

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA GESTIONALE**



**TESI DI LAUREA TRIENNALE**

**Sistemi per il rimescolamento  
elettromagnetico di compositi  
metallici allo stato fuso**

**Relatore: Prof. Giuseppe Chitarin**

**Laureando: Fabio Salandin**

**Anno Accademico 2010-2011**



# Indice

<b>Introduzione</b> .....	7
<b>Capitolo 1: Interazione tra campi elettromagnetici e metalli conduttori</b> .....	9
1.1.Introduzione al campo elettromagnetico .....	9
1.2.Definizioni e principi di base .....	11
1.2.1.spessore di penetrazione .....	13
1.2.2.Forze elettromagnetiche nella carica .....	15
1.3.Fenomeni di sospensione magnetica.....	18
1.3.1.Levitazione di un metallo allo stato solido .....	19
1.3.2.Levitazione di un metallo allo stato liquido .....	19
1.4.Condizioni di fusione .....	20
1.5.Effetto di contenimento della carica .....	22
1.6.Lo stirring elettromagnetico .....	24
<b>Capitolo 2: Stirring su crogiolo freddo</b> .....	27
2.1.Sviluppo del crogiolo .....	27
2.1.1.Specifiche costruttive che influenzano l'azione di contenimento .....	28
2.2.Produzione di titanio di precisione con fusione su crogiolo freddo .....	28
2.2.1.Il processo Taramm .....	28
2.3.Effetti sulla microstruttura delle leghe superleggere .....	30
2.3.1.La microstruttura .....	31
2.3.2.Proprietà meccaniche .....	31
<b>Capitolo 3: Lo stirring nella colata continua dell'acciaio</b> .....	33
3.1.Introduzione .....	33
3.1.1.Formulazione .....	33

3.1.2.Nomenclatura .....	33
3.2.Equazioni del campo magnetico .....	34
3.3.Equazioni del flusso .....	35
3.4.Effetto delle condizioni di stirring .....	36
<b>Capitolo 4: Final Solidification Zone Stirring .....</b>	<b>45</b>
4.1.Introduzione .....	45
4.2.Principi del sistema .....	45
4.3.L'esperienza .....	49
4.3.1.L'impianto.....	49
4.3.2.Monitoraggio della temperatura .....	50
4.3.3.Applicazione del campo magnetico .....	52
4.3.4.Valutazione della struttura di solidificazione .....	53
4.3.5.Valutazione dei risultati .....	54
<b>Capitolo 5: Compositi metallici.....</b>	<b>57</b>
5.1.Introduzione .....	57
5.2.Stir Casting .....	58
5.3.Composito Al <sub>3</sub> Ti tramite EMS .....	58
5.3.1.Risultati .....	59
5.4.Omogeneizzazione tramite ultrasuoni .....	60
<b>Capitolo 6: Apparatı industriali .....</b>	<b>61</b>
6.1.Ergolines – Quality Steel Making .....	61
6.1.1.M-EMS(stirrer in lingottiera) .....	64
6.1.2.S-EMS(stirrer in linea o al secondario) .....	65
6.1.3.F-EMS(stirrer al piede) .....	65
6.2.Fuji – CCLM (Cold Crucible Levitation Melting furnace) .....	66
6.2.1.CCLM furnace – apparato A .....	67
6.2.2.CCLM furnace – apparato B .....	68

6.2.3. Analisi condotte .....	68
<b>Conclusioni</b> .....	71
<b>Bibliografia</b> .....	73



# Introduzione

Questa tesi si propone di offrire un percorso logico e utile a chiarire i fenomeni fisici, le scelte tecnologiche e i benefici conseguenti al processo di stirring nella produzione di componenti metallici.

Si tratta di una tecnologia innovativa di notevole interesse e suscettibile di applicazione in diversi campi. Sono principalmente due i sistemi di stirring applicati nel campo della metallurgia: produzione tramite crogiolo e applicazione nella colata continua.

Si chiariscono i vantaggi offerti dal riscaldamento ad induzione, abbinando all'elettromagnetismo generico la trattazione della fusione per sospensione e confinamento magnetico; la produzione negli impianti di fusione convenzionali (crogiolo ceramico) spesso infatti porta ad un'inaccettabile inquinamento della carica a causa delle reazioni chimiche che avvengono con le pareti del crogiolo, responsabili peraltro del rapido deterioramento delle stesse.

Per quanto riguarda l'applicazione di stirrer elettromagnetici nella colata continua è stato in particolar modo approfondito il suo inserimento nella parte finale di solidificazione (FEMS), recente innovazione ai fini del miglioramento della struttura cristallina dei metalli e dunque delle proprietà meccaniche che le industrie metallurgiche esigono per i loro prodotti.

Nel capitolo conclusivo vengono descritti qualitativamente alcuni apparati industriali mettendo in evidenza le tipologie di innovazione introdotte per entrambi i sistemi di stirring descritti nei capitoli precedenti.





# CAPITOLO 1

## Interazione tra campi elettromagnetici e metalli conduttori

### 1.1. Introduzione al campo elettromagnetico

I fenomeni elettrici e magnetici sono governati dalle equazioni di Maxwell che esprimono il legame fra la densità di carica,  $\rho$ , la densità di corrente  $j$ , il campo elettrico  $E$  e il campo magnetico  $B$ . Le equazioni di Maxwell assumono la seguente formulazione, valida per mezzi in quiete:

$$\nabla \times \left( \frac{\vec{B}}{\mu} \right) = \vec{j} + \frac{\partial(\epsilon \vec{E})}{\partial t} \quad [A/m^2]$$

Legge di Ampere

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad [T/m = V \cdot s/m^3]$$

Teorema del flusso per il campo magnetico

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad [V/m^2]$$

Legge di Faraday

$$\nabla \cdot (\epsilon \vec{E}) = \rho [C/m^3]$$

Teorema di Gauss per il campo elettrico

Nei mezzi materiali, la presenza dei campi  $E$  e  $B$  provoca la formazione di cariche di polarizzazione e correnti di magnetizzazione, e di conseguenza le costanti  $\mu$  ed  $\epsilon$  dipendono dai materiali.

Nel trattare gli aspetti elettromagnetici che caratterizzano un sistema di stirring elettromagnetico, le parti componenti il sistema stesso (bobina induttrice, crogiolo, carico metallico fuso) vengono interessate dalle varie interazioni elettromagnetiche. Per tracciare le basi di un modello matematico che le possa descrivere, generalmente ci si riferisce a delle ipotesi preliminari:

- le caratteristiche proprie del materiale si ritengono costanti
- viene trascurato il campo elettrico indotto dal movimento del metallo fuso
- le correnti di spostamento possono essere ignorate

Il campo elettromagnetico si può descrivere ricorrendo alle seguenti equazioni di Maxwell in forma semplificata:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad \text{Legge di Gauss per il campo elettrico}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad \text{Legge di Faraday}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Teorema del flusso per il campo magnetico}$$

$$\nabla \times \left( \frac{\vec{B}}{\mu} \right) = \vec{J} \quad \text{Legge di Ampere}$$

Considerate assieme alle relazioni costitutive:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Legge di Ohm}$$

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

Con  $\mu$  permeabilità magnetica e  $\sigma$  conducibilità elettrica.

Ricorrendo al potenziale vettore magnetico (vettore il cui rotore è pari al campo magnetico stesso) è possibile ricavare un'equazione generale che descrive il campo elettromagnetico, considerando l'effetto delle correnti indotte nel carico metallico, nell'induttore e nel crogiolo:

vettore potenziale A:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0$$

equazione generale:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{J}$$

nella quale J è densità di corrente, comprensiva della componente applicata e di quella indotta.

Introducendo il potenziale elettrico V e sfruttando la legge di Faraday e la legge di Ohm è possibile ricavare la seguente espressione:

$$\text{ricordando} \quad \vec{E} = \frac{-\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V$$

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

Si osserva che il primo termine coincide con la densità della corrente indotta, mentre il secondo si riferisce alla densità di corrente applicata. A questo punto possiamo dunque scrivere:

$$\nabla \times \nabla \times A + \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} = \mu J_s$$

Conducendo un'analisi bidimensionale, nel caso di simmetria assiale, la sola componente coinvolta è quella azimutale  $A_\theta$  e automaticamente si ha

$$\nabla \cdot A = 0$$

L'equazione differenziale cui fare riferimento nella risoluzione può essere riscritta come segue:

$$\nabla^2 A - \mu\sigma \frac{\partial A}{\partial t} = -\mu J_s$$

Fintanto la corrente varia seguendo un andamento sinusoidale nel sistema elettromagnetico, il vettore potenziale può essere convenientemente rappresentato sfruttando la notazione fasoriale.

## 1.2. Definizioni e principi di base

Un induttore a spire di rame nel quale fluisce una corrente alternata di frequenza  $f$  ed intensità  $I$ , genera nello spazio circostante un campo di induzione magnetica  $B$  di frequenza angolare  $\omega = 2\pi f$ . Un materiale posto nelle vicinanze della sorgente di induzione subisce quindi un flusso di campo magnetico alternato. Come conseguenza della legge di Lenz, la reazione ad una variazione di flusso genera delle correnti indotte di densità  $j$  all'interno del materiale, opposte alla corrente dell'induttore e che danno origine ad un proprio campo di induzione magnetica che si oppone a quello applicato. Tale "reazione" è tanto più forte ed efficace:

- quanto più intensa è "l'aggressione" del campo circostante: quando è alta la frequenza  $f$  del campo
- quanto più il materiale è sensibile all'azione del campo: se possiede alta conducibilità  $\sigma$

- quanto più il materiale è in grado di direzionare le linee di flusso: se possiede alta permeabilità magnetica  $\mu$ .

Risolvendo le equazioni precedenti si deduce che le correnti parassite indotte nel pezzo non si distribuiscono in modo uniforme lungo le sezioni trasversali, bensì si concentrano vicino alla superficie. In riferimento ad un corpo omogeneo semi-infinito, soggetto ad un campo di induzione magnetico, la distribuzione delle componenti del campo elettromagnetico e della densità di corrente indotta, obbedisce ad una legge del tipo:

$$S_x = S_0 \exp(-x/\delta)$$

Con:  $S_x$  valore efficace della densità della corrente ad una distanza  $x$  dalla superficie;

$S_0$  valore della densità di corrente alla superficie del pezzo

$\delta$  skin depth

In prima approssimazione, il calore sviluppato dal passaggio delle correnti parassite si può associare alla potenza dissipata nel mezzo per Effetto Joule, che in riferimento ad un generico punto del corpo si considera pari a:

$$P_v = \rho J^2$$

Con:  $P_v$  densità di potenza volumetrica

$\rho$  resistività del materiale

$J^2$  valore efficace della densità di corrente

Quindi l'andamento verosimile della distribuzione della potenza all'interno del materiale, può essere descritta come:

$$P_v = P_{v0} \exp(-2x/\delta)$$

dove  $P_{v0}$  è la densità di potenza calcolata alla superficie.

Nel caso di un corpo piatto, ad esempio, è possibile stimare che il 60% del totale delle correnti indotte fluisca in uno spessore superficiale,  $\delta$ , all'interno del quale la quota di potenza indotta, trasformata in calore, è circa l'86%.

Per altre categorie di corpi (cilindrici, corpi a strato spesso, corpi non uniformi), lo spessore  $\delta$  è parametro di grande importanza, e assieme alle dimensioni del corpo, consente di prevedere l'efficacia del riscaldamento. A titolo d'esempio: un buon

assorbimento di potenza elettromagnetica, e quindi un riscaldamento efficace, può essere raggiunto per un corpo cilindrico quando il diametro (o lo spessore se invece si considera un corpo piatto) non è inferiore al doppio dello skin depth.

### 1.2.1. Spessore di penetrazione

Come precedentemente ricordato, le correnti indotte rimangono confinate in una zona periferica del materiale, in uno spessore superficiale che prende il nome di skin depth, la cui profondità è data dalla formula:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\mu_r f}}$$

$\mu$  permeabilità magnetica ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ )

$\mu_0$  permeabilità magnetica nel vuoto ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ )

$\mu_r$  permeabilità magnetica relativa del materiale

$\sigma$  conducibilità elettrica ( $\sigma = 1/\rho$ ,  $\rho$  resistività del conduttore)

$\omega$  frequenza angolare del campo B agente ( $\omega = 2\pi f$ )

Esso dipende:

- dal valore della frequenza del campo eccitante il pezzo
- dalla temperatura, in quanto definito attraverso  $\sigma$  e  $\mu_r$ , proprietà del materiale che variano con la temperatura secondo una dipendenza del tipo:

$$\sigma = f(T)$$

$$\mu_r = f(T, H)$$

Nella figura seguente viene riportato su scala bilogarithmica l'andamento dello spessore di penetrazione in funzione della frequenza per alcuni materiali. All'interno di questo

spessore, il campo magnetico diminuisce esponenzialmente a partire dalla superficie esterna del materiale e procedendo verso l'interno, fino ad annullarsi in corrispondenza del centro se la dimensione caratteristica della carica risulta maggiore del valore di  $\delta$ .

Questo effetto si può illustrare ricorrendo al parametro di schermatura  $R_\omega$ , definito come

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

con  $L$ , dimensione (lunghezza) caratteristica del pezzo che subisce l'induzione.

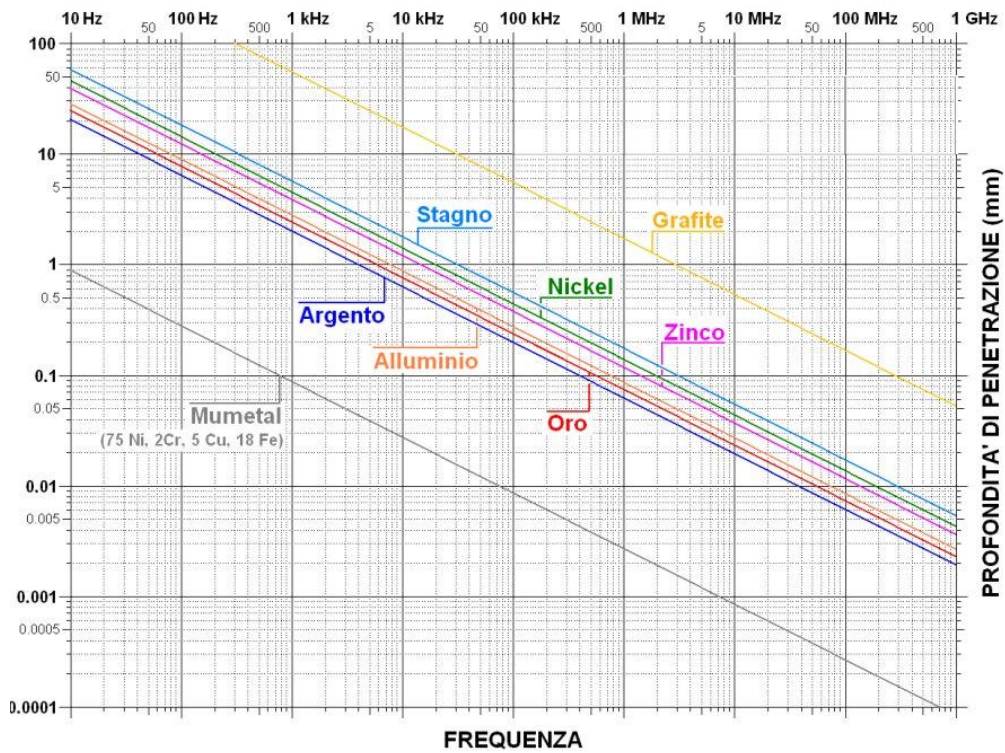


Figura 1.1. Spessore di penetrazione in funzione della frequenza

Dunque, maggiore è  $R_\omega$ , minore sarà lo spessore di penetrazione in riferimento alla dimensione caratteristica.

### 1.2.2. Forze elettromagnetiche nella carica

L'esistenza delle correnti parassite entro lo skin depth porta alla formazione di differenti categorie di effetti:

- un effetto termico, dovuto alla dissipazione di calore per effetto Joule
- degli effetti "meccanici", per l'interazione fra il campo di induzione magnetica circostante, generato dall'induttore, e le correnti indotte nella carica.

La figura seguente mostra una semplice configurazione di un apparato per la fusione per levitazione elettromagnetica che impiega un crogiolo freddo emisferico: crogiolo in rame, raffreddato internamente ad acqua, posizionato all'interno di un unico blocco induttore a geometria cilindrica.

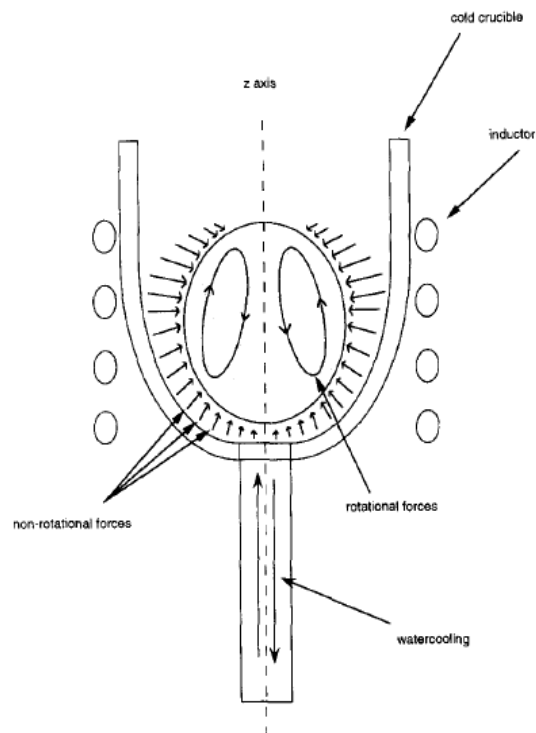


Figura 1.2. Schema di a crogiolo freddo e forze elettromagnetiche indotte nella carica

In riferimento ad esso, le correnti parassite di densità  $j$  indotte seguono una distribuzione radiale e danno origine a Forze di Laplace secondo la formula:

$$\bar{F} = \bar{j} \times \bar{B}$$

F, Forza di Laplace per unità di volume

B, campo di induzione magnetica alternato indotto

Sono forze elettromagnetiche agenti alla superficie della carica che rimangono confinate entro lo spessore di penetrazione elettromagnetica  $\delta$ .

Sfruttando la relazione di Maxwell:

$$\nabla \times \left( \frac{\bar{B}}{\mu} \right) = \bar{j}$$

e inserendola nell'equazione precedente otteniamo:

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

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

Definendo le due parti:

$$F_{rot} = \frac{1}{\mu} (\bar{B} \cdot \nabla) \bar{B}$$

$$F_{irrot} = \nabla \left( \frac{\bar{B}^2}{2\mu} \right)$$

possiamo scrivere:

$$F = F_{rot} + F_{irrot}$$

- $F_{rot}$ , contributo rotazionale: è responsabile del moto all'interno del fuso, dell'effetto di rimescolamento elettromagnetico (electromagnetic stirring), dovuto alla distribuzione delle forze di pressione superficiale non uniforme
- $F_{irrot}$ , contributo non-rotazionale: si esprime come una forza repulsiva fra il metallo fuso e il crogiolo, per la rispettiva presenza di correnti indotte, fra loro opposte, alla superficie di ciascuno.



La componente non-rotazionale di F genera un effetto di pressione che contribuisce a dare alla carica una forma sferica; come forza repulsiva, tende a guidare il materiale fino a raggiungere zone dove le variazioni di flusso sono meno intense; agisce come una forza di “sollevamento” sul fuso e può essere considerata come gradiente della pressione magnetica:

$$P_m = \frac{B^2}{2\mu}$$

Dove B è valore efficace.

Lo studio degli effetti citati nell’ambito di un sistema di fusione elettromagnetica risulta fondamentale per una corretta scelta delle grandezze coinvolte vista la dipendenza che essi hanno con:

- l’intensità del campo magnetico applicato: altri valori rispondono all’esigenza di sospensione della carica e sono collegati alla quantità di energia termica trasferita alla massa
- frequenza f del campo
- caratteristiche fisiche del materiale in esame: resistività, viscosità, densità.

La produzione di calore all’interno della massa è dovuta alle correnti parassite, e sempre ad esse si devono l’effetto di sospensione e rimescolamento all’interno del fuso. Dipendendo dal medesimo fenomeno, questi effetti sono fortemente accoppiati fra di loro e lo studio del sistema globale elettromagnetico risulta estremamente complesso ed articolato. Come precedentemente ricordato, i fattori che vanno fra loro combinati per poter specificare anche solo lo skin depth, si riferiscono a specifiche fisiche del materiale su cui si lavora, al legame che le stesse hanno con la temperatura e alla frequenza di lavoro. La frequenza è infatti un parametro chiave nell’accoppiamento delle varie interazioni esistenti nel sistema; una sua corretta scelta permette di controllare l’intensità di ciascun effetto indotto dal campo alternato. Per ciascun effetto voluto è possibile scegliere un valore ottimale della frequenza in modo da promuoverne la superiorità di uno rispetto agli altri.

La figura che segue mostra l’andamento generale di ogni effetto in funzione della frequenza evidenziando l’ottimo ( $F_{opt}$ ); andamento che non viene rispettato dalla pressione magnetica alla superficie. Per l’effetto di pressione il valore ottimale della frequenza va stabilito seguendo altre considerazioni (come ad esempio le perdite di calore nell’induttore) in quanto aumentando la frequenza l’effetto di pressione non cresce direttamente con essa.

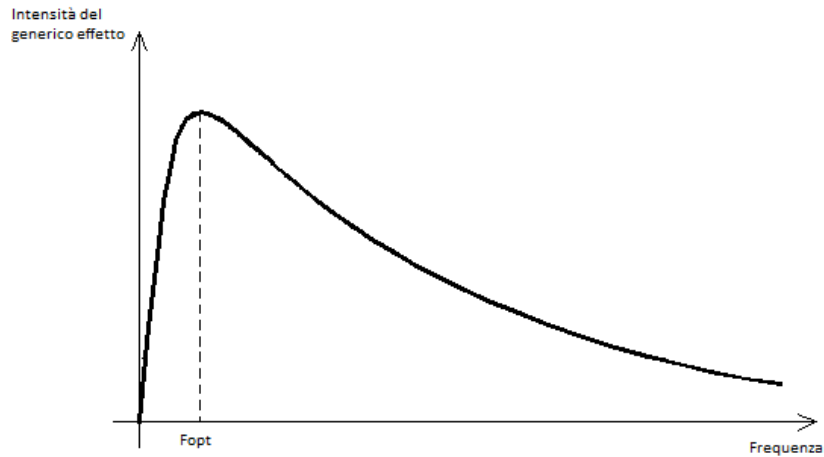


Figura 1.3. Generico andamento degli effetti in funzione della frequenza

Al valore di ottimo della frequenza è possibile far corrispondere un valore del parametro di schermatura  $R_\omega$ , precedentemente introdotto, che esprime inoltre l'intensità relativa fra la componente della forza elettromagnetica nella carica responsabile della sospensione e la componente rotazionale.

Vale infatti:

$$(R_\omega)^{1/2} \approx \frac{|F_{irrot}|}{|F_{rot}|}$$

### 1.3. Fenomeni di sospensione magnetica

Per realizzare le necessarie condizioni di sospensione di un metallo si devono indurre forze elettromagnetiche tali da contrastare la forza di gravità; l'elevato valore ottimale di  $R_\omega$  chiarisce infatti l'esigenza di una risultante netta non rotazionale, diretta verso l'alto, predominante rispetto all'altra componente.

Prima di considerare la soluzione adottata nei moderni apparati di fusione per levitazione elettromagnetica, è opportuno ricordare le condizioni che realizzano la levitazione di un corpo metallico quando questo si presenta rispettivamente:

- allo stato solido
- allo stato liquido

### 1.3.1. Levitazione di un metallo allo stato solido

Nel caso di un solido, la levitazione può avvenire se il valore dell'intensità del campo magnetico è sufficientemente elevato rispetto alla forza di gravità, e l'assetto d'equilibrio viene raggiunto quando la distribuzione della pressione magnetica alla superficie bilancia il peso del materiale:

$$\int_s \frac{B^2}{2\mu} ds = \int_v \rho g dV$$

dove :

- $\rho$       densità del conduttore  $g/m^3$   
 $g$       accelerazione di gravità  $m/s^2$   
 $V$       volume del solido considerato  $m^3$

Si nota come il valore del campo di induzione magnetica necessario possa esser ridotto intervenendo su altri parametri e in particolare sulla frequenza, scegliendo un'opportuna pulsazione angolare.

### 1.3.2. Levitazione di un metallo allo stato liquido

La sospensione di un carico allo stato fuso presenta diverse difficoltà specie in riferimento alle condizioni che devono essere soddisfatte; il mantenimento della stabilità del liquido sospeso dipende fortemente, sempre nel caso di levitazione magnetica, dai seguenti fattori:

- la distribuzione della pressione magnetica alla superficie
- la stabilità di massa
- la stabilità di superficie

Mentre la distribuzione della pressione magnetica è richiesta per bilanciare la distribuzione della pressione idrostatica in ogni punto della superficie del fuso, la stabilità di massa e di superficie si riferiscono rispettivamente:

- alla capacità del levitatore di mantenere in sospensione il fuso come un tutto, in condizioni di equilibrio, qualora subisse degli spostamenti verticali o laterali e di riportarlo nella posizione originaria
- alla capacità del levitatore di compensare le eventuali instabilità superficiali, note anche come instabilità gravitazionali che si manifestano soprattutto nella parte inferiore della superficie del carico e che portano ad un indesiderato fenomeno di “gocciolamento” del metallo nel caso in cui non vengano opportunamente compensate.

Nel passaggio di una carica da una prima configurazione solida allo stato fuso, il controllo di questi fattori è determinante per il corretto monitoraggio del processo: una volta che il metallo è allo stato fuso intervengono poi vari cambiamenti a livello di interazioni elettromagnetiche e fra i fenomeni indotti, quello maggiormente importante è la configurazione della superficie fluida, libera di aggiustarsi secondo le pressioni che vengono su di essa esercitate, e responsabile della forma che il fluido sospeso assumerà, forma sconosciuta a priori.

#### **1.4. Condizioni di fusione**

Un sistema elettromagnetico in grado di attuare la fusione per levitazione elettromagnetica deve garantire:

- un trasferimento di calore al corpo di entità sufficiente a indurre la fusione del corpo stesso
- un'opportuna intensità della risultante delle forze repulsive alla superficie che attuano la sospensione del metallo allo stato liquido (lifting force)
- una distribuzione delle forze magnetiche di confinamento, quindi di pressione magnetica alla superficie, tale da effettuare il distacco e mantenimento della configurazione “sospesa” della carica durante il processo
- l'assenza di contatto tra il fuso e pareti del crogiolo onde precludere fonti di impurità.

Riprendendo le condizioni elettromagnetiche che si realizzano nella fusione in crogiolo freddo, di seguito vengono riportate delle osservazioni che ne evidenziano le peculiarità:

- la presenza del crogiolo freddo, costituito da più sezioni distinte, comporta che il campo di induzione magnetica non ammette simmetria assiale salvo che in corrispondenza della parete interna dell'induttore, dove l'effetto del crogiolo è trascurabile rispetto a quello dell'induttore
- le linee del campo magnetico alternato (prodotte dal solenoide esterno) raggiungono l'interno del crogiolo entrando attraverso il foro inferiore per poi passare tra fuso e pareti ed uscire dall'alto. Questo è reso possibile dal crogiolo che essendo sezionato non costituisce una spira in cortocircuito. Tuttavia, essendo molto conduttivo e non potendo a sua volta essere attraversato dalle linee di campo, 'strizza' e 'congela' il flusso fra il metallo e il crogiolo stesso.

Nel caso in cui il crogiolo contenga direttamente la carica da fondere, senza l'interposizione di alcun strato di isolamento, non è garantita l'assoluta purezza del bagno fuso a causa delle possibili interazioni fra fuso e pareti del crogiolo.

In questa condizione di fusione, le correnti indotte, responsabili di fornire la potenza utile alla fusione, agiscono solo in una piccola regione affiancata alle fessure: la potenza trasferita alla carica non dipende tuttavia dal numero di fessure del crogiolo anche se una distribuzione più uniforme della potenza ridurrebbe sensibilmente i tempi di fusione in quanto se concentrata in porzioni limitate del materiale obbliga all'attesa della trasmissione del calore verso le parti più interne della carica.

Nel caso della fusione con strato cristallizzato, viene interposto uno strato solido tra la carica e la parete del crogiolo. Tale strato si può formare per il contatto del fuso con la parete fredda del crogiolo oppure per l'uscita del fuso dalla zona d'azione della sorgente di calore, così che una sua porzione solidifica. Può anche essere costituito da un apposito rivestimento interno al crogiolo, ad esempio un ossido  $Al_2O_3$  o  $ZrO_2$ , generalmente impiegato per la fusione di metalli o leghe.

In questo modo si garantisce la purezza del contenuto del fuso: lo strato si comporta come un recipiente, contenuto all'interno del crogiolo che contiene a sua volta il fuso.

Nella fusione per levitazione magnetica, la limitazione delle perdite per trasmissione di calore dalla massa fusa alle pareti del crogiolo si ottiene con uno strato isolante d'aria, generato dalle forze magnetiche repulsive alla superficie della carica.

## 1.5. Effetto di contenimento della carica

L'insieme delle forze che caratterizzano lo stato della carica, oltre che quelle responsabili degli effetti citati nei paragrafi precedenti, comprende anche le forze elettrodinamiche, note come EDF (Electro Dynamic Forces). L'andamento di tali forze segue le oscillazioni della corrente alternata, ma con una frequenza pari al doppio di quella della corrente.

Un effetto dell'azione di queste forze è l'effetto di contenimento della carica, principalmente sfruttato in condizioni di fusione per semi-levitazione e levitazione elettromagnetica.

La pressione del campo magnetico agente alla superficie del bagno fuso tende a dirigere il fuso, a spingerlo verso l'interno del crogiolo, realizzando così l'effetto di contenimento (pinch effect).

Tale condizione di confinamento elettromagnetico è anche una diretta conseguenza delle interazioni che avvengono fra il fuso e le forze elettromagnetiche coinvolte nell'intero processo e che dipendono anche dalla particolare geometria del crogiolo.

Di seguito viene riportato il risultato di un lavoro di simulazione che evidenzia il passaggio attraverso alcune configurazioni della carica durante il processo di fusione fino a raggiungere la tipica forma caratteristica dovuta all'effetto di confinamento elettromagnetico.

Sono stati selezionati alcuni fotogrammi dalla sequenza continuativa della simulazione animata per evidenziare alcuni importanti passaggi.

In particolare si osserva:

- il trasferimento di calore dall'induttore alla carica inizia dagli stati più esterni; questa fase coincide con il trasferimento di energia verso il materiale allo stato solido contenuto nel crogiolo, dovuto all'iniziale trasferimento di potenza utile verso la carica (figura 1.4).
- in un generico momento durante il transitorio termico, le forze interne alla carica, che guidano il movimento della massa durante il riscaldamento, si trasmettono agli strati interni per attrito viscoso (le forze elettromagnetiche all'interno della carica agiscono entro lo skin depth); il calore agli strati più interni si propaga durante questo transitorio e le forze coinvolte continuano a variare la configurazione d'equilibrio del menisco (figura 1.5).

- la tipica forma raggiunta dalla carica per l'effetto di contenimento, il pinch effect (figura 1.6).

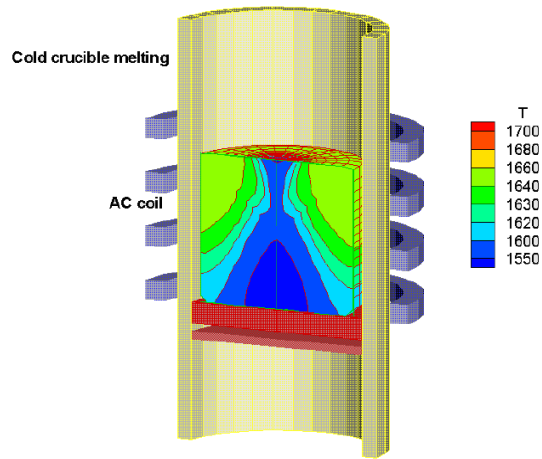


Figura 1.4

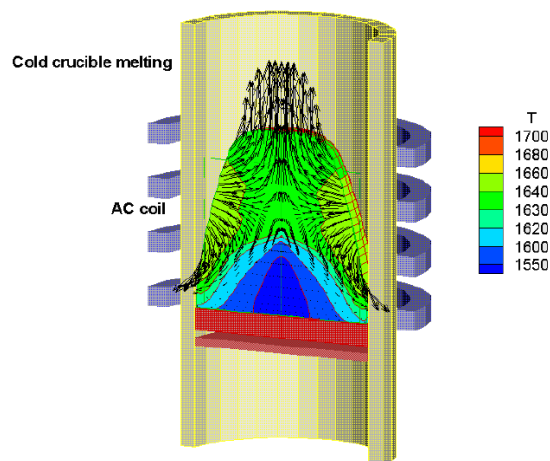


Figura 1.5

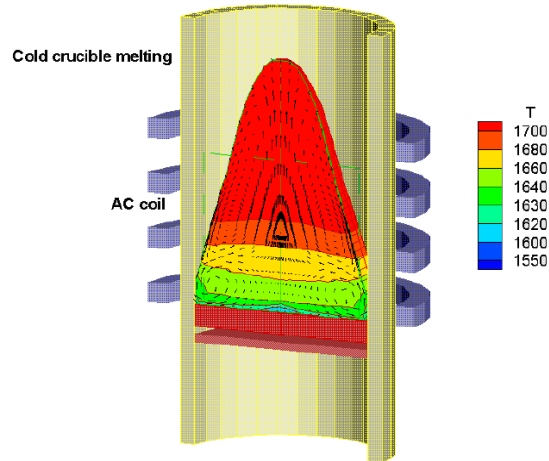


Figura 1.6

I fotogrammi riportati derivano da una simulazione condotta sfruttando il metodo agli elementi finiti (F.E.M) e fanno chiaramente riferimento al processo di fusione per semilevitazione magnetica.

### 1.6.Lo stirring elettromagnetico

Quando una corrente elettrica  $j(x,t)$  percorre un corpo conduttore, sia esso solido o liquido, in presenza di un campo magnetico  $B(x,t)$ , si dà luogo ad una forza  $F = j \times B$  (forza di Lorentz), che agisce sul conduttore. In generale, questa è una forza di tipo rotazionale e, se il conduttore è liquido, non può essere compensata da un gradiente di pressione. In tali circostanze, il liquido deve muoversi in “risposta” alla forza. In semplici termini questo è il principio dello stirring elettromagnetico.

Consideriamo un liquido incompressibile chiuso in volume  $V$ , di superficie  $S$ , e sia  $V^+$  la regione esterna. All'interno del conduttore,  $B$  e  $j$  sono messe in relazione dalla legge di Ampère:

$$\mu_0 j = \text{rot} B, \quad \nabla \cdot B = 0 \quad \text{con } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$



Il campo magnetico può disporre di sorgenti esterne, ad esempio le correnti delle bobine installate nel dominio esterno  $V^+$ ; come situazione generale si può considerare quella illustrata in figura 1.7.

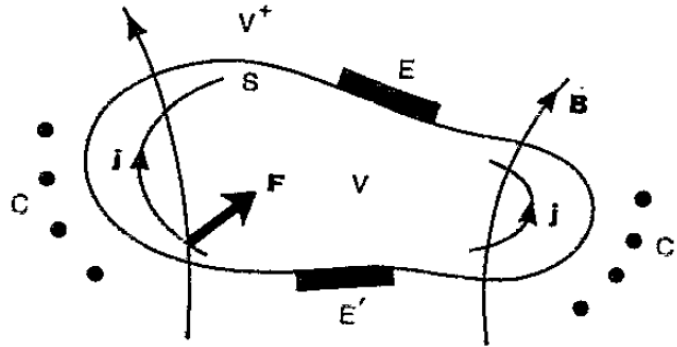


Figura 1.7

Le correnti nelle bobine esterne  $C$ ,  $C'$  indurranno, secondo la legge di Faraday, una distribuzione di corrente all'interno del conduttore. Questa corrente può essere incrementata attraverso la differenza di potenziale tra gli elettrodi  $E$ ,  $E'$  inseriti ai limiti della superficie. Così la corrente potrà essere indotta attraverso l'applicazione di un campo magnetico (in funzione del tempo), o elettrico, o entrambi.

Un ampio intervallo di condizioni fisiche e notevoli applicazioni in campo metallurgico devono essere prese in considerazione; nonostante infatti la grande importanza pratica di queste applicazioni, e il fatto che i principi fondamentali di agitazione elettromagnetica siano ben noti, la comprensione dei flussi generati dai processi di rimescolamento elettromagnetico rimangono comunque di difficile interpretazione.



## CAPITOLO 2

### Stirring su crogiolo freddo

#### 2.1.Sviluppo del crogiolo

Le tecniche di fusione per induzione si avvalgono generalmente di crogioli ceramici oppure hot crucible e queste sono le categorie più utilizzate nell'industria metallurgica.

Alcune particolari applicazioni coinvolgono anche tecniche di fusione prive di crogiolo nelle quali il metallo fuso viene lateralmente sorretto e quindi racchiuso da forze di pressione elettromagnetiche; tuttavia le instabilità dovute alle forze coinvolte, come all'energico rimescolamento, e le difficoltà di confinamento di quei metalli ad elevato peso specifico ne limitano fortemente lo sviluppo.

Il problema delle impurità potrebbe essere risolto sfruttando l'idea di interporre fra il metallo fuso e l'induttore un crogiolo metallico, raffreddato ad acqua.

In questo modo però il metallo, allo stato liquido, si verrebbe a trovare contenuto entro un proprio strato solidificato(skull), mentre il crogiolo metallico risulterebbe uno schermo elettromagnetico fra l'induttore percorso dalla corrente e la carica in fusione.

Esistono due possibilità per evitare questo effetto schermante. La prima consiste nell'impiegare un crogiolo in rame a pareti molto sottili, così che il campo magnetico non incontri resistenza nel diffondersi attraverso il metallo.

Ma questa condizione risulta incompatibile con le forti limitazioni meccaniche che si introdurrebbero (cioè pareti troppo sottili non risponderebbero più alle esigenze meccaniche che comunque il crogiolo deve garantire).

L'altra alternativa consiste nell'utilizzare un crogiolo in rame formato da più sezioni, raffreddato ad acqua; al posto di un crogiolo ceramico "passivo", trasparente cioè al campo magnetico, il crogiolo metallico risulta essere magneticamente "attivo", in grado di determinare la distribuzione del campo nello spazio circostante, con la sua forma, le proprie dimensioni, con lo spessore e le proprie sezioni.

### 2.1.1. Specifiche costruttive che influenzano l'azione di contenimento

La corretta realizzazione del crogiolo riveste un ruolo delicato nell'ambito della fusione per levitazione elettromagnetica: la distribuzione della forza magnetica repulsiva sul carico fuso viene infatti fortemente influenzata dalle correnti parassite che a loro volta dipendono in gran misura dalle caratteristiche costruttive del crogiolo stesso.

Gli aspetti che sono stati esaminati in diverse ricerche sperimentali e analisi elettromagnetiche riguardano:

- l'ottimizzazione del numero di sezioni al fine di ottenere un buon confinamento della carica all'interno del crogiolo;
- la valutazione e la ricerca di una configurazione geometrica, interna ed esterna, che contribuisca ad un'opportuna distribuzione delle forze elettromagnetiche coinvolte.

## **2.2. Produzione di titanio di precisione con fusione su crogiolo freddo**

Nei primi anni del ventunesimo secolo i produttori di titanio di precisione non riuscivano a soddisfare le caratteristiche tecniche richieste per progetti esigenti, soprattutto in ambito aerospaziale; progressi in termini di grandi capacità erano compensati da una mancanza di miglioramenti sull'integrità metallurgica e sulle tolleranze dimensionali: nasce l'esigenza di migliorare il processo di fusione.

Taramm (Titane and Alliages Rares Micro-Moules), in Francia, ha sviluppato un processo che combina fusione su crogiolo freddo e colata in centrifuga per la produzione del titanio.

### 2.2.1. Il processo Taramm

*(J. Bannister, G. Broihanne, 2000, "Using cold-crucible melting for titanium precision castings", JOM journal of the minerals, metals and materials society, Volume 52, Number 5, pp. 21-23)*

Il crogiolo di rame destinato al processo è segmentato ed ogni segmento è raffreddato ad acqua ed isolato dal segmento adiacente. Alimentando il sistema si induce una corrente attorno ad ogni segmento come mostrato in figura 2.1 dalle frecce A, B, C e D.

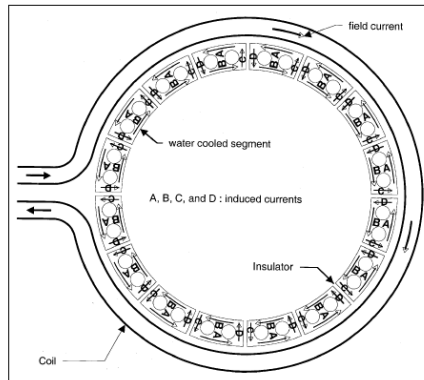


Figure 1. The segmented cold crucible and induction coil.

Figura 2.1

Ciò può essere confrontato con il flusso di corrente indotta che si genera sulla superficie di un crogiolo in rame non segmentato in cui il campo magnetico generato dagli avvolgimenti è annullato dal campo magnetico generato dalle correnti indotte nel crogiolo (figura 2.2). In questo scenario però il flusso magnetico richiesto per scaldare e fondere una carica metallica non esiste.

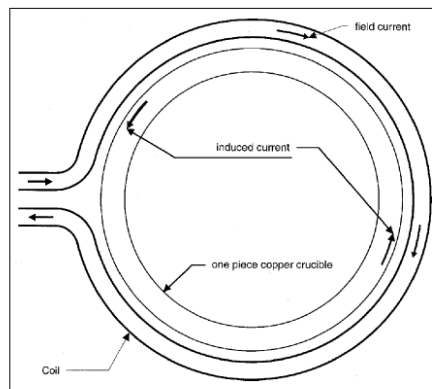


Figure 2. A section of a one-piece crucible and induction coil.

Figura 2.2

Al contrario invece il crogiolo segmentato genera una corrente indotta, creando il campo magnetico necessario alla carica metallica. Il metallo si scalda velocemente, comincia a fondere e riempie inizialmente la base del crogiolo dove una piccola parte ri-solidifica. A fusione quasi completata la forza elettromagnetica concentra il metallo al centro del crogiolo riducendo il contatto tra pareti e fuso.

La levitazione e il surriscaldamento del metallo sono stati raggiunti ma ciò è possibile solo per cariche dal peso inferiore ai 5 Kg.

Quando confrontata con il processo VAR (fusione ad arco) la tecnica Taramm mostra vantaggi significativi in termini di riempimento di piccole sezioni dello stampo. La costante e vigorosa agitazione del titanio da parte delle forze elettromagnetiche indotte provvede ad ottenere un'ottimale omogeneità chimica e termica sul metallo.

Quando la temperatura del metallo fuso è raggiunta il crogiolo si inclina e il titanio viene versato in uno stampo di ceramica che ruota ad alta velocità. L'energia elettrica viene mantenuta sul sistema durante tutto il processo di colata al fine di mantenere la temperatura della massa fusa.

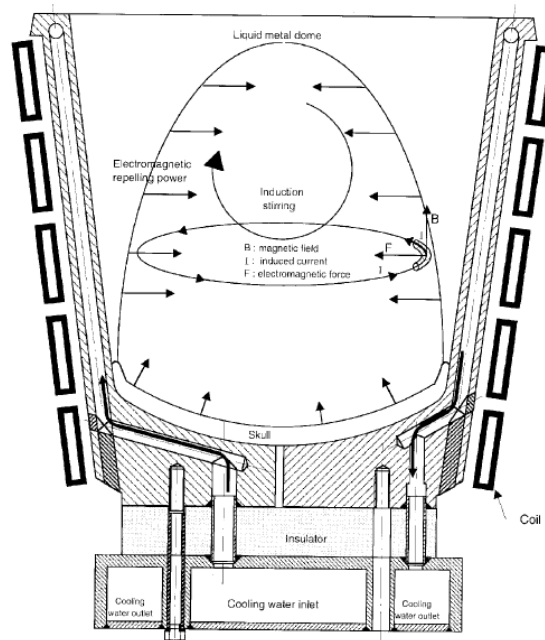


Figura 2.3

### 2.3. Effetti sulla microstruttura delle leghe superleggere

Le leghe Magnesio-Litio sono conosciute come le più leggere tra le leghe metalliche ed hanno un grande potenziale per le applicazioni nel settore aerospaziale e per i componenti strutturali nei sistemi di comunicazione "ultra-leggeri".

Sono state effettuate alcune prove di tipo sperimentale sull'influenza di un campo magnetico durante la solidificazione della lega Mg-9Li-5Al-Zn [9].

La lega viene preparata usando lingotti di puro magnesio, puro litio, puro alluminio e puro zinco. La fusione avviene in un crogiolo d'acciaio inserito in un forno sotto un'atmosfera di argon. Il fuso viene versato in uno stampo d'acciaio inox preriscaldato ad una temperatura di 200° e agitato da un impianto di rimescolamento ad una frequenza di 50 Hertz. I voltaggi usati sono stati rispettivamente 50, 80, 110, 140 V.

### 2.3.1. La microstruttura

Con questo processo la diffusione del calore è notevolmente accelerata e la temperatura all'interno del materiale è pressoché uniforme, ma soprattutto si evidenziano cambiamenti nella microstruttura in rapporto al voltaggio adoperato.

La morfologia della fase  $\alpha$  passa infatti gradualmente da “blocchi” lunghi e stretti ad una struttura di tipo globulare. Quando agiamo con un voltaggio di 50V la morfologia della fase  $\alpha$  non mostra grandi differenze rispetto ad una fusione in condizioni “normali”, ma quando si applica una tensione di 80V si vede chiaramente il passaggio a struttura prevalentemente globulare, mantenendo comunque una certa quantità di grani grossolani. Passando a 110V quasi tutta la fase  $\alpha$  diventa globulare, ottenendo un risultato ottimale, in questo senso, con un voltaggio di 140V.

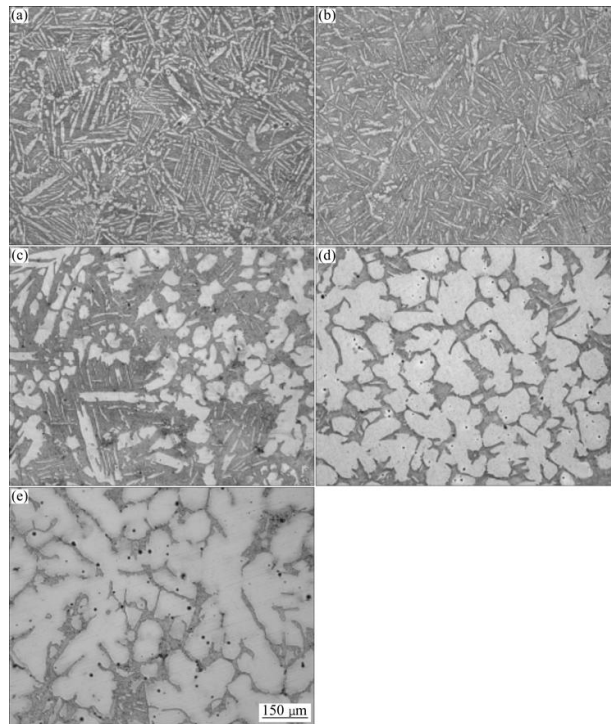


Figura 2.4. Microstruttura della lega Mg-Li-Al-Zn con differenti condizioni di stirring: (a) 0 V; (b) 50 V; (c) 80 V; (d) 110 V; (e) 140 V.

### 2.3.2. Proprieta' meccaniche

È stato inoltre dimostrato che il rimescolamento elettromagnetico può migliorare sia la resistenza a trazione che la duttilità della lega Mg-9Li-5Al-Zn.

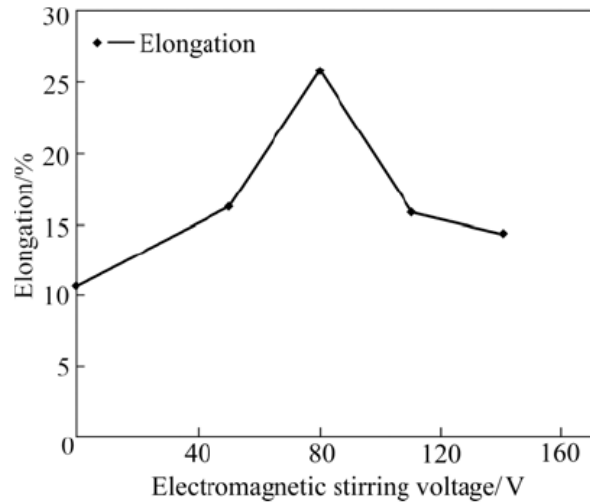


Figura 2.5. Effetto dello stirring sulla duttilità della lega Mg-9Li-5Al-Zn

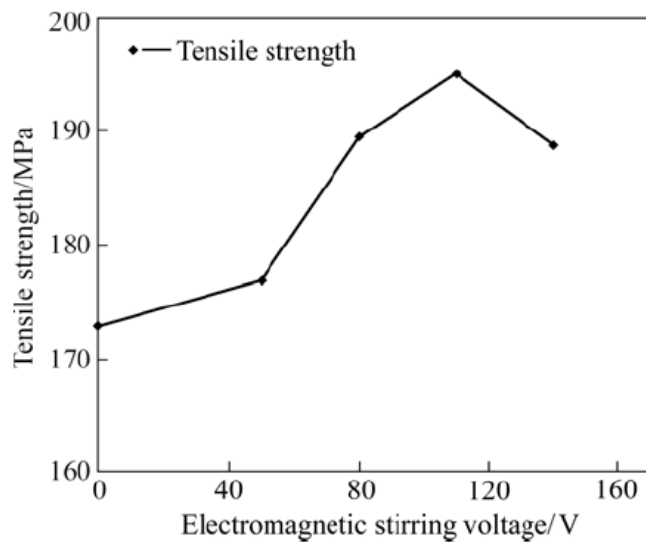


Figura 2.6. Effetto dello stirring sulla resistenza a trazione della lega Mg-9Li-5Al-Zn

C'è una stretta relazione tra proprietà meccaniche e microstruttura: quando la tensione di agitazione supera gli 80V, facendo così emergere strutture globulari della fase  $\alpha$  e mantenendo la fase  $\beta$  come fase matrice, la resistenza alla trazione e la duttilità aumentano contemporaneamente. Con l'aumento della struttura globulare (110V) la resistenza a trazione continua ad aumentare mentre l'allungamento diminuisce a causa della struttura dendritica assunta dalla fase  $\beta$ . Con una tensione di 140V anche la resistenza a trazione inizia a diminuire in quanto la struttura della lega diventa nuovamente grossolana.



# CAPITOLO 3

## Lo stirring nella colata continua dell'acciaio

### 3.1.Introduzione

Verso la fine degli anni novanta i maggiori produttori di acciaio confermarono l'importanza del controllo dei flussi del fluido e del fenomeno di agitazione nella produzione in colata continua per imprimere nel materiale notevoli qualità. In particolare modo è approvato che oltre a ridurre notevolmente le segregazioni durante la solidificazione, il flusso gioca un ruolo importante per quanto riguarda l'eliminazione delle inclusioni e delle porosità. Nella produzione di barre e billette, gli induttori sono inseriti nello stampo, e/o nella zona di fine solidificazione, in base agli obiettivi che si vogliono raggiungere. Per la produzione di barre l'agitazione del fuso è ottenuta tramite stirrers lineari; questi agitatori possono essere paragonati agli avvolgimenti statorici di un motore elettrico asincrono che producono un campo magnetico generante una forza all'interno dello stampo, generando in tal modo un flusso rotante all'interno del bagno fuso. In generale le velocità non superano i 0,5 m/s per avere un effetto di agitazione desiderato.

#### 3.1.1.Formulazione

La descrizione matematica del sistema EMS (electromagnetic stirring) necessita delle equazioni di Maxwell per determinare le forze indotte nel metallo e delle equazioni di Navier-Stokes per il calcolo delle velocità all'interno del fuso. Si suppone che lo spessore dello stampo sia infinitamente piccolo. È pure assunto che il flusso nel fuso dovuto alla colata non influisca sul flusso indotto elettromagneticamente.

#### 3.1.2.Nomenclatura

D	Tensore di deformazione
$F_{em}$	Forza di Lorentz
H	Intensità del campo magnetico
I	Corrente nello stirrer
j	Densità del flusso di corrente

k	energia cinetica turbolenta
P	Pressione
T	Potenziale vettore di corrente
U	Velocità
$\varepsilon$	Dissipazione di energia turbolenta
$\mu_0$	Permeabilità magnetica
$\mu_l$	Viscosità laminare
$\mu_t$	Viscosità turbolenta
$\rho$	Densità
$\sigma$	Conducibilità elettrica
$\phi$	Sfasamento
$\Psi$	Potenziale scalare magnetico
$\omega$	Pulsazione

### 3.2. Equazioni del campo magnetico

L'unico vantaggio del modello che stiamo per descrivere sta nell'analisi del campo magnetico in modo di evitare qualsiasi tipo di discontinuità del campo elettrico ai confini della lastra d'acciaio.

Dalle equazioni di Maxwell in regime sinusoidale otteniamo la seguente equazione differenziale:

$$\nabla^2 T = -j\sigma\omega\mu_0(T - \nabla\Psi) \quad (1)$$

$$\nabla^2\Psi = 0 \quad (2)$$

Le condizioni al contorno di T sono:

$$T_{,i} = 0 \quad \forall i = 1,3 \quad (3)$$

Le condizioni al contorno di  $\Psi$  sulla superficie del metallo sono espresse dalla legge di Biot Savart che può essere scritta come:

$$\nabla\Psi \cdot n = \left[ T - \left( \frac{1}{4} \left( \sum_{coil} I e^{j\phi} \int \frac{dl \times (r-r')}{|r-r'|^3} + \sum_{slab} \int_e \frac{(\nabla \times T) \times (r-r')}{|r-r'|^3} dV \right) \right) \right] \cdot n \quad (4)$$

dove  $I$  e  $\phi$  sono l'ampiezza e lo sfasamento della corrente in ogni avvolgimento,  $dl$  è un infinitesimo di avvolgimento,  $dV$  un elementino di volume nel metallo,  $|r - r'|$  è la distanza tra un punto nel metallo e il rispettivo elemento di integrazione.

Il primo e il secondo termine nell'equazione (4) indicano la risultante del campo magnetico applicato dallo stirrer e il campo indotto nel metallo.

La forma dell'integrale per il campo applicato è tale da poter specificare la posizione e le correnti di ogni avvolgimento in maniera distinta.

In fine la forza elettromagnetica media nel conduttore può essere espressa come segue:

$$F_{em} = \frac{\mu_0}{2} Re((\nabla \times T) \times (T - \nabla\Psi)^*) \quad (5)$$

dove  $*$  indica il complesso coniugato.

### 3.3. Equazioni del flusso

Le equazioni che descrivono il flusso all'interno del bagno fuso prendono la seguente forma:

conservazione della massa:

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (6)$$

equazioni di Navier Stokes:

$$\rho(U \cdot \nabla)U = -\nabla p - [\nabla \cdot (\mu_i + \mu_t)D] + F_{em} \quad (7)$$

dove:

$$D_{ij} = \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad \forall i, j = 1, 3 \quad (8)$$

D è il tensore di deformazione, U la media dei vettori di velocità,  $\rho$  la densità del fluido,  $p$  la pressione e  $\mu_l$  e  $\mu_t$  sono rispettivamente la viscosità lineare e turbolenta.

$$\mu_t = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

dove K è l'energia cinetica della turbolenza e  $\varepsilon$  è l'energia dissipata dalla turbolenza, le equazioni differenziali per K ed  $\varepsilon$  sono date da:

$$\rho(U \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu_l \right) \nabla k + G - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\rho(U \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} + \mu_l \right) \nabla \varepsilon + c_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (11)$$

dove:

$$G = \mu_t D_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (12)$$

Tutte le equazioni con le rispettive condizioni al contorno rappresentano perfettamente la situazione.

### 3.4. Effetto delle condizioni di stirring

Investighiamo dunque sugli effetti dell'applicazione di uno stirrer trifase e del flusso indotto su una lastra di 2000x250 mm.

I dati di velocità sono prodotti da correnti di 2400 o 3200 A e alle frequenze di 10 o 20 Hz [7].

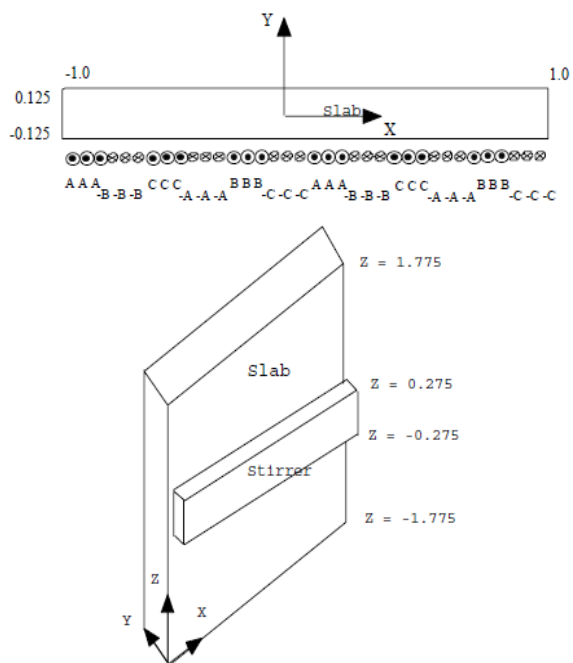


Figura 3.1.Schema del sistema EMS

Dimensioni della lastra	2000x250 mm
Dimensioni dello stirrer	2000x550 mm
Distanza tra la lastra e lo stirrer	60 mm
Numero di fasi	3
Numero di coppie polari	2
Numero di giri per fase per polo	3
Passo polare	500 mm
Ampiezza della corrente per fase	2400-3200 A
frequenza	10-20 Hz

Tabella 3.2.Parametri del sistema

Andiamo dunque ad analizzare il flusso che si presenta con l'applicazione dello stirrer; essenzialmente due tipi di risultati saranno discussi ossia la mappa della velocità e i grafici dell'intensità turbolenta.

La figura 3.2 mostra la tipica traiettoria di una particella nel fuso dove si nota che il flusso presenta i due caratteristici cicli di ricircolo. Nella figura si nota che il flusso nella sezione verticale coperta dallo stirrer è principalmente orizzontale, e il flusso rotante oltre lo stirrer sembra essere provocato dalla deflessione del flusso primario nella parete ovest della lastra.

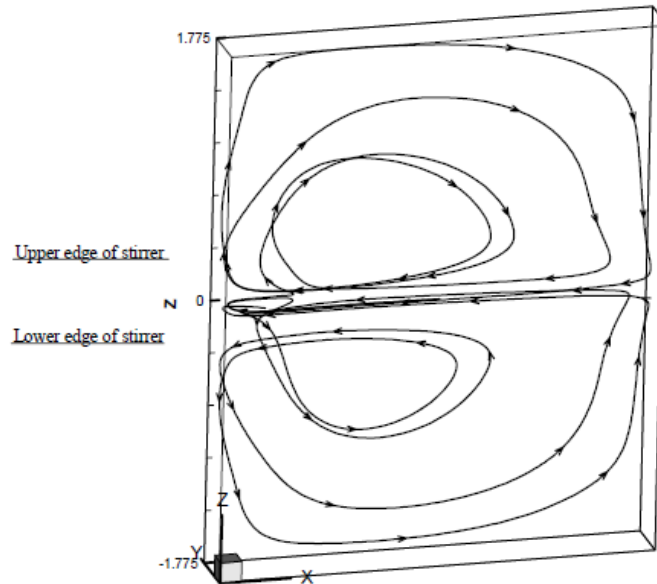


Figura 3.2. Modello virtuale del flusso

Le velocità sono raffigurate in figura 3.3, la quale mostra i vettori nel piano orizzontale x-y al centro dello stirrer ( $y=0$ ). Si è visto, come si poteva immaginare, che il flusso accelera lungo la lastra da velocità pari a zero nella parete est ad una velocità pressoché costante al centro della lastra ( $x=0$ ); si nota anche un forte moto turbolento in prossimità della parete ovest. Il flusso indotto lungo la lastra prima della turbolenza è sostanzialmente unidimensionale nella direzione del campo magnetico (direzione asse x); in più esso non è uniforme attraverso la lastra con una velocità massima nella parete di fronte allo stirrer e minima dalla parte opposta, e ciò non può essere evitato a causa dello spessore.

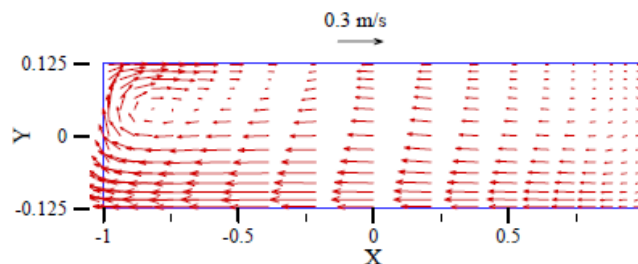


Figura 3.3. Vettori della velocità nel piano x-y in corrispondenza di  $z=0$ , con  $I=3200$  A e  $f=10$  Hz

Gli effetti e i parametri di agitazione lungo la lastra sono illustrati nelle figure 3.4 e 3.5, dalle quali si può osservare il profilo della velocità trasversale  $V_x$  al centro della lastra ( $x=0, y=0$ ).

Figura 3.4 raffigura l'influenza del cambiamento della corrente di agitazione ad una fissata frequenza mentre la figura 3.5 descrive i profili delle velocità a frequenze differenti; si può facilmente capire che la velocità trasversale è massima al centro dello stirrer ( $z=0$ ) e i profili di velocità dipendono sia dalle correnti che dalle frequenze di agitazione.

Un'analisi accurata della figura 3.4 mostra che la velocità massima varia linearmente rispetto alle correnti degli avvolgimenti. Sebbene la frequenza abbia un effetto limitato sull'ampiezza della velocità, essa influisce sul flusso di ricircolo all'interno del metallo fuso.

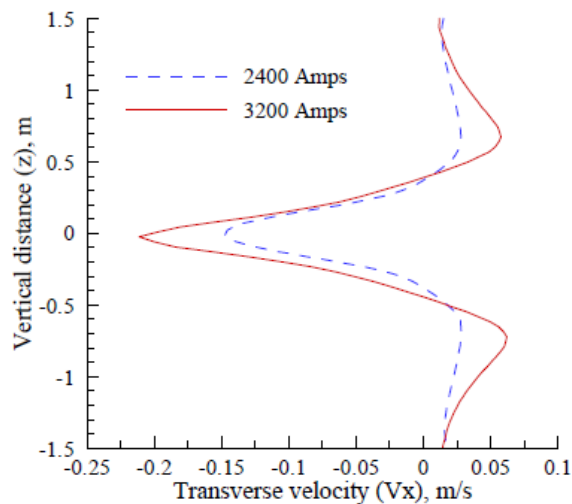


Figura 3.4. effetto della corrente sulle velocità trasversali:  $x=0$ ;  $y=0$ ;  $f=10\text{Hz}$

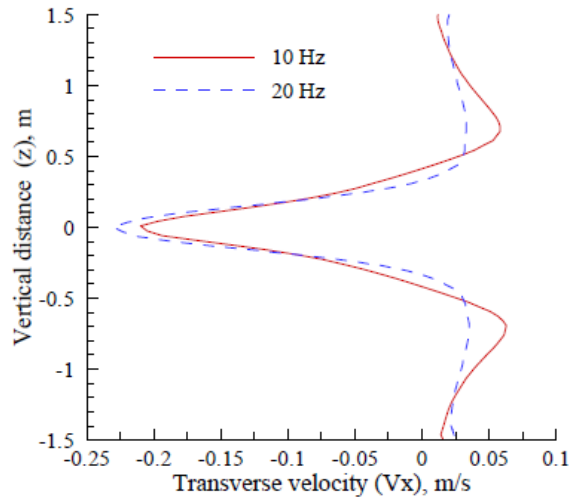


Figura 3.5. Effetto della frequenza sulle velocità trasversali:  $x=0$ ;  $y=0$ ;  $I=3200A$

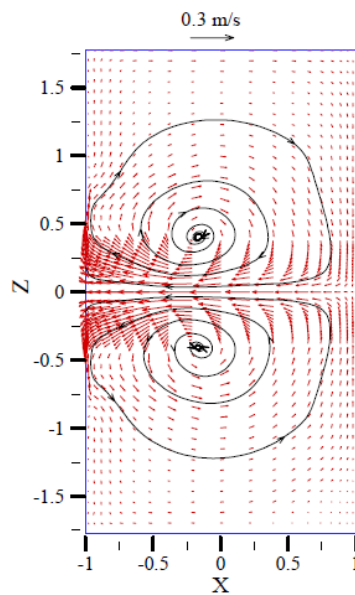


Figura 3.6. Vettori di velocità nel piano x-z con  $y=0$ :  $I=3200 A$ ,  $f=10 Hz$

L'andamento del flusso orizzontale nel bagno fuso oltre lo stirrer è mostrato nel diagramma delle velocità nel piano x-z, in figura 3.6; la figura mostra chiaramente che questo flusso è causato dalla deviazione del flusso orizzontale nella parete ovest. Dal momento che l'inerzia del flusso diretto verso l'alto sostiene il flusso presente in regioni non forzate, si può usare la velocità verticale come misura della penetrazione del flusso nel metallo fuso.



Analizzando le figure 3.7 e 3.8 si vedono le regioni di maggiore velocità del flusso in corrispondenza dei bordi dello stirrer; inoltre la corrente e la frequenza impartite dallo stirrer hanno un effetto minimo sulla velocità massima ma una forte conseguenza sulla penetrazione del flusso verticale nel bagno fuso.

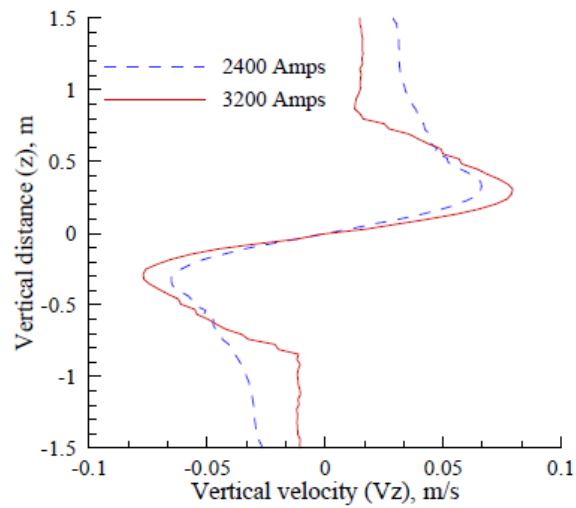


Figura 3.7. Effetto della corrente sulla velocità verticale:  $x=-0.95$  m;  $y=0$ ;  $f=10$  Hz

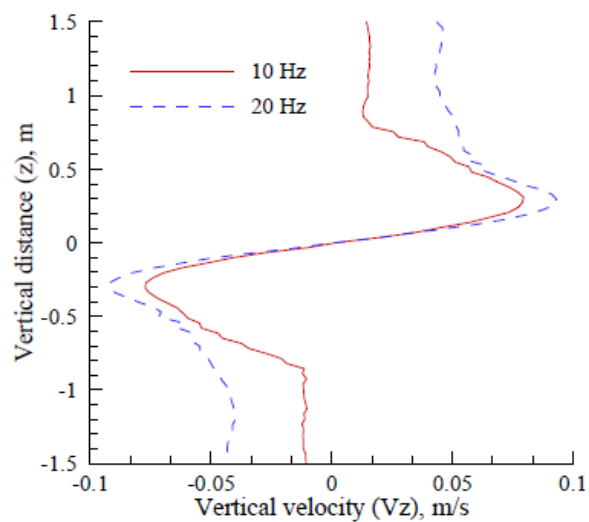


Figura 3.8. Effetto della frequenza sulla velocità verticale:  $x=-0.95$  m;  $y=0$ ;  $I=3200$  A

Ulteriori importanti informazioni possono essere ottenute considerando il comportamento turbolento, come rappresentato nelle figure 3.9, 3.10, 3.11. La turbolenza è importante perché contribuisce notevolmente alla miscelazione e all'omogeneizzazione del metallo liquido. Figura 3.9 mostra la turbolenza sul piano x-z verticale per una corrente di 3200 A e frequenza di 10 Hz.

Si nota come la turbolenza sia presente in tutto il metallo raggiungendo la sua massima intensità di 0,175 in prossimità della parete ovest. Con l'eccezione di questa regione la turbolenza del flusso primario è significativamente piccola, pari a circa 0,05; l'intensità della turbolenza nata dal flusso di ricircolo oltre lo stirrer è ancora minore: troppo piccola per dare un contributo significativo nell'omogeneizzazione del metallo e nell'uniformità della temperatura. Figura 3.10 mostra lo stesso grafico, con una corrente minore, pari a 2400 A; la struttura della turbolenza è pressoché identica a quella descritta prima. Comunque qui il flusso è meno turbolento, e l'intensità massima è circa pari a 0,1.

Questa diminuzione è dovuta alla diminuzione della velocità del fuso a causa della riduzione della corrente negli avvolgimenti.

I risultati indicano che l'intensità della turbolenza è direttamente proporzionale alla corrente di alimentazione.

La figura 3.11 mostra l'effetto dell'aumento della frequenza, da 10 a 20 Hz, con una corrente di 3200 A. Qualitativamente non ci sono differenze significative rispetto ai risultati ottenuti a 10 Hz, infatti l'intensità di turbolenza è leggermente minore, circa del 10%.

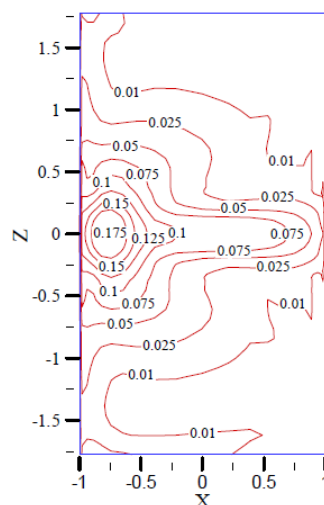


Figura 3.9. Andamento dell'intensità turbolenta nel piano x-z con  $y=0$ :  $I=3200$  A,  $f=10$  Hz

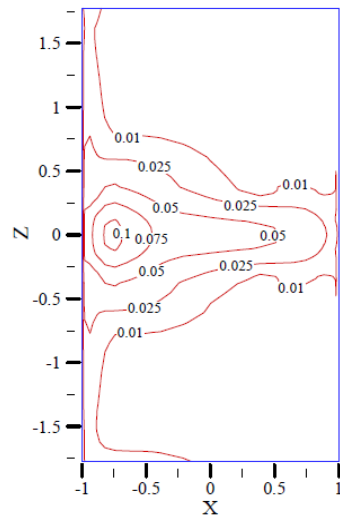


Figura 3.10. Andamento dell'intensità turbolenta nel piano x-z con  $y=0$ :  $I=2400$  A,  $f=10$  Hz

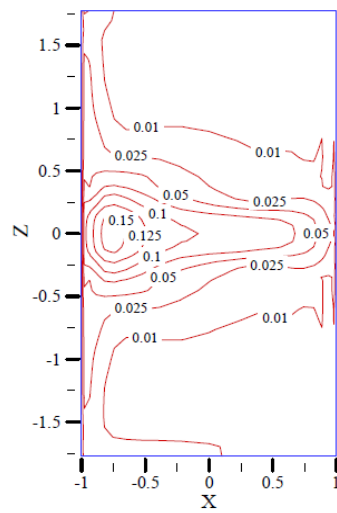


Figura 3.11. Andamento dell'intensità turbolenta nel piano x-z con  $y=0$ :  $I=3200$  A,  $f=20$  Hz



# **CAPITOLO 4**

## **Final Solidification Zone Stirring**

### **4.1.Introduzione**

Già nelle prime implementazioni degli stirrer elettromagnetici(EMS) fu riconosciuta l'esigenza, specialmente negli acciai con un vasto range di solidificazione, di beneficiare degli effetti del campo magnetico sia durante la colata sia nella fase di solidificazione. Questi tipi di agitazione magnetica sono conosciuti come FEMS(final solidification zone stirring).

Nonostante gli iniziali reports sull'efficacia di FEMS riguardo soprattutto al miglioramento della solidità strutturale e delle segregazioni, a lungo andare ci si rese conto che questo sistema presenta alcune lacune per quanto riguarda l'efficacia e la "coerenza" a causa di particolari motivi. In primo luogo è importante la posizione della stessa FEMS rispetto la fase di solidificazione dell'acciaio ossia al livello del solido nel volume liquido. In secondo luogo mescolando in questa fase si è soggetti ad una progressiva diminuzione della coppia di agitazione e un aumento della viscosità; la prima dovuta ad una riduzione del raggio del bacino sottoposto ad agitazione, mentre la seconda dovuta ovviamente ad un aumento della frazione di solido nel fuso. Ci sono altri importanti fattori che impattano sull'effetto dell'agitazione, dovuti in particolar modo alla natura del campo magnetico usato.

### **4.2.Principi del sistema**

I nuovi sistemi di stirring consistono in due o tre induttori disposti lungo un asse ad una certa distanza tra loro, come schematicamente rappresentato in figura 4.1, e la sistemazione di tali avvolgimenti comporta una parziale sovrapposizione tra i campi magnetici generati dagli avvolgimenti adiacenti (figura4.2).

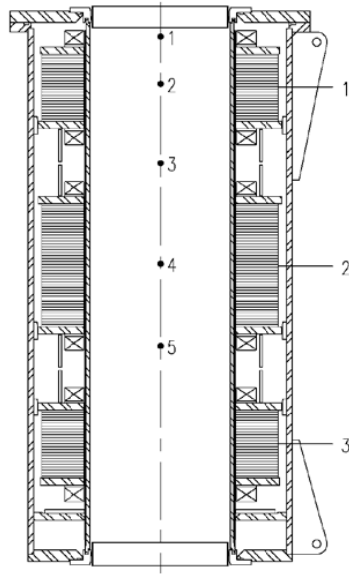


Figura4.1.Schema di un sistema di stirring con tre serie di avvolgimenti. I numeri a destra identificano i diversi stirrer mentre i numeri sull'asse denotano in quali posizioni sono state fatte le simulazioni numeriche sulla velocità e sulla viscosità.

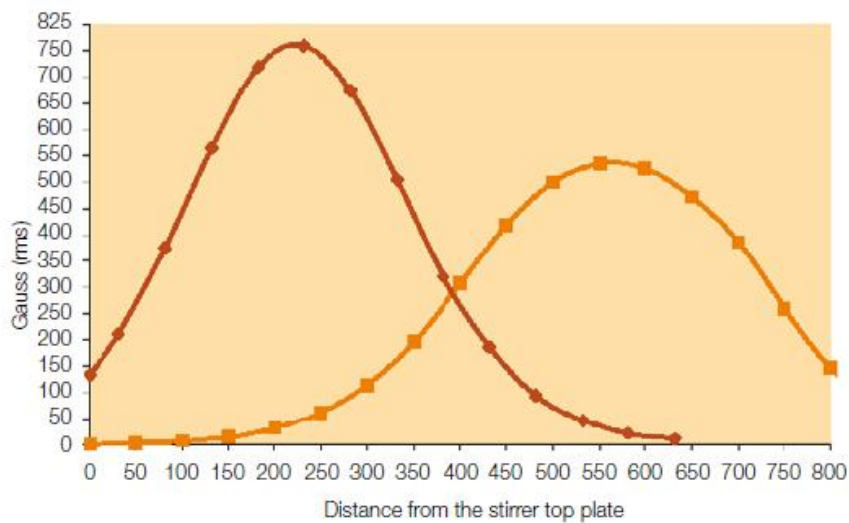


Figura 4.2.Un esempio di sovrapposizione di campi magnetici generati da due stirrer adiacenti.

In ogni punto della risultante dei campi magnetici sovrapposti, la densità del flusso magnetico e la densità di corrente nel fuso saranno la somma vettoriale dei singoli contributi degli avvolgimenti adiacenti.

Figura 4.3 mostra un esempio di media temporale e di componenti tempo-dipendenti della forza magnetica prodotta da un sistema di stirring a due statori. Questo sistema è composto da due stirrer identici separati che producono campi magnetici aventi la stessa direzione rotazionale. L'agitazione modulata prodotta dalla forza magnetica è caratterizzata da grandi oscillazioni della velocità angolare( come mostrato in figura 4.4) ; questo primo grande flusso oscillatorio, a sua volta, produce forti oscillazioni del flusso secondario di ricircolo nel piano radiale-assiale, provocando una grande turbolenza all'interno del volume del fuso. Con i campi magnetici contrari , le variabili temporali della forza prodotta dai rispettivi campi magnetici originali, saranno eliminate, come mostrato in figura 4.5. In questo caso, le intense oscillazioni del flusso secondario e la conseguente turbolenza sono prodotte da un forte gradiente della velocità angolare causata da un'inversione del flusso d'agitazione(figura 4.6).

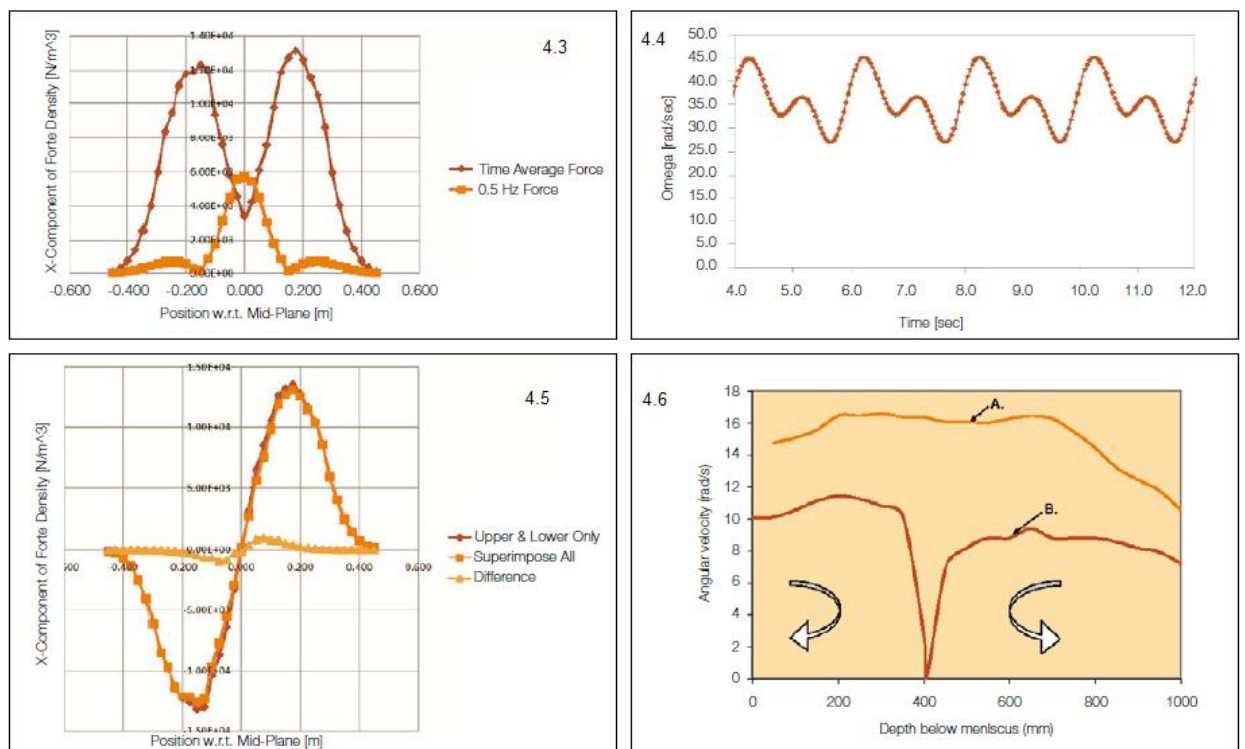


Figura 4.3. Distribuzione assiale delle medie temporali; Figura 4.4. Oscillazioni della velocità angolare prodotta nel fuso; Figura 4.5. Componenti tempo-dipendenti della forza di Lorentz prodotte dai campi magnetici contro-rotazionali; Figura 4.6. Profilo assiale con agitazione contro-rotazionale.

In figura 4.7 sono rappresentati i profili delle velocità assiali nel metallo fuso prodotte da un campo magnetico rotante contrario. Le variazioni più significative della velocità si verificano a metà tra i due stirrer. Questa posizione corrisponde all'interazione tra i due flussi opposti e al cambiamento della direzione della velocità angolare. Il gradiente della velocità angolare identifica la forza trainante per la generazione del flusso secondario di ricircolo.

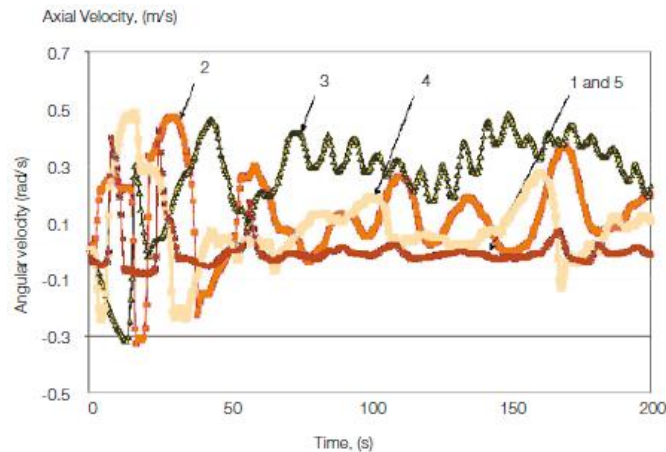


Figura 4.7

La figura 4.8 illustra i profili della turbolenza in corrispondenza delle stesse condizioni di stirring citate per la figura 4.7. Anche in questo caso la turbolenza maggiore è presente a metà esatta tra i due avvolgimenti. Per confrontare, illustriamo pure l'andamento temporale della turbolenza generata da un campo magnetico unidirezionale, non modulato; la turbolenza in questo caso, nel punto di mezzo, risulta essere 5 volte inferiore rispetto a quella prodotta da un campo magnetico contro rotazionale.

Questa condizione di alta turbolenza comporta un evidente miglioramento nella struttura del metallo.



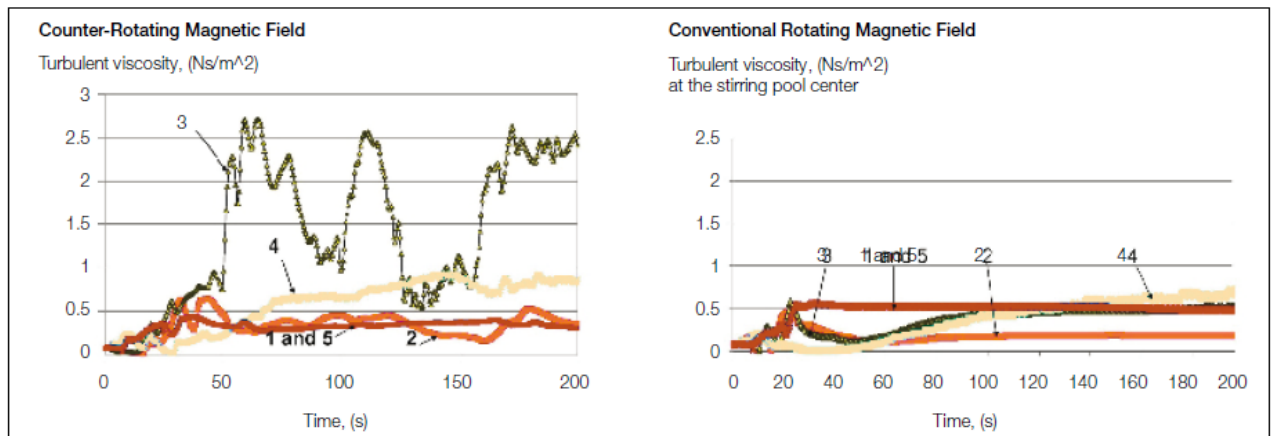


Figura 4.8. Profili della viscosità dell'acciaio liquido agitato da campi magnetici modulati contro-rotazionali e, nella seconda immagine, da campi magnetici convenzionali.

Per verificare tali benefici sono state effettuate diverse prove sulla lega di alluminio A357.

### 4.3.L'esperienza

#### 4.3.1.L'impianto

Una visione generale dell'impianto usato per la prova è mostrata in figura 4.9: comprende una fornace ad induzione, uno stirrer elettromagnetico, un generatore di potenza e un sistema di raffreddamento ad acqua [8].



Figura 4.9. Impianto sperimentale per lo studio della lega A357

La lega A357(Al-7%Si-0,5%Mg) viene fusa nella fornace e colata, tramite un contenitore in silice, in uno stampo in acciaio inox raffreddato ad aria, inserito all'interno dello stirrer. La temperatura di colata è compresa in un intervallo che va da 690 a 730 C. Il materiale usato per ogni forma appartiene allo stesso lotto onde evitare effetti di variazioni chimiche durante la solidificazione. Le forme prodotte saranno lingotti a forma cilindrica (0,115 m di diametro e 0,86 m di altezza) e dal peso di 22 Kg. Per facilitare l'estrazione del lingotto dallo stampo esso è costituito da due parti simmetriche longitudinalmente e rivestite da nitrato di boro per evitare l'adesione del metallo durante la solidificazione. Per ottenere le sufficienti condizioni di agitazione magnetica durante la fase finale della solidificazione, la forma del menisco e la sua deformazione dovevano essere eliminate; ciò è stato ottenuto applicando una copertura di grafite sulla superficie del fuso alla fine della colata. Le due termocoppie sono state sistemate nella copertura rispettivamente al centro e metà raggio dello stampo, 20cm al di sotto del menisco, per monitorare l'avanzamento della solidificazione.

#### 4.3.2. Monitoraggio della temperatura

Poiché le misure della temperatura del fuso sono state effettuate in presenza di campi magnetici significativi, il segnale della termocoppia deve essere "protetto" per non risentire di tali interferenze; il sistema utilizzato fornisce una preamplificazione del segnale e un filtro passa-basso. La lettura della temperatura è basata su una media di 100 campioni al secondo, con due fondamentali obiettivi: monitorare la progressiva solidificazione del metallo e la velocità di raffreddamento. Entrambi i parametri sono importanti per il controllo delle condizioni di agitazione e solidificazione e anche per valutare come queste condizioni influiscono sulla struttura solida.

Dunque, gli effetti dell'agitazione e il tasso di raffreddamento sul livello di solidificazione e sulla morfologia del grano sono ben definiti.

Negli esempi precedenti riguardanti simulazioni numeriche sui flussi del fuso, la presenza di una frazione solida è stata ignorata; in realtà questa percentuale solida, superato un certo livello, influisce abbondantemente sul movimento del fluido, sia per quanto riguarda la turbolenza, sia per quanto riguarda la viscosità. Per una frazione di solidificazione compresa tra lo 0,1 e lo 0,2 nella maggior parte delle leghe inizia a formarsi il reticolo cristallino.

Vi è un ampio accordo sulle condizioni di stirring riguardanti la fase di solidificazione il quale prevede che raggiunta una certa frazione (tra il 30 e il 35%) l'effetto stirring non può essere sostenuto.

Secondo queste condizioni ciò avviene tra i 585-590 C che corrispondono ad una frazione solida del 0,4.

Come si vede nella figura 4.10, dopo una brusca diminuzione della temperatura dovuta all'avvio dello stirring, si è in presenza di una sorta di plateau tra l'intervallo di temperatura sopra citato, seguito da una diminuzione molto graduale.

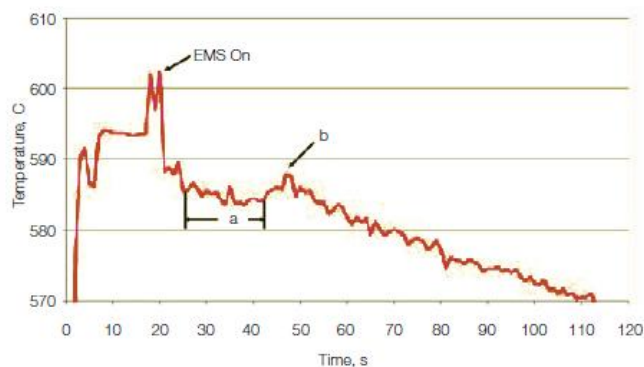


Figura 4.10. Curva di raffreddamento durante la solidificazione del lingotto (a-plateau, b-picco di calore)

In alcuni casi il picco di temperatura precede l'inizio di questo declino. Queste caratteristiche delle curve di raffreddamento riflettono la dinamica dell'intensità di agitazione e l'avanzamento della solidificazione.

Così, la rapida diminuzione della temperatura è il risultato di un'intensa agitazione del fuso e di un rapido trasferimento di calore tra il guscio solido e il nucleo fuso.

Con l'avanzamento della solidificazione il tasso di calore latente rilasciato aumenta, mentre l'intensità di agitazione diminuisce a causa del progressivo aumento della viscosità e la diminuzione del raggio del bacino da agitare. Questo, a sua volta, comporta una diminuzione del calore trasferito all'interno del fuso, trovandosi quindi in corrispondenza di un plateau nella curva caratteristica.

Tutto ciò è avvenuto in un intervallo compreso tra i 25 e i 40 secondi dall'inizio della solidificazione; l'agitazione è stata dunque sospesa in quanto sono stati raggiunti i 570 C.

Cast No.	Electric Current and Frequency		Applied Stirring Method
	Upper Stirrer	Lower Stirrer	
<b>Group A</b>			
1	No stirring		
2	0	140A, 11Hz	Unidirect. conventional
3	160A, 8Hz	140A, 11Hz	C-R modulated
4	150A, 10.5 Hz	140A, 11Hz	C-R modulated
5	160A, 10 Hz	140A, 10Hz	C-R unmodulated
6	160A, 8 Hz	140A, 11Hz	Unidirect. modulated
7	150A, 10.5 Hz	140A, 11Hz	Unidirect modulated
<b>Group B</b>			
8	145A, 10.5Hz	140A, 11 Hz	C-R modulated
9	145A, 11 Hz	140A, 11 Hz	Unidirect. unmodulated
10	145A, 10.5 Hz	140A, 11 Hz	Unidirect. modulated
11	145A, 10.25 Hz	140A, 11 Hz	Unidirect. modulated
12	140A, 11 Hz	140A, 11 Hz	C-R unmodulated

Tabella 4.1

#### 4.3.3. Applicazione del campo magnetico

Il sistema usato per le prove sulla lega A357 è simile a quello illustrato in figura 4.1, a parte il fatto che sono stati usati due avvolgimenti (il numero 1 e il numero 3) anziché tre; ogni avvolgimento è alimentato separatamente da generatori di potenza a singola frequenza. I pezzi di metallo prodotti sono differenziati in due tipi (gruppo A e gruppo B) caratterizzati da parametri di realizzazione diversi. La temperatura di colata pure è differente nei due casi: per il gruppo A la temperatura è compresa tra i 620 e i 650 C mentre per il gruppo B è tra i 710 e i 720 C.

Come si vede nella tabella il pezzo n.2 è stato sottoposto ad una singola frequenza indotta da un singolo avvolgimento, mentre per gli altri sono stati applicati talvolta campi magnetici contro rotazionali, talvolta unidirezionali, a volte modulati e alcuni non modulati.

In più per ottenere un confronto è stata realizzata una prova (pezzo n.1) senza alcun tipo di agitazione.

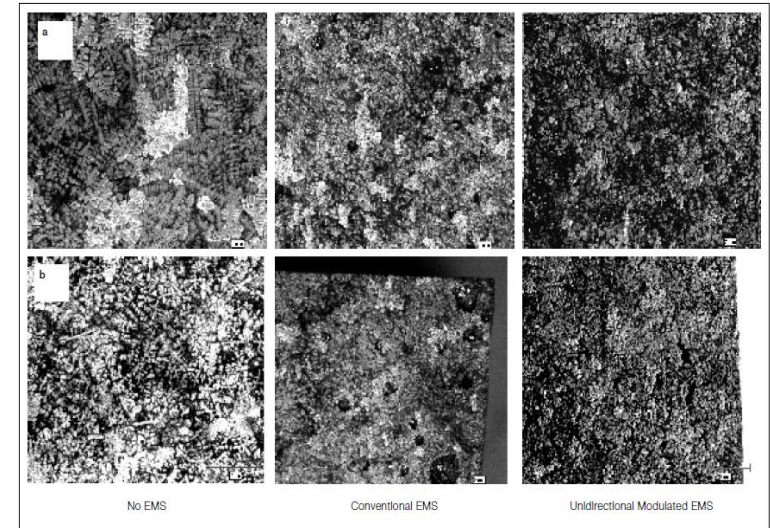


Figura 4.11. Macrostruttura della lega A357 a differenti condizioni di stirring. Ingrandimento 20x  
 a) distanza di circa metà raggio, b) centro del lingotto.

#### 4.3.4. Valutazione della struttura di solidificazione

La struttura della lega A357 è stata dunque analizzata al centro e a metà distanza tra la superficie ed il centro del lingotto. Per la valutazione della macrostruttura i campioni sono stati macinati riducendoli in grana finissima e acidati con il reagente Poulton (60% HCl, HNO<sub>3</sub> 30% e 5% HF); inoltre per migliorare i dettagli della struttura si è applicata sul campione un'illuminazione direzionale. La macrostruttura è stata studiata attraverso un microscopio ottico con ingrandimento pari a 20x. L'effetto delle diverse impostazioni di stirring è stato analizzato sulle dimensioni del diametro del grano tramite il metodo dell'intercetta lineare. Per la microstruttura i campioni non sono stati acidati o acidati al massimo al 0,5% HF; in nessuno dei due casi sono stati riscontrati particolari risultati e differenze, pertanto le caratteristiche morfologiche sono state prese in esame da un programma specializzato (Clemex Vision Professional Edition) collegato ad un microscopio metallografico con un ingrandimento di 50x.

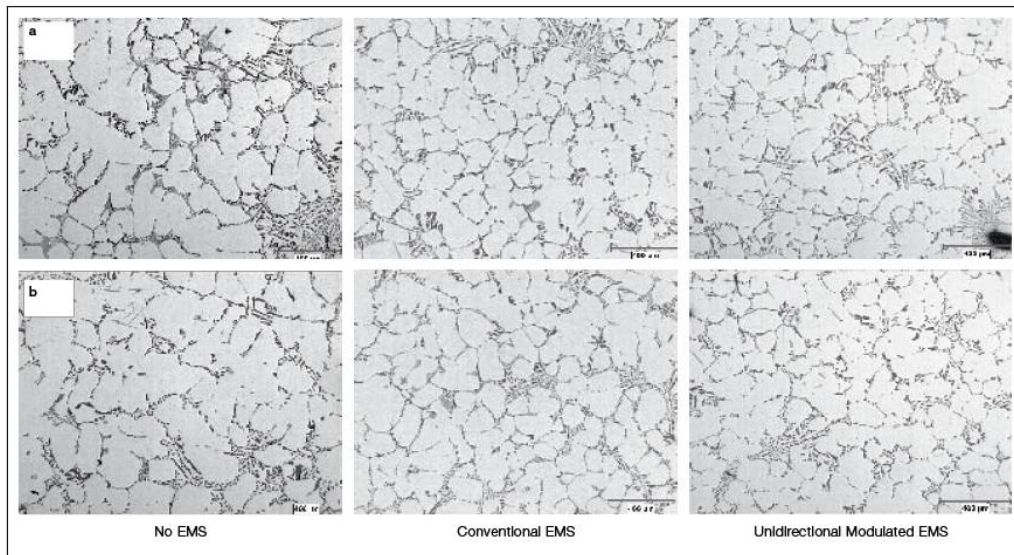


Figura 4.12. Microstrutture della lega A357 a differenti condizioni di stirring

#### 4.3.5. Valutazione dei risultati

Entrambi i rilevamenti metallografici della struttura della lega indicano che alcune tecniche applicate per il rimescolamento sono più efficaci di altri in termini di trasformazione morfologica, dall'iniziale struttura dendritica a globulare, e anche nella sua raffinazione.

In figura 4.12 si vede la differenza tra i lingotti realizzati in assenza di stirring o con metodi di agitazione diversi.

Come si può vedere la struttura a metà raggio del lingotto prodotto senza stirring è interamente formato da dendriti di grandi dimensioni (figura 4.12a); la struttura al centro di questo lingotto è una miscela di dendriti, qualche globulo e qualche cristallo di forma allungata (4.12 b).

La struttura ottenuta con lo stirring convenzionale è per la maggior parte globulare, con la presenza di qualche dendrite o frammento di dendrite.

Nei lingotti realizzati con agitazione modulata la struttura è completamente globulare; le grandi porosità che si osservano come macchie nere nel fotogramma sono il risultato dell'inglobamento di aria durante la colata del fuso all'interno dello stampo, ma ciò non viene tenuto in considerazione perché non influisce su quello che è lo scopo del nostro studio.

Gli effetti dei diversi processi di stirring applicati rispetto alla dimensione del grano sono mostrati in figura 4.13.

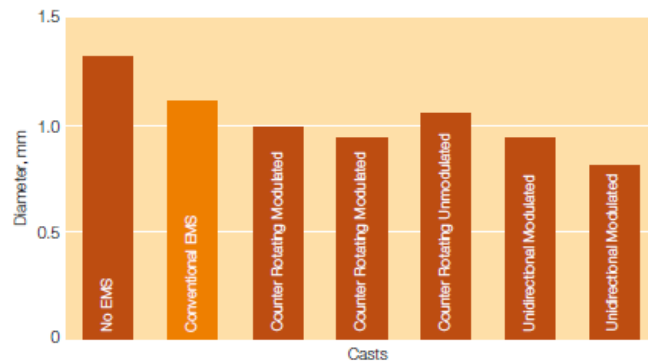


Figura 4.13. Dimensioni del grano ottenute a diverse condizioni di stirring

Si può notare che attraverso lo stirring tradizionale la grandezza del diametro del grano è ridotto circa del 23% a metà raggio del lingotto e del 16% al centro rispetto alla struttura formatasi in assenza di stirring; un'ulteriore riduzione la si ottiene con agitazioni contro rotazionali.

In generale, la microstruttura di tutti i campioni è formata da cristalli d'alluminio di fase alfa: dendriti nella struttura ottenuta senza stirring, globulare e grani allungati nella struttura ottenuta con stirring, e una rete di eutettico di silicio e contenente composti di manganese. La microstruttura è stata ulteriormente valutata con il Clemet Image System Analysis (tabella 4.2).

Cast No.	Location on the Sample	Mean Area, $\mu\text{m}^2$	Mean Length, $\mu\text{m}$	Mean Circular Diameter, $\mu\text{m}$	Mean Spherical Diameter, $\mu\text{m}$	Mean Width, $\mu\text{m}$	Mean Density, Globule/ $\text{mm}^2$
<b>Group A</b>							
1	M-R C	17,577 18,734	175 179	135 138	165 169	117 121	44.62 42.45
2	M-R C	13,100 12,788	153 151	120 118	147 146	105 104	60.48 60.96
3	M-R C	12,841 13,036	150 153	118 119	145 146	104 115	59.6 59.55
4	M-R C	13,101 13,078	153 152	119 119	146 146	104 105	60.82 59.77
5	M-R C	12,735 12,449	149 148	116 116	143 142	102 102	59.66 59.24
6	M-R C	11,671 11,435	144 143	114 113	139 138	100 99	66.94 68.33
7	M-R C	11,409 11,471	142 143	112 113	137 139	99 99	66.59 66.27
<b>Group B</b>							
8	M-R C	16,982 16,040	170 167	134 131	164 161	118 116	46.71 48.15
9	M-R C	15,563 15,549	164 164	129 129	168 158	114 114	54.61 51.60
10	M-R C	14,833 14,383	161 159	127 126	156 154	112 111	53.89 53.63
11	M-R C	14,469 14,739	159 161	126 127	154 155	111 112	54.65 54.41
12	M-R C	12,601 12,100	149 146	117 115	143 141	102 101	64.25 61.99

\*M-R is the mid-radius area of the specimen.  
 \*\*C is the center area of the specimen.

Tabella 4.2. Dimensioni del sistema globulare dell'alluminio e valutazione della densità

Figure 4.14 e 4.15 mostrano le medie delle dimensioni dei grani e le misure dei diametri tra i pezzi del gruppo A evidenziando in particolar modo la riduzione dell'area media dei grani passando da una realizzazione senza stirring ad un'agitazione di tipo convenzionale.

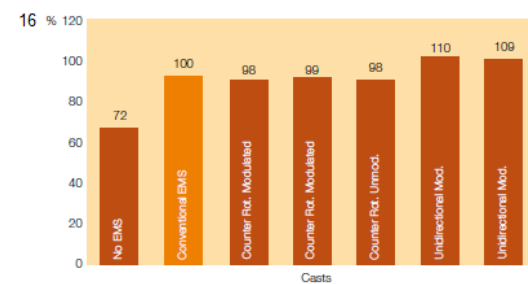
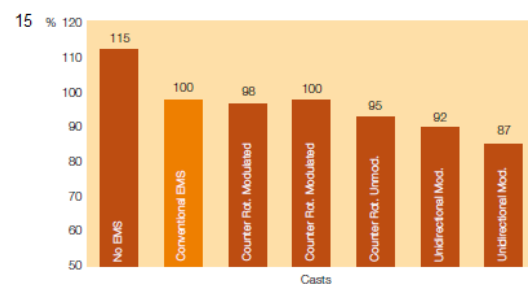
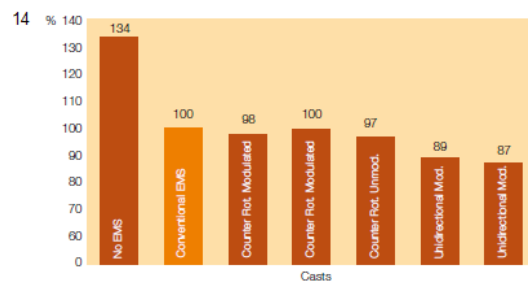


Figura 4.14. Area media dei globuli ottenuti in diverse condizioni di stirring. Figura 4.15. Lunghezza media dei globuli della lega di alluminio. Figura 4.16. Densità dei globuli ottenuta con diverse condizioni di stirring.



# CAPITOLO 5

## Compositi metallici

### 5.1. Introduzione

I compositi a matrice metallica sono materiali ibridi che esibiscono le migliori proprietà di materiali diversi, come la duttilità e la tenacità del metallo e l'elevata durezza e modulo elastico dati dal materiale ceramico.

L'industria aerospaziale ha portato l'applicazione e l'uso dei materiali compositi nei componenti delle sonde spaziali; materiali ad alte prestazioni e di alta integrità sono richiesti per affrontare ambienti estremi e per applicazioni critiche quali le missioni nello spazio. È interessante notare che durante il suo ciclo di vita, l' "International Space Station" è soggetta a circa 175000 cicli termici da  $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  [10]. Durante gli ultimi quattro decenni i compositi a matrice di alluminio sono stati specificatamente sviluppati sia per soddisfare l'industria aerospaziale sia per quanto riguarda la difesa.

Anche se i compositi metallici offrono molti vantaggi, essi hanno comunque alcune criticità come la bassa tenacità a frattura e difficile lavorabilità.

La preoccupazione principale nella lavorazione dei compositi metallici è l'elevata usura dovuta all'azione abrasiva delle particelle ceramiche di rinforzo. Il taglio deve essere in grado di resistere all'intermittenza di parti dure (rinforzi) e "tenere" (matrice) dei materiali. Utensili in diamante policristallino sono consigliati per lavorare questa particolare classe di materiali ma l'elevato costo di tali strumenti insieme alla necessità di frequenti sostituzioni aumenta notevolmente il costo del processo.

Metodi di lavorazione tradizionali sono stati applicati ma con scarsi risultati; altri processi non convenzionali come l'elettroerosione, gli ultrasuoni e il taglio laser forniscono risultati di precisione ma sono anch'essi caratterizzati da costi molto elevati.

La sfida principale rimane comunque il processo di realizzazione; disperdere le particelle nella matrice e raggiungere un forte legame interfacciale sono gli scopi principali del processo.

## 5.2. Stir casting

Le tecniche di stirring, ampiamente utilizzate per il miscelamento di metalli allo stato fuso, sono state recentemente riviste per poter disperdere in maniera ottimale piccole percentuali volumetriche di nano particelle nelle matrici metalliche.

I vincoli correlati a tale miscelazione sono:

- Introduzione di particelle nel fuso;
- Agglomerazione di particelle;
- Debole legame tra matrice e rinforzo dovuto alla contaminazione superficiale durante l'inserimento delle particelle.

L' aumento dell'energia all'interfaccia aumenta l'energia libera del sistema, provocando la formazione di agglomerati. In realtà, mescolando semplicemente per mezzo di attrezzi meccanici non si impedisce la formazione di cluster di particelle.

Strumenti alternativi, come appunto lo stirring elettromagnetico, sono stati sviluppati per migliorare la dispersione delle particelle e quindi la qualità del materiale finale.

## 5.3. Composito $Al_3Ti$ tramite EMS

La lega di alluminio 6351 e il reagente  $K_2TiF_6$  sono stati utilizzati per produrre il composito  $Al_3Ti$  tramite stirring elettromagnetico e per osservarne dunque i benefici che tale processo può apportare alla struttura del materiale [11].

La lega di alluminio utilizzata è così composta: 0,7-1,3% Si, 0,4-0,8% Mg, 0,4-0,8% Mn, <0,5% Fe, <0,2% Zn, <0,2% Ti, <0,1% Cu.

In primo luogo  $K_2TiF_6$  viene preriscaldato in modo tale da essere disidratato, in un forno elettrico a  $250^\circ C$  per 3 ore. In seguito, una volta raffreddato, è stato unito a  $CaF_2$  e  $LiCl$ ; nello stesso tempo il lingotto di lega d'alluminio è stato fuso in un forno sotto atmosfera di Argon e mantenuto a  $720^\circ C$ . Una certa quantità di reagenti, coperti da strati di alluminio vengono inseriti nel forno in modo di far avvenire la reazione istantaneamente.

È stato utilizzato dunque uno stirrer elettromagnetico per aumentare l'omogeneizzazione durante l'intera reazione. Il forno è stata posto al centro della cavità dello stirrer, dove la media dell'intensità magnetica indotta è di circa 0,025 T. Il

tempo di durata della reazione è stato di 3 minuti, dopodiché il materiale è stato rimosso e raffreddato ad una velocità di 40-60 °C /s.

### 5.3.1. Risultati

Quando  $K_2TiF_6$  viene emulsionato con  $CaF_2$  e  $LiCl$  la temperatura del sistema scende da 800 a 720 °C ; senza l'applicazione del campo elettromagnetico la velocità di diffusione dell'elemento Ti è limitato e ciò rallenta l'accrescimento di  $Al_3Ti$ . Con l'ausilio del sistema EMS viene invece accelerato il processo di emulsione di  $K_2TiF_6$  e la reazione solido-liquido è in parte trasformata in reazione liquido-liquido; la velocità di nucleazione di particelle di  $Al_3Ti$  è quindi incrementata e le dimensioni dei grani risultano affinate.

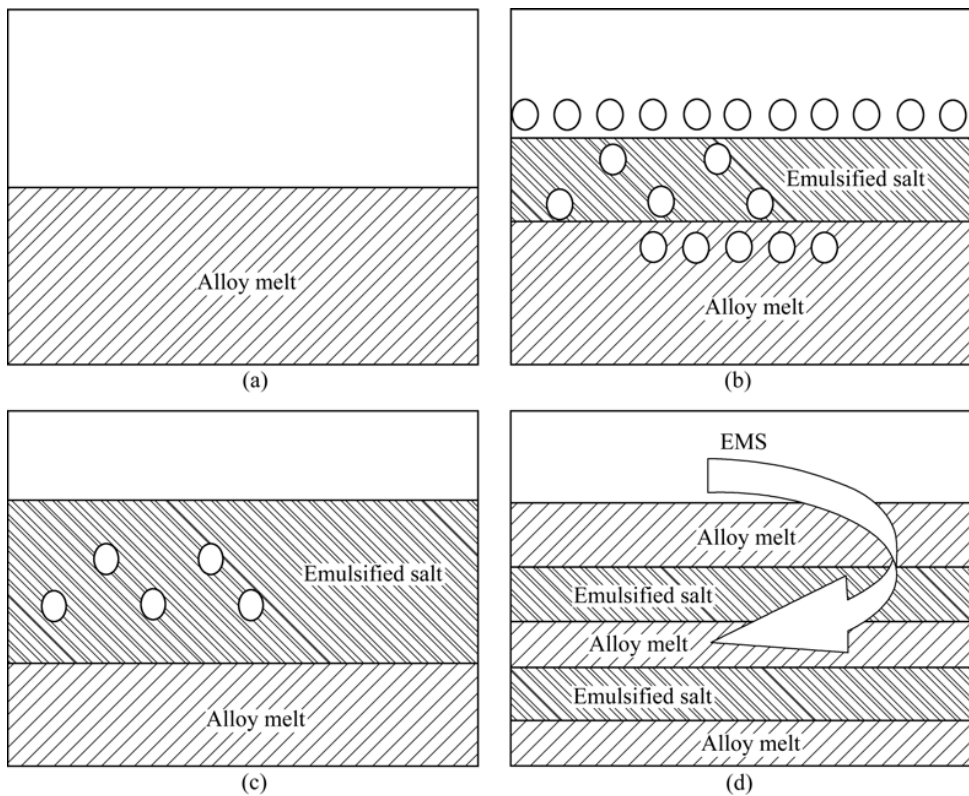


Figura 5.1. Diagramma schematico del processo di emulsione del sale  $K_2TiF_6$  usando EMS e flussi (○) indica le particelle di  $K_2TiF_6$ : (a) no sale; (b) aggiunta del sale senza flussi; (c) aggiunta di sale con flussi; (d) con flussi e EMS.

#### 5.4. Omogeneizzazione tramite ultrasuoni

Come possibile alternativa allo stirring elettromagnetico nella produzione di materiali compositi con elevato grado di omogeneità microstrutturale è stato sperimentato un processo che sfrutta le caratteristiche delle onde ultrasonore.

Onde di ultrasuoni ad alta intensità (oltre i  $25 \text{ W/cm}^2$ ) producono un effetto di dispersione e tendono ad omogeneizzare la microstruttura del fuso. Una sonda a ultrasuoni è immersa nel fuso per creare il campo acustico e le particelle vengono aggiunte durante il processo. L'effetto acustico crea piccole concentrazioni di calore che tendono ad aumentare localmente la temperatura del fuso; ciò aumenta la bagnabilità delle particelle e favorisce una buona dispersione.

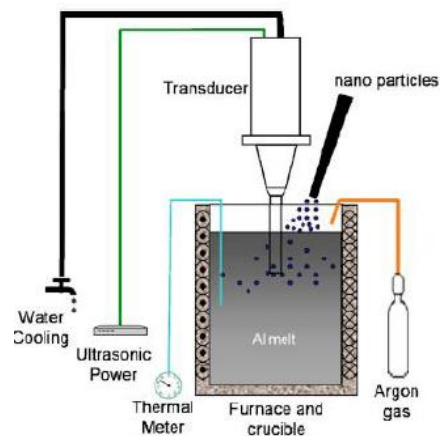


Figura 5.2

È stato verificato che con una potenza di 3,5 kW il carico di rottura e di snervamento del materiale prodotto tramite questo sistema sono stati aumentati del 60 e del 100%.

La potenza necessaria per il raggiungimento della dispersione ottimale delle particelle è proporzionale alla quantità di materiale trattato.

A causa dunque dell'elevato e dispendioso consumo di energia che ne conseguirebbe questo processo non è ancora stato esteso in ambito industriale ma utilizzato solo sperimentalmente.

L'utilizzo invece di stirrers elettromagnetici sta ottenendo sempre più approvazioni in campo metallurgico risultando un ottimo compromesso tra qualità desiderata e costi.

# CAPITOLO 6

## Apparati industriali

### 6.1.Ergolines-Quality Steel Making

Acciaio di alta qualità, con pochissime imperfezioni, per una domanda internazionale sempre più esigente. Un risultato ottenibile a patto che si intervenga opportunamente nella colata continua, controllandone il processo di solidificazione, limitando l'insorgenza di alcuni difetti caratteristici e migliorando così le caratteristiche metallurgiche del prodotto finale. Il “segreto” sta negli stirrer elettromagnetici, macchine in grado di produrre un campo magnetico per “agitare” l'acciaio fuso.

Ergolines Lab S.r.l., società di servizi R&D multidisciplinari per le aziende attiva in AREA Science Park, ha puntato molto su questa tecnologia, ottenendo in pochissimi anni una posizione emergente a livello mondiale in questo mercato di nicchia. Ma come agiscono gli stirrer? Per inquadrare il contesto di applicazione, la produzione dell'acciaio in colata continua prevede una sequenza di forno fusorio, siviera e paniera che alimenta più linee di colata. Dalla paniera, l'acciaio fluisce in un certo numero di lingottiere di rame, raffreddate ad acqua, dove l'acciaio inizia il processo di solidificazione. Allontanandosi progressivamente dalla lingottiera, la sezione d'acciaio in fase liquida si riduce, fino alla chiusura completa del cono. È lungo questo tratto che vengono collocati gli stirrer (EMS: ElectroMagnetic Stirrers), che prendono il nome di MEMS, SEMS o FEMS a seconda che vengano alloggiati, rispettivamente, in lingottiera (Mould), in linea (Strand), o nella parte di chiusura del cono di acciaio liquido (Final) [13].



Figura 6.1. Esempio di stirrer

Gli stirrer possono essere immaginati come statori di macchine elettriche asincrone, in grado di produrre un campo magnetico rotante che induce delle correnti parassite, il cui effetto è quello di originare la forza che è la vera responsabile dell'agitazione dell'acciaio liquido. Le modalità con cui avviene tale rimescolamento sono piuttosto complesse e vedono l'interazione di fenomeni elettromagnetici e fluidodinamici, determinanti nel conferire le caratteristiche metallurgiche desiderate agli acciai. Tali fenomeni dipendono a loro volta da numerosi parametri, in particolare dalla frequenza e dall'intensità del campo prodotto dallo stirrer, dalle caratteristiche geometriche dello stirrer stesso e della lingottiera, dal restringimento della sezione lungo la linea di colata, dalle prestazioni della macchina di colata ecc.. In breve si tratta di un'interazione di molte variabili che determinano le caratteristiche dei campi elettromagnetico e fluidodinamico e, di conseguenza, la composizione e la struttura degli acciai prodotti.

Si può facilmente comprendere come gli studi e le esperienze maturate nell'approfondire contenuti così complessi rappresentino un prezioso know how aziendale, unico sul mercato. Ad oggi, infatti, nessun altro produttore di stirrer ha eseguito un'analisi puntuale e soddisfacente dell'interazione dei due campi elettromagnetico e fluidodinamico: esistono solo alcuni esempi di calcolo, condotti con strumenti peraltro inadeguati, che rimangono lontani dal risolvere la situazione impiantistica reale. Ergolines, invece, ha affrontato e sta ulteriormente affinando uno

dei primi studi rilevanti del fenomeno, estremamente articolato e matematicamente complesso, che va sotto il nome di magnetofluidodinamica. Non si tratta “solo” di simulazione mediante gli strumenti più adatti ed efficaci per l’analisi agli elementi finiti, ma di un vero e proprio ausilio alla progettazione, che risulta sempre più mirata all’ottimizzazione custom-oriented degli impianti di colata continua. Risulta fondamentale una conoscenza approfondita dell’intero processo di colata e, soprattutto, degli aspetti metallurgici: non va dimenticato, infatti, che è la metallurgia a dettare le regole di progettazione o, meglio, a definire i target prestazionali, che vanno di pari passo con la qualità degli acciai prodotti.

Gli stirrer agiscono riducendo inclusioni e soffiature superficiali e sottopelle, cricche, porosità, segregazione centrale ed a “V”, migliorando le strutture di solidificazione primaria ed aumentando percentualmente la zona equiassica. Per farlo però vanno dimensionati e collocati secondo criteri adeguati, che è possibile definire esclusivamente conoscendo gli effetti metallurgici delle diverse scelte progettuali, derivanti dai risultati della simulazione magnetofluidodinamica.

Ergolines, tuttavia, non si limita a progettare gli stirrer, ma ne ha avviato la produzione, che sta seguendo ritmi progressivamente più intensi, rincorrendo una domanda sempre crescente, trainata anche dal recente trend positivo del mercato dell’acciaio. L’installazione e l’avviamento di molti impianti di stirring in Paesi lontani, tipicamente asiatici o sudamericani, ha imposto, inoltre, una strutturazione aziendale che prevede ora anche attività di service post-vendita. È certo che per fornire un prodotto competitivo, limitando per quanto possibile costosi interventi a lungo raggio, Ergolines ha raggiunto un ottimo livello di affidabilità costruttiva e operativa degli stirrer prodotti. Non vanno infatti dimenticate le severe condizioni di esercizio in cui essi operano: temperature elevate, sollecitazioni meccaniche indotte dalla vibrazione della lingottiera, alimentazione PWM con onde quadre rapidamente variabili nel tempo e, soprattutto, raffreddamento in flusso d’acqua. Sono infatti sempre più diffuse le soluzioni che prevedono l’esercizio degli stirrer immersi in un circuito di raffreddamento ad acqua, nella maggioranza dei casi non demineralizzata, rispetto alla soluzione a raffreddamento interno, che prevede l’impiego di conduttori di rame cavi. Se da un lato gli avvolgimenti vengono raffreddati per immersione con elevate efficienze di scambio termico, dall’altro questa configurazione sottopone l’isolamento ad un rischio di invecchiamento precoce. Da qui emerge una particolare cura posta nel processo di impregnazione, cruciale per garantire la necessaria affidabilità, ormai riconosciuta, al prodotto Ergolines.

### **6.1.1.M-EMS (stirrer in lingottiera)**

La posizione di uno stirrer in lingottiera deve essere valutata in caso di colaggio con getto protetto e in presenza di uno stirrer in linea (o al secondario).

Da impiegare perché:

- Limita le inclusioni superficiali di scoria (surface slag)
- Limita le inclusioni sotto pelle di scoria (subsurface slag)
- Limita le soffiature superficiali (pinholes)
- Limita le soffiature sotto pelle (blowholes)
- Diminuisce il rischio dei breakouts
- Migliora le strutture di solidificazione primarie (columnar structur)
- Limita la formazione di cricche interne (internal cracks, star cracks)
- Riduce la porosità centrale (center porosities, mingot)

La presenza di uno scaricatore per il colaggio può implicare l'abbassamento relativo alla posizione dello stirrer al fine di ridurre il fenomeno di inglobamento delle polveri lubrificanti. Al contrario con un getto libero la posizione dello stirrer può essere mantenuta più in alto e vicina al menisco.

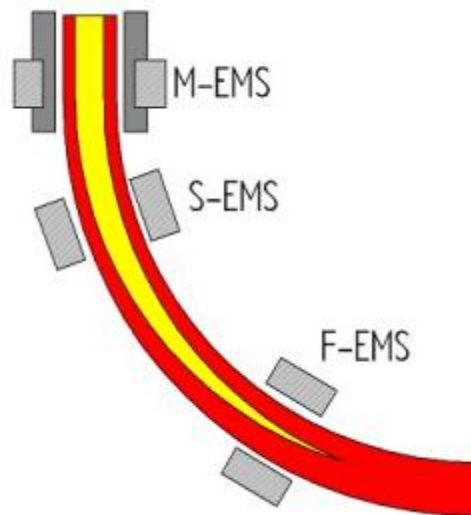


Figura 6.2. Posizionamento delle diverse tipologie di stirrer



### **6.1.2.S-EMS (stirrer in linea o al secondario)**

La posizione dello stirrer in linea o al secondario deve essere valutata in relazione alla situazione che si desidera avere nel punto di solidificazione finale. L'ideale si ha quando il pool-liquido residuo all'interno della billetta o blumo raggiunge il 20-30% della sezione del prodotto. Quest'ultime percentuali variano in funzione della quantità di carbonio nell'acciaio e dell'eventuale presenza di uno stirrer finale.

Da impiegare perché:

- Migliora le strutture di solidificazione primarie (columnar structur)
- Limita la formazione di cricche interne (internal cracks, star cracks)
- Riduce la porosità centrale (center porosities, miningot)

### **6.1.3.F-EMS (stirrer al piede)**

La posizione di uno stirrer al piede deve essere valutata con l'obiettivo di agire di agire nella zona dove inizia l'ultima fase della solidificazione. L'impiego dello stirrer al piede è necessario quando sussistono esigenze altamente qualitative al centro delle billette o blumi.

Da impiegare perché:

- Migliora la zona di solidificazione centrale aumentando la % di zona equiassica
- Riduce la segregazione centrale soprattutto per gli acciai ad alto tenore di carbonio
- Riduce la porosità centrale (center porosities, miningot)

## 6.2.Fuji-CCLM(Cold Crucible Levitation Melting furnace)

La figura 6.3 mostra uno spaccato del modello a crogiolo freddo impiegato dalla Fuji per realizzare la fusione per levitazione elettromagnetica, evidenziandone i principi.

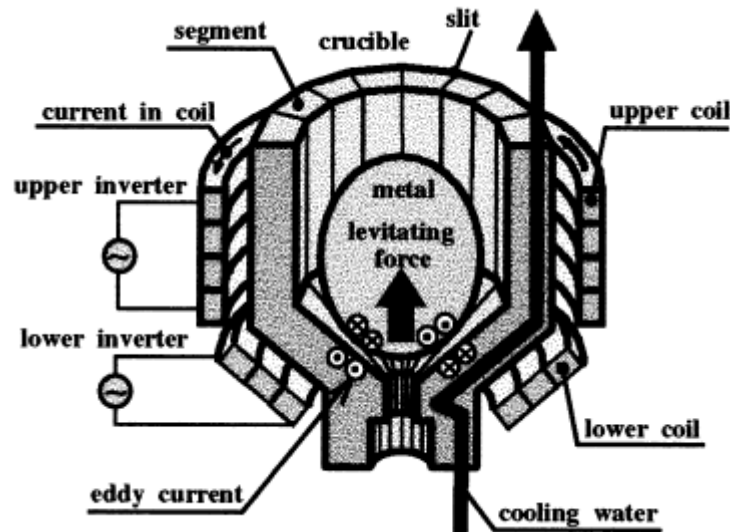


Figura 6.3. Modello a crogiolo freddo

In questa configurazione si osserva che la risultante delle forze elettromagnetiche agenti alla superficie della carica ha una netta componente diretta verso l'alto (lifting force) che risponde all'esigenza di sospensione del fuso durante il processo di fusione, mentre la geometria tendenzialmente sferica della carica è dovuta alle forze repulsive magnetiche analizzate nel capitolo 1.

Pur esistendo un valore ottimo della frequenza rispettivamente per il riscaldamento/fusione da indurre nel pezzo e per la sospensione della carica, la tabella 5.1 evidenzia come tali valori siano fra loro notevolmente diversi, sottolineando la quasi impossibilità di realizzare i due effetti in modo combinato, intervenendo come unico parametro sulla frequenza. La distribuzione delle forze magnetiche alla superficie della carica viene fortemente influenzata anche dalle correnti parassite indotte dal sistema induttore prima alla superficie del crogiolo, poi alla carica, ed esse dipendono a loro volta in gran misura dalle specifiche costruttive del crogiolo.

Per risolvere questo problema la Fuji Electric [12] ha pensato di progettare un convertitore a doppia configurazione: per ottenere delle condizioni stabili di fusione, al

posto di un unico blocco di spire che avvolge il crogiolo, ha adottato due induttori separati, fra loro fisicamente indipendenti. Ciascuno di essi è collegato ad una propria fonte di alimentazione che consente di scegliere la frequenza più opportuna in vista dell'effetto elettromagnetico che si vuole ottenere:

- nella bobina inferiore, posizionata in corrispondenza della parte conica del crogiolo, si fa scorrere corrente a bassa frequenza, nell'ordine di qualche kHz;
- nella bobina superiore, posizionata in corrispondenza del tratto cilindrico del crogiolo, la frequenza è maggiore, e arriva a decine di kHz.

Con questo sistema si riescono a controllare in modo separato e indipendente il fenomeno della sospensione e della fusione vera e propria.

Per procedere all'estrazione del metallo fuso da crogiolo, qualora se ne presentasse la necessità, è stato progettato un sistema che ne prevede la spillatura da un foro posto sul fondo del crogiolo, da dove si può procedere direttamente alla colata in uno stampo. Questo sistema ha il vantaggio di non richiedere dispositivi di colata accessori, evitando anche il contatto tra metallo e crogiolo.

Vediamo ora due delle apparecchiature che la Fuji-Electric ha progettato e realizzato, che seguono i principi della fusione per levitazione magnetica, e che sono impiegate anche in reali applicazioni:

- apparato A
- apparato B

#### 6.2.1.CCLM fornace – apparato A

In questa soluzione è stato progettato e realizzato un crogiolo segmentato, raffreddato ad acqua, composto da 30 sezioni di rame ad elevata purezza. Le specifiche dimensionali dello stesso, consentono una capienza interna di 10000 cm<sup>3</sup>, cioè una capacità di fusione di 7000 cm<sup>3</sup> (diametro di 260 mm, altezza di 320 mm). La bobina superiore viene alimentata da una sorgente di potenza a 30 kHz, che come valore massimo erogabile ha 1000 kW; la potenza di ingresso alle spire è comunque pari a 400 kW. A questa bobina superiore spetta infatti il compito di riscaldare e portare a fusione il metallo che si andrà a posizionare nel crogiolo.

La bobina inferiore riceve 200 kW di potenza, ed è collegata ad una sorgente che le funziona a 3 kHz (avendo sempre come massimo valore i 1000 kW). Con questo

apparato si è riusciti ad ottenere un notevole risultato di fusione: 50 kg di acciaio inossidabile, fusi in soli 5 minuti.

### 6.2.2.CCLM furnace – apparato B

Il crogiolo impiegato in questa realizzazione si differenzia dal precedente per dimensioni e numero di sezioni: ha diametro 120 mm e altezza 200 mm, e il numero di sezioni risulta ridotto a 20. Di conseguenza, la capacità del crogiolo è di 700 cm<sup>3</sup>, con una capacità di fusione pari a 500 cm<sup>3</sup>. Le altre specifiche sono riassunte nella tabella 6.1.

	Frequenza dell'alimentazione	Potenza in ingresso	Valore massimo erogabile
Bobina superiore	50 kHz	100 KW	350 KW
Bobina inferiore	3 kHz	50 KW	100 KW

Tabella 6.1. Specifiche dell'apparato

Con questa soluzione si sono fusi con successo 2 kg di titanio puro in soli 3 minuti, ma è nella fusione combinata di titanio e tantalio che si sono ottenuti risultati più significativi; l'esperimento ha dimostrato come si possa ottenere una loro lega partendo dai metalli base puri (grado di purezza 99,9% per entrambi) in principio non amalgamati, e creare una lega (Ti-15wt%Ta) a mezzo di un singolo processo di fusione, senza tappe per fusioni successive.

### 6.2.3. Analisi condotte

Prima di portare a termine la progettazione degli apparati descritti, la Fuji-Electric si è concentrata sullo studio delle correnti parassite per valutare gli effetti della forza elettromagnetica nel metallo fuso e per approfondire l'analisi delle perdite di calore nel crogiolo. Hanno inoltre analizzato la superficie libera della massa liquida per valutarne

la forma. Le tematiche attorno cui hanno concentrato le ricerche si possono sintetizzare come segue:

- stima della forza elettromagnetica alla superficie del fuso e perdite di calore
- l'ottimizzazione della struttura del crogiolo e delle bobine
- progettazione del sistema di raffreddamento

l'analisi delle correnti parassite da loro eseguita, è stata condotta ampliando ed adattando al caso in esame delle precedenti metodologie d'ispezione basate su di un metodo integro-differenziale d'analisi. Il calcolo delle correnti parassite indotte nel crogiolo è stato svolto in modo tale da isolare temporaneamente l'effetto combinato di entrambe le bobine, così da ricavare separatamente i valori delle correnti riferite rispettivamente alla bobina superiore e alla bobina inferiore. Questo è possibile perché le frequenze caratterizzanti le correnti che fluiscono in ciascun blocco di spire sono specifiche per ognuno e diverse fra loro.

L'effetto congiunto di entrambe è stato poi stimato sovrapponendo e risultati delle singole analisi. Sono state dunque studiate le correnti parassite in due diverse condizioni:

- a) simulazione dell'andamento delle correnti dando corrente alla sola bobina superiore
- b) simulazione dell'andamento delle correnti dando corrente alla sola bobina inferiore

in riferimento a ciò si è potuto osservare che:

- la distribuzione delle correnti nel caso a) risulta uniforme in senso orizzontale nella parte interna-superiore del crogiolo
- nel caso b) manca questa omogeneità vista la differente configurazione geometrica dell'avvolgimento che circonda la parte inferiore del crogiolo; va notato invece come qui le linee si fanno più fitte, specie in corrispondenza del foro alla base del crogiolo.

Dove si ha una maggiore densità di correnti parassite (cioè dove si riduce la distanza tra due linee consecutive), lì si individuano le regioni maggiormente soggette a perdite di calore: nel caso specifico, i ricercatori della Fuji-Electric hanno individuato e provato

che questa zona coincide con il fondo del crogiolo, attorno al foro, zona che va necessariamente raffreddata per impedire che la temperatura si innalzi troppo.

Per quanto riguarda poi la distribuzione delle forze elettromagnetiche sono riusciti ad evidenziare come quelle prodotte dall'avvolgimento inferiore siano di intensità maggiore in corrispondenza della base della massa fusa piuttosto che nella parte soprastante.

L'effetto combinato delle due bobine consente così di ottenere:

- il controllo selettivo della fase di sospensione del carico: intervenendo sulla frequenza della bobina inferiore si riesce a concentrare l'effetto voluto delle correnti indotte, cioè ottenere un'opportuna risultante delle forze elettromagnetiche presenti alla superficie in maniera tale da prediligere l'effetto di sospensione
- il distacco del fuso dalle pareti del crogiolo per la quasi-uniforme distribuzione delle forze sul perimetro esterno della carica, in particolare nella parte superiore
- la possibilità di gestire il processo intervenendo su variabili controllabili dall'esterno, come la frequenza delle correnti che scorrono nei due induttori.

I ricercatori della Fuji, visto quanto emerso dall'analisi sulle correnti parassite, visti cioè i livelli di temperatura da monitorare sul fondo del crogiolo, hanno successivamente affrontato uno studio sulle perdite di calore, investigando sui fenomeni di trasferimento di calore nel crogiolo, per poter migliorare la struttura del condotto di raffreddamento, interno a ciascuna sezione del crogiolo.

Come precedentemente ricordato, le temperature attorno al foro alla base del crogiolo sono risultate essere più elevate che altrove: lì la densità delle correnti parassite è infatti maggiore rispetto a qualsiasi altra zona. Per migliorare l'effetto di raffreddamento, i ricercatori hanno sviluppato una deviazione del condotto di raffreddamento nelle vicinanze del foro, così da consentire all'acqua di fluire più efficacemente. Con questa soluzione si è inoltre evitato il ristagno dell'acqua nel condotto.

# Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha affrontato un argomento fortemente innovativo, in continua fase di perfezionamento, per cui sono state incontrate delle difficoltà soprattutto dovute alla scarsa reperibilità delle documentazioni necessarie.

Tuttavia sono emersi chiaramente i vantaggi dell'utilizzo dei sistemi di stirring nella produzione metallurgica; l'intenso rimescolamento elettromagnetico che si riesce ad indurre nel bagno fuso consente una migliore omogeneità nella composizione dello stesso, portando dunque ad un sostanziale upgrade delle caratteristiche del prodotto.

Per quanto concerne i parametri che sono risultati essere cruciali per la corretta realizzazione delle condizioni di agitazione è emerso che un fattore chiave è la frequenza dell'alimentazione, che assieme all'intensità del campo è determinante nel trasferimento di calore al pezzo.

Per quanto riguarda l'analisi degli apparati proposti da Fuji-Electric e da Ergolines viene confermato l'elevato interesse applicativo della materia trattata; queste soluzioni tecniche sembrano offrire garanzia sulle ottime prospettive applicative in campo metallurgico dove la produzione di metalli ad elevato grado di purezza e notevoli prestazioni costituisce un fattore chiave di successo.





# Bibliografia

- [1] J.Bannister, G.Broihanne, 2000, "Using cold-crucible melting for titanium precision castings", JOM journal of the minerals, metals and materials society, Volume 52, Number 5, pp. 21-23
- [2] K.Moffatt, 1991, "Electromagnetic Stirring", Physic of Fluids A, pp. 1336-1343
- [3] M.Fujita, H.Tadano, T.Take, 1994, "Levitational melting of several kilograms of metal with a cold crucible", IEEE Transactions of Magnetics, vol.30, no 6
- [4] Y.Ashida, M.Fujita, K.Kainuma, H.Tadano, T.Take, M.Yamazaky, 1996, "Development of large size cold crucible levitation melting", U.I.E.XII Congress on Electricity Application
- [5] S.Asai, "Recent development and prospect of electromagnetic processing of materials", 2000, Science and Technology of Advanced materials, (Elsevier)
- [6] P.Gillion, "Cold crucible induction melting: Theory and application", 2001, Proceedings of HIS-01
- [7] N.El-Kaddah, T.T.Natarajan, 1999, "Electromagnetic stirring of steel: effects of stirrer design on mixing in horizontal electromagnetic stirring of steel slabs", Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries
- [8] L.Beitelman, C.Curran, D. Lavers, G.Tallback, 2009, "A novel FEMS system for continuous casting of steel and bloom", ABB Value Paper
- [9] H.Dong, S.Gu, H.Hao, L.Yao, X.Zhang, 2010, "Effects of electromagnetic stirring on microstructure and mechanical properties of super light Mg-Li-Al-Zn Alloy", Transaction of Nonferrous Metals Society of China
- [10] C.Borgonovo, D.Apelian, "Manufacture of Aluminum Nanocomposites: A *Critical Review*", Worcester Polytechnic Institute

[11] G.Li, H.M.Wang, Y.T.Zhao, D.B.Chen, G.Chen, X.N.Cheng, 2009, "Microstructure of in situ Al<sub>3</sub>Ti/6351Al composites fabricated with electromagnetic stirring and fluxes", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 577-583

[12] [www.fujielectric.com](http://www.fujielectric.com)

[13] [www.ergolines.it](http://www.ergolines.it)