati poi analizzati e confrontati.

##### **Rilevamento dei dati**

##### **Prova 1**

Questa prova viene eseguita alla minima pressione raggiungibile.

Viene usato un disco di Al con  $\phi=65\text{mm}$  e massa di 108g ottenuto dalla rifusione di rottami e Al già utilizzato in precedenti prove.

Al momento della fusione i dati rilevati sono stati:

Pressione [mbar]	Temperatura [°C]
$3.4 \cdot 10^{-1}$	543

Tuttavia la termocoppia a causa dei movimenti della massa fusa si è trovata in una zona scoperta per cui la misura non può essere considerata esatta.

##### **Prova 2**

La seconda prova viene eseguita nelle stesse condizioni della Prova 1.

Questa volta la termocoppia viene fissata all'interno di un foro praticato sul materiale

I dati ottenuti sono:

Pressione [mbar]	Temperatura [°C]
$2.4 \cdot 10^{-1}$	655

La termocoppia ha perso il contatto col materiale dopo un minuto circa dall'inizio della fusione.

### Prova 3

Anche questa prova viene eseguita in vuoto ma a differenza delle precedenti si utilizzano 97.6g di EgyptAlu nuovo.

Pressione [mbar]	Temperatura [°C]
$3.1 \cdot 10^{-1}$	647
$3.1 \cdot 10^{-1}$	650
$2.8 \cdot 10^{-1}$	654

### Prova 4

In questa prova si utilizza del materiale riciclato e la fusione viene effettuata a pressione atmosferica.

Il pezzo si è posizionato in modo tale da portare la termocoppia in una zona dove l'effetto del campo magnetico è più debole (all'apice del crogiolo). La misura ottenuta si aggira attorno ai 643-649 °C.

### Prova 5 & 6

Nelle ultime due prove è stato fuso a pressione atmosferica del materiale nuovo.

I dati ottenuti sono:

637 °C per la prova 5 e 645-653 °C per la prova 6.

### **Analisi e comparazione**

Il range delle temperature di fusione può essere dovuto ad imprecisioni di misura. La differenza fondamentale fra le prove in vuoto ed in aria è rappresentata nel grafico di Figura 29. Dal confronto delle temperature si vede che il tempo che intercorre tra l'inizio della fusione e la fusione completa è maggiore per le prove in aria rispetto a

quelle in vuoto. Si è visto, infatti, che la temperatura durante la fusione rimane costante da 60 a 110 sec per le prove in vuoto e da 120 a 160 sec per le prove in aria. Tale differenza può essere spiegata del fatto che il materiale in aria tende a raffreddarsi per scambio convettivo di calore con l'aria circostante mentre in vuoto (almeno idealmente) lo scambio di calore avviene solo tramite irraggiamento; quindi alla pressione atmosferica parte dell'energia termica viene dissipata in aria rallentando il processo di fusione.

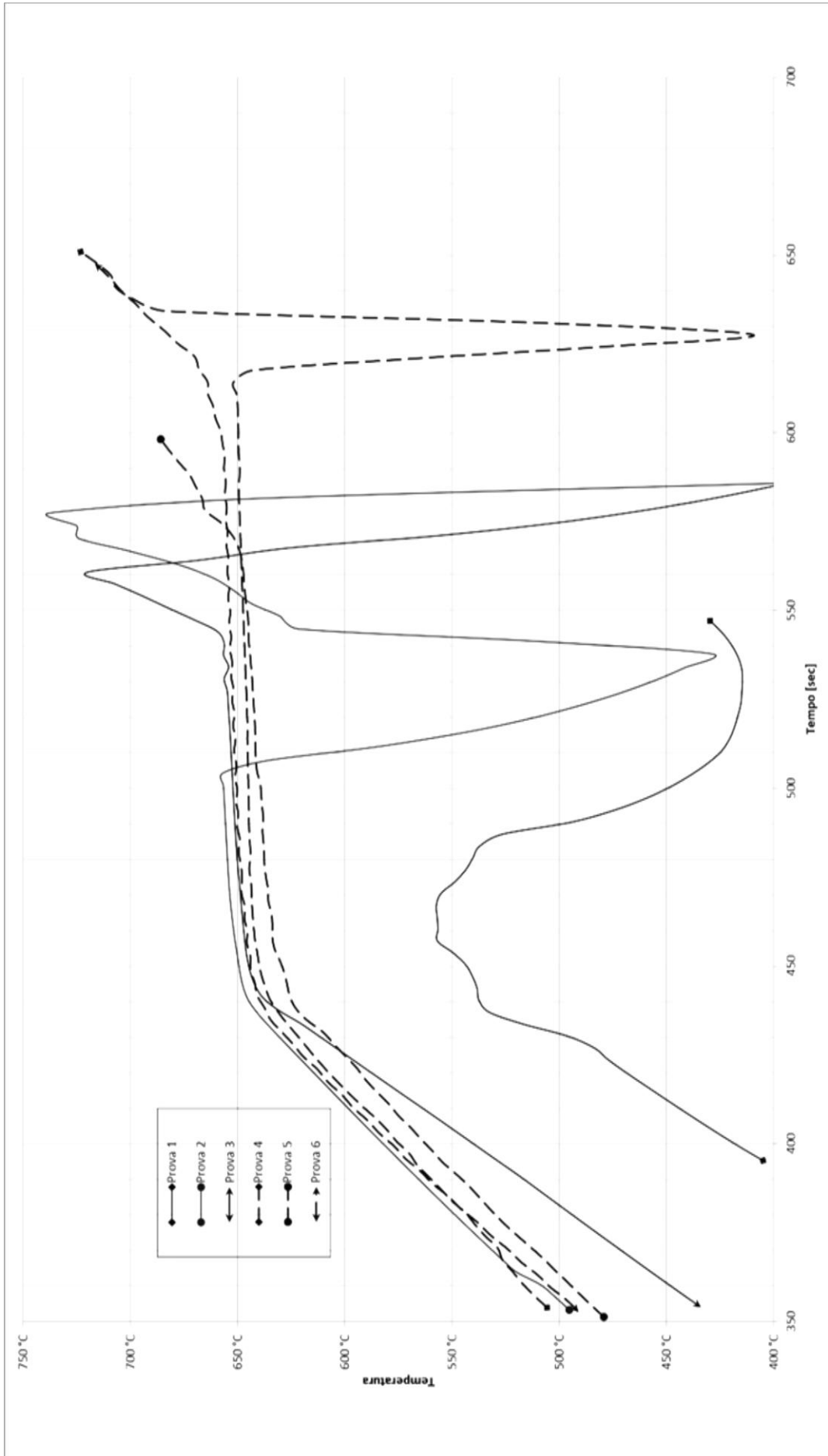


Figura 29 – Grafico di comparazione fra le temperature rilevate in vuoto ed in aria

#### 4.2.2 VARI PROCEDIMENTI DI FUSIONE E COLATA ESEGUITI

Lo studio delle condizioni nelle quali il materiale viene fuso e poi colato è stato condotto effettuando delle prove di laboratorio seguendo procedimenti differenti.

Le principali prove eseguite possono essere così riassunte:

- Prima di iniziare il riscaldamento viene aspirata l'aria fino ad una pressione di 0.3 mbar, poi si effettua la fusione e la colata interamente sotto vuoto;
- Prima di iniziare il riscaldamento vengono eseguiti vari lavaggi con Argon per poi fondere e colare il metallo interamente sotto vuoto ( $P=0.3$  mbar)
- Fusione e colata eseguite in aria;
- Fusione effettuata sotto vuoto mentre la colata viene fatta a pressione atmosferica immettendo aria immediatamente prima di colare;
- Fusione effettuata sotto vuoto e colata in pressione di Argon;
- Fusione e colata effettuate in pressione di Argon e precedute da una serie di lavaggi;
- Fusione e colata effettuate con circolo continuo di Argon (contemporanea immissione di Argon e aspirazione della pompa);
- Fusione e colata a diverse frequenze;
- Fusione e colata a potenza variabile;

Al variare dei procedimenti si può comunque individuare una linea comune nei risultati ottenuti; infatti si nota come i campioni ottenuti con una colata in vuoto appaiono molto più scuri ed opachi rispetto a quelli ottenuti in aria che sono invece più chiari ed argentei. Si nota la differenza osservando la Figura 31 e la Figura 30.



**Figura 31 – Campione ottenuto da una colata in vuoto**



**Figura 30 – Campione ottenuto da una colata in aria**

Per quanto riguarda le colate con pressione di Argon il risultato sembra essere intermedio rispetto ai due già presentati.

Tali differenze possono essere dovute alla formazione di ossidi che si formano in condizione di bassa pressione; altra spiegazione potrebbe essere trovata nella formazione di vapori di alluminio condensati essendo presenti in quantità maggiore al diminuire della pressione.

### **Il problema del vapore**

Un difetto che sembra invece essere comune è la presenza di soffiature dovute alla presenza di gas, all'interno del materiale fuso, che si libera durante il raffreddamento del materiale.

Una delle ipotesi individua come causa di questo problema la presenza di vapore acqueo; infatti se fosse presente del vapore durante la fusione, l'idrogeno verrebbe



“assimilato” dall’alluminio fuso. La solubilità dell’idrogeno nell’alluminio (in prima approssimazione) è tanto maggiore quanto più alta è la temperatura; questo porta che la gran quantità di idrogeno disciolta nel metallo debba ridursi durante il raffreddamento causando le soffiature superficiali che vengono riscontrate nei campioni.

Un primo tentativo di limitare la presenza di vapore è stato fatto effettuando dei lavaggi con gas inerte. Infatti se il vapore presente fosse quello contenuto nell’aria la procedura di lavaggio con argon e il successivo pompaggio fino alla minima pressione raggiungibile dovrebbe eliminare gli elementi che possano interagire con il metallo.

Tuttavia anche operando in questa maniera non si è riusciti ad eliminare le soffiature (v. Figura 32).

A questo punto la presenza di vapore acqueo non è imputabile all’aria e quindi la causa va ricercata altrove; una probabile fonte di vapore potrebbe essere una non perfetta tenuta delle giunzioni dell’impianto di raffreddamento dei vari settori del crogiolo. Per evitare la perdita che si verificherebbe sotto vuoto la fusione e la colata vengono effettuate in pressione di argon; le tre prove eseguite sono le seguenti:

#### Prova 1

Inizialmente viene creato il vuoto all’interno della camera. Poi si spegne la pompa e dell’ argon viene immesso nella camera fino a raggiungere una pressione leggermente superiore a quella atmosferica. Continuando ad immettere gas il coperchio superiore, appoggiato solo per peso proprio, viene alzato leggermente così da far uscire il gas in eccesso e riportare la pressione in equilibrio.

In queste condizioni viene eseguita la prova con una potenza di 15 kW a 9620 Hz. Il riscaldamento del pezzo (167g di alluminio), rispetto alle prove eseguite in aria, è molto lento. Dopo qualche minuto la massa ha iniziato a gocciolare e quindi è stato



**Figura 32 – Campione colato in pressione di argon dopo diversi lavaggi della camera a vuoto**

necessario colare il metallo anche se non si era ancora raggiunta la temperatura adeguata.

Il campione così ottenuto si presenta lucido e simile ai precedenti ottenuti in aria.

### Prova 2

Dati i problemi avuti nella prima prova il campione ottenuto era inutile e così viene fuso nuovamente per effettuare la seconda prova.

Nella prova eseguita ad una potenza di 20 kW a 9610 Hz vengono fusi 136g di alluminio (la differenza in peso rispetto alla prima prova è data dal fatto che è stata tolta la parte di ossido rimasta attaccata al crogiolo durante la prima fusione) si ottiene un campione abbastanza lucido colato dopo aver raggiunto una temperatura sufficientemente alta.



**Figura 33 – Vista dalla finestra superiore della camera a vuoto del metallo fuso mantenuto in levitazione nel crogiolo**

### Prova 3

La terza e ultima prova viene eseguita nelle stesse condizioni della seconda portando ad un risultato del tutto simile.

Questo esperimento ha mostrato un miglioramento delle condizioni dei campioni portando alla decisione di procedere alla modifica dell'impianto di raffreddamento per migliorarne la tenuta in vuoto.

### **Individuazione della frequenza ottimale**

Uno dei risultati che si vuole ottenere è il controllo della temperatura della massa fusa. Infatti la situazione ideale dovrebbe permettere di mantenere il metallo in levitazione senza però scaldarlo eccessivamente. Questo perché all'aumentare della temperatura tendono a peggiorare le proprietà del metallo, in particolare aumenta la solubilità dell'idrogeno arricchendo il fuso di gas non desiderato; inoltre per temperature superiori ai 930 °C lo strato di ossido di alluminio presente intorno al fuso perde la sua natura protettiva.

Per controllare il rapporto levitazione/riscaldamento senza modificare la geometria e la disposizione dell'induttore si può operare sulla frequenza: a frequenze basse prevale l'effetto di sostentamento mentre a frequenze più alte l'effetto riscaldante aumenta in modo più considerevole rispetto a quello levitativo.

Un primo tentativo viene effettuato ad una frequenza di 17kHz:

alimentando il crogiolo con una potenza di 8 kW il materiale viene fuso e la sua temperatura raggiunge i 930 °C mentre si stava già operando per ridurre la potenza a 7 kW. Mantenendo la potenza costante a 7 kW la temperatura è scesa a 750 °C, ma il materiale, a causa delle minori forze agenti, ha iniziato leggermente a gocciolare. Riportando la potenza a 8kW la temperatura è salita fino a 800 °C; dopo 16 minuti il materiale ha iniziato a gocciolare abbondantemente ed è stato quindi colato.

Modificando la configurazione dell'alimentatore installando 4 condensatori da 21  $\mu$ F si ottiene una riduzione della frequenza di lavoro da 17 a 8.2 kHz, e proprio a questa frequenza è stata eseguita un'altra prova:

il metallo è stato fuso con una potenza di 10 kW riuscendo a mantenere la temperatura a circa 750 °C; tuttavia subito dopo il materiale ha iniziato a gocciolare e per questo si ritiene che la scarsa stabilità sia sintomo di una frequenza troppo bassa. Nonostante la temperatura abbia raggiunto un valore ottimale l'impossibilità di mantenere in levitazione il materiale preclude l'utilizzo di una frequenza così bassa perché rende instabile il fuso impedendone la corretta uniformazione.

Il risultato migliore è stato finora ottenuto utilizzando una frequenza leggermente maggiore della precedente impiegando 3 condensatori da 21  $\mu$ F. L'alluminio viene scaldato con una potenza di 12.5 kW a 9.6 kHz; la potenza viene poi ridotta a mantenuta a 9 kW; in questo modo la temperatura si stabilizza per 15 minuti a 920 °C e quindi a 10 °C in meno rispetto prima prova precedenti.

Ciò nonostante si sta ancora lavorando per cercare una frequenza che permetta di controllare e migliorare il processo di fusione.

# CONCLUSIONI

In questa tesi si è visto come, sfruttando i principi fisici che regolano il comportamento del metallo fuso sotto l'azione di un campo elettromagnetico, sia possibile ottenere fusi con caratteristiche particolari e difficilmente ottenibili da altre tecniche di fusione.

Questo permette lo sviluppo e la produzione di materiali innovativi con svariati campi di applicazione. Ad esempio è stato citato il campo biomedico per il quale ricerca e sviluppo sono fondamentali non solo per ottenere materiali con prestazioni migliori, ma anche per abbatterne il prezzo rendendo così più accessibili le cure che utilizzano tali materiali.

Il controllo di una tecnica che sfrutta leggi fisiche molto complesse non è semplice.

Nel corso della ricerca bibliografica in contemporanea allo svolgimento degli esperimenti in laboratorio sono emerse le problematiche descritte nei vari capitoli.

In particolare il problema della stabilizzazione ha richiesto una serie di prove per determinare una frequenza che renda stabile la levitazione; inoltre in letteratura è stata trovata una possibile soluzione che consiste nell'aggiunta di un campo magnetico continuo in grado di migliorare la stabilità.

Scopo di questa tesi era proporre una rassegna degli esperimenti più recenti così da poter raggruppare gli ultimi risultati ottenuti con la fusione CCLM.

Tuttavia, in letteratura, è stata riscontrata una scarsità di materiale nuovo rispetto ai lavori presentati in tesi precedenti. Ciò denota il fatto che le difficoltà tecniche rendano ancora difficile la diffusione a livello industriale di questa tecnica e ciò può aver influito sulla scelta di continuare o meno la ricerca nei vari laboratori.

Ma gli esperimenti più recenti hanno mostrato che materiali ottenuti con la CCLM possono presentare caratteristiche mai viste prima e questo deve senz'altro essere un motivo che spinga i ricercatori ad approfondire le conoscenze e gli studi in questo campo.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] E. FOURREAUX, P. GILLON. *Contactless processing of massive metallic materials. Heating by Internal Source-01* (Padova,2001)
- [2] P. GILLON. *Cold crucible induction melting: theory and applications. Heating by Internal Source-01* (Padova,2001)
- [3] H. TADANO, M. FUJITA, T. TAKE, K. NAGAMATSU, A. FUKUZAWA. *Levitational melting of several kilograms of metal with a cold crucible. IEEE transaction of material* (November 1994)
- [4] V. BOJAREVICS, R. A. HARDING, K. PERICLEOUS, M. WICKINS. *The development and experimental validation of a numerical model of an induction skull melting furnace. Metallurgical and materials transaction – volume 35B* (UK, August 2004)
- [5] HONGSHENG DING, RUIRUN CHEN, JING-JIE GUO, WEI-SHENG BI, DA-MING XU, HENG-ZHI FU. *Directional solidification of titanium alloys by electromagnetic confinement in cold crucible. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology (China, November 2004) - Materials Letters* 59 (2005) 741-745
- [6] HENG-ZHI FU , CHENG-JUN ZHANG, DA-MING XU, JING-JIE GUO, WEI-SHENG BI, YAN-QUIG SU. *Feasibility of integrated seed making and directional solidification of TiAl alloy using cold crucible. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology - College of Materials Science and Engineering, Jiamusi University (China, July 2008) – Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 19 (2009) 330-334
- [7] XUE GUANXIA, WANG TONGMIN, SU YANQING, CAI SHAOWU, XU JINGJING, LI JUN, GUO JINGJIE, LI TINGJU. *Numerical Simulation of Thermal and Flows*

- Fields in Induction Skull Melting Process*. Rare Metal Materials and Engineering – vol. 38 (China, May 2009)
- [8] ARIMICHI MORITA, HISAO FUKUI, HIDEAKI TADANO, SHIZUO HAYASHI, JIRO HASEGAWA, MITSUO NIINOMI. *Alloying titanium and tantalum by cold crucible levitation melting (CCLM) furnace*. Material Science and Engineering A28 (2000) 208-213 (Japan, 2000)
- [9] MITSUO NIINOMI. *Recent Metallic Materials for Biomedical Applications*. Department of Production System Engineering, Toyohashi University of Technology (Japan, April 2001) - Metallurgical and Materials Transactions A – Vol 33A, MARCH 2002
- [10] LOVATO, Tesi di laurea in ing. Gestionale
- [11] D. GONBERT, J. G. RICHARDSON. *Cold Crucible Induction Melter Technology: Results of Laboratory Directed Research and Development*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory (U.S.A, September 2001)
- [12] S. VOB, F. STEIN, M. PALM, D. RAABE. *Synthesis of defect-free single-phase bars of high-melting leaves phases through modified cold crucible levitation melting*. Materials Science and Engineering A 527 (2010) 7848–7853 (Germany, August 2010)
- [13] G. CHITARIN, R. LOSCO. *Report e documentazione interna al Laboratorio di Elettrotecnica del DTG* (Vicenza, 2011)