

**Università degli Studi di Padova**  
**Facoltà di Ingegneria**  
**Corso di Laurea in Ingegneria Gestionale**

**TESI DI LAUREA**

**Sistemi in vuoto o in atmosfera controllata  
per la fusione di metalli leggeri**

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

**Laureando: DANIEL CARLASSARA**

**Anno Accademico 2010 - 2011**

# INDICE

<b>Introduzione</b> .....	<b>3</b>
---------------------------	----------

## CAPITOLO 1

<b>L'alluminio e le sue leghe</b> .....	<b>5</b>
1.1 Introduzione .....	5
1.2 Produzione alluminio primario .....	7
1.3 Produzione alluminio secondario.....	8
1.4 Principali processi di lavorazione .....	10
1.4.1 Pressocolata sotto vuoto .....	11
1.4.2 Processi innovativi .....	14

## CAPITOLO 2

<b>Principi dell'elettromagnetismo applicati alla levitazione</b> .....	<b>17</b>
2.1 Elettromagnetismo .....	17
2.2 Levitazione magnetica nel crogiolo .....	18
2.2.1 Spessore di penetrazione .....	19
2.2.2 Dissipazione dell'energia .....	21
2.2.3 Forze indotte.....	23
2.2.4 Stirring elettromagnetico.....	25

## CAPITOLO 3

<b>Processo di fusione in levitazione magnetica in crogiolo freddo</b> .....	<b>27</b>
3.1 Sistemi di levitazione.....	27
3.1.1 Levitazione senza crogiolo.....	28
3.1.2 Semilevitazione con crogiolo .....	29
3.1.3 Levitazione con crogiolo .....	30
3.2 Analisi strutturale del sistema.....	31
3.2.1 Dimensionamento settori crogiolo .....	32

3.2.2	Configurazione geometrica del crogiolo .....	34
3.2.2.1	Profilo interno.....	35
3.2.2.2	Profilo esterno .....	36
3.3	Frequenza del campo magnetico.....	37
3.4	Solidificazione .....	40

## **CAPITOLO 4**

<b>Sistemi da vuoto.....</b>	<b>45</b>	
4.1	Introduzione .....	45
4.2	Perdite in un sistema sotto vuoto .....	47
4.3	Alluminio e sua affinità con altri elementi.....	51
4.4	Problematiche .....	53
4.4.1	Fenomeno del doppio film di ossido .....	54
4.5	Ottenimento del vuoto.....	57
4.5.1	Tipologie di pompe .....	59
<b>Conclusiones.....</b>	<b>65</b>	
<b>Bibliografia .....</b>	<b>67</b>	

## INTRODUZIONE

La sempre più rilevante richiesta da parte del mercato di prodotti sempre più qualitativi e performanti ha orientato sia l'industria che la scienza verso il miglioramento di quei processi atti all'ottenimento di materiali puri, cioè privi di quelle impurezze che ne peggiorano le caratteristiche.

Un metallo che negli ultimi decenni ha trovato largo impiego e ha sostituito in molti settori l'utilizzo di altri metalli, come ad esempio l'acciaio, è l'alluminio. Questo elemento metallico non ferroso, oltre ad essere ampiamente reperibile nella crosta terrestre, presenta caratteristiche tali da poterlo trovare in molte applicazioni in diversi rami quali l'elettronica, l'industria aerospaziale, l'automotive, l'edilizia, gli imballaggi. Esso presenta inoltre una caratteristica molto importante, ovvero la capacità di legarsi con molti materiali formando le "leghe leggere", potendo così migliorare ulteriormente determinati pregi e permettendogli di ampliare di molto il suo campo di utilizzo.

Un processo in fase di sperimentazione in grado di garantire una elevata purezza nella fusione dell'alluminio è la "fusione in levitazione magnetica in crogiolo freddo", che sfrutta appunto l'assenza di contatti con le pareti del crogiolo salvaguardandone la contaminazione dalle impurità. Grazie ad un campo magnetico variabile creato da degli induttori (opportunosamente orientati) avvolti a spirale attorno al crogiolo e alimentati con corrente alternata, si creano delle correnti indotte all'interno del materiale in grado di generare sia l'effetto di levitazione, grazie all'interazione con lo stesso campo magnetico, che quello di riscaldamento per dissipazione dell'energia. Il crogiolo, solitamente in rame, funge da stabilizzatore per il metallo all'interno e viene opportunamente raffreddato per evitarne la fusione.

Un altro elemento molto importante per il raggiungimento della purezza nei materiali è il vuoto. Operare sotto vuoto (ad esempio durante la fase di fusione e solidificazione) significa infatti asportare tutte quelle molecole normalmente contenute nell'atmosfera dell'ambiente nel quale viene processato il materiale, permettendo dunque di preservarlo da tutte le possibili impurezze presenti. La stessa aria con un tasso di umidità abbastanza elevato contiene una quantità di idrogeno tale da compromettere le caratteristiche di un metallo in fusione (soprattutto l'alluminio).



Questa tesi vuole dunque unificare tali aspetti appena descritti e offrire una panoramica sul processo di fusione dell'alluminio (e relative leghe) utilizzando il crogiolo freddo sotto vuoto, partendo da un'introduzione a tale metallo, passando a descrivere i concetti per il funzionamento del sistema di levitazione, e concludendo descrivendo il vuoto con i relativi benefici e problemi.

## Capitolo 1

### L'ALLUMINIO E LE SUE LEGHE

#### 1.1 Introduzione

[1]

I metalli definiti leggeri, a vantaggio del loro elevato rapporto prestazioni/peso, negli ultimi anni sono riusciti a ritagliarsi un'ampia fetta di utilizzazione in molti settori. Analizzando il fenomeno in ambito produttivo industriale, i metalli risultati essere più interessanti e più utilizzati sono l'alluminio e le sue relative leghe, definite appunto leghe leggere. Le riserve di questo elemento sono molto abbondanti sulla crosta terrestre, ed il suo impiego risulta di recente data per le difficoltà incontrate in passato nell'estrazione dal minerale, lavorazione resa possibile solo dopo l'avvento dell'elettricità.

L'alluminio risulta essere tra gli elementi metallici non ferrosi più abbondanti sulla terra, ma essendo un elemento che facilmente reagisce chimicamente con ciò che gli sta intorno, non lo si può trovare in natura allo stato puro ma solamente combinato con ossigeno e vari minerali, principalmente sotto forma di silicati e di ossidi di alluminio (allumina,  $Al_2O_3$ ). Il minerale più importante e utilizzato per la produzione di alluminio è la bauxite, contenente allumina per circa il 50%.

L'alluminio trova impiego in tutti i principali settori, da quelli più sofisticati come l'elettronica o l'industria aerospaziale, a quelli dell'automotive, dell'edilizia, degli imballaggi, e questa sua versatilità è dovuta al fatto che si tratta di un metallo dotato di specifiche qualità tecnologiche quali :

- leggerezza, risulta avere un peso specifico di circa un terzo dell'acciaio;
- alta conducibilità elettrica e termica;
- ottima resistenza meccanica se utilizzato in lega, può eguagliare quella di un acciaio;

- ottima resistenza alla corrosione e inalterabilità al contatto con alimenti, quindi utilizzabile nell'industria alimentare (lattine o pellicole);
- alta riflettività, utilizzato dunque nel settore dell'illuminazione (costruzione corpi riflettori);
- non genera scintille, al contrario dei materiali ferrosi può essere utilizzato nel settore degli infiammabili ed esplosivi;
- eccellente lavorabilità, sia a caldo sia a freddo, può essere estruso, pressofuso, laminato a spessori sottilissimi, brasato, saldato;
- elevata riciclabilità;
- gradevole aspetto, è un metallo che si presenta di color grigio argento a causa del sottile strato di ossidazione che si forma rapidamente a contatto con l'aria che previene anche la corrosione, viene dunque usato in quei settori che prestano attenzione all'estetica dei prodotti.

Un'altra caratteristica che distingue l'alluminio è la sua capacità di legarsi con molti materiali formando le leghe di alluminio, altresì dette leghe leggere. Per migliorare le caratteristiche meccaniche si aggiungono all'alluminio determinati quantitativi di elementi alliganti, in questo modo le caratteristiche del metallo ottenuto cambiano radicalmente rispetto al metallo base che si presentava tenero e duttile. Si possono così ottenere delle leghe, in base al metallo che si aggiunge, che rispondono a diverse specifiche e possono così essere usate in molti campi come ad esempio quello aeronautico, motoristico, ferroviario, per costruire telai per biciclette, serbatoi e tubi in pressione o accessori da cucina.

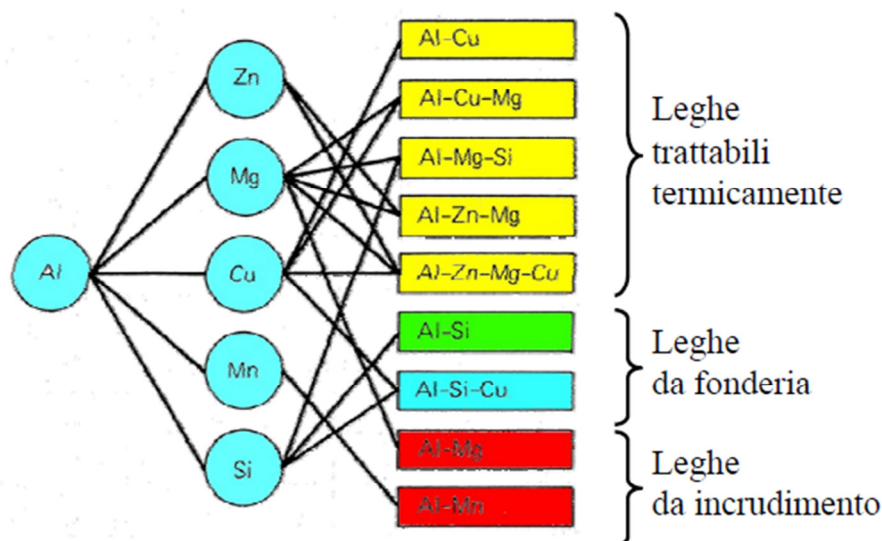


Figura 1.1 – Leghe di alluminio maggiormente utilizzate

Come si può notare dalla figura 1.1 gli elementi più utilizzati per ottenere le leghe madri sono :

- silicio (Si), migliora la colabilità e riduce il coefficiente di dilatazione;
- magnesio (Mg), aumenta la resistenza alla corrosione in ambiente alcalino e in mare;
- manganese (Mn), aumenta la resistenza meccanica e alla corrosione;
- rame (Cu), accresce la resistenza meccanica, soprattutto a caldo;
- zinco (Zn), conferisce un'elevata resistenza meccanica, soprattutto se associato al magnesio.

In aggiunta a questi elementi possono essere impiegati altri elementi correttivi che ne migliorano alcuni aspetti prestazionali come ad esempio il nichel, il titanio, il cromo, il piombo, il zirconio, il bismuto.

## 1.2 Produzione alluminio primario

[1] [2]

La produzione dell'alluminio può essere divisa in due grandi categorie :

- produzione alluminio primario;
- produzione alluminio secondario.

La prima tipologia di procedimento riguarda l'ottenimento del metallo a partire dal minerale che lo contiene. Come precedentemente descritto l'alluminio lo si trova in natura principalmente sotto forma di ossido, contenuto a sua volta in un minerale chiamato bauxite.

Non risulta possibile ricavare il metallo direttamente dal suo minerale tramite riduzione con carbonio, come si fa con il ferro, né tantomeno tramite processi elettrolitici in quanto ferro e silicio presenti in quantità apprezzabili nel minerale verrebbero a depositarsi nel catodo. Risulta dunque necessario uno processo intermedio che consiste nell'ottenere allumina della massima purezza che verrà poi trattata con processi elettrolitici.

La produzione risulta dunque suddivisa in due stadi :

- processo Bayer : si ricava l'allumina trattando la bauxite con idrossido di sodio a caldo, che reagendo con l'alluminio produce idrossido di alluminio, mentre gli altri

componenti che non si dissolvono vengono filtrati e scartati (fanghi rossi); il bagno idrossilico viene raffreddato e successivamente scaldato per permettere la fase di calcinazione nella quale avviene la decomposizione in ossido di alluminio e vapor d'acqua;

- processo Hall-Héroult : si porta l'allumina, mescolata con criolite (fluoruro doppio di alluminio e sodio), in particolari celle in acciaio rivestite di mattoni refrattari che presentano un fondo di grafite (catodo) e delle barre rettangolari sempre in grafite (anodo) immerse nel bagno a quasi contatto con la suola; il bagno viene portato ad alte temperature e il fenomeno di elettrolisi è garantito dal passaggio di una corrente continua tra anodo e catodo, e in queste determinate condizioni si verifica la scissione dell'allumina in alluminio e ossigeno.

### 1.3 Produzione alluminio secondario

[2]

Si è descritto in precedenza che una caratteristica dell'alluminio, e delle sue leghe, è l'elevata riciclabilità, infatti esso è un materiale che può essere rifuso indefinitamente senza apprezzabili penalizzazioni qualitative e a costi molto contenuti visto che permette di risparmiare circa il 95% dell'energia necessaria per produrlo dal minerale, e dato che tale metallo presenta una temperatura di fusione relativamente bassa (circa 660 °C). La seconda tipologia di produzione dell'alluminio è proprio quella del riciclaggio : si parte quindi da rottami per riottenere alluminio fuso che può essere nuovamente processato.

I rottami che si utilizzano sono dunque derivanti da diverse fonti, e sono classificabili in prima approssimazione come :

- rottami nuovi, ovvero scarti di lavorazioni e risultano in genere puliti e di lega omogenea;
- rottami vecchi, ovvero beni a fine del loro ciclo d'uso provenienti dalla raccolta differenziata, da operazioni di selezione e disassemblaggio, e normalmente contengono impurità e in leghe eterogenee.

In base alla qualità del metallo riciclato utilizzato si distinguono diversi metodi di fusione, i quali adottano diversi forni :

- rottame pulito, non verniciato : forni a riverbero;
- rottame finemente suddiviso (sfridi di lavorazione) : forni a induzione;
- rottame inquinato, di bassa qualità : forni rotativi;
- rottame inquinato con altri metalli : forni “sloping hearth”.

Il primo tipo di forno viene solitamente usato nella variante “a suola secca”, cioè il metallo viene caricato in una prima camera con fondo inclinato dove viene scaldato dai bruciatori ed il metallo fuso può scorrere così nella seconda camera dalla quale viene effettuata poi l'estrazione.

I forni ad induzione sfruttano il principio dell'induzione elettromagnetica creata da una bobina percorsa da corrente alternata, così nella carica si vengono a formare delle correnti parassite create dal campo magnetico che scaldano il metallo per effetto Joule.

I forni rotativi possono essere di due categorie, vale a dire quelli rovesciabili (più recenti) o quelli ad asse fisso con gli appositi fori di spillatura; in entrambi i casi presentano i bruciatori all'imboccatura del forno, e lo scambio di calore avviene per irraggiamento e per convezione, risultando oltretutto più omogeneo grazie al movimento rotativo.

L'ultima categoria di forni presentano una base inclinata nella quale vengono inseriti i rottami, che grazie ai bruciatori vengono riscaldati fino ad arrivare alla temperatura di fusione dell'alluminio che così scende in una vasca, ed essendo questa temperatura relativamente bassa non porta a fusione gli altri metalli che vengono poi estratti dal forno.

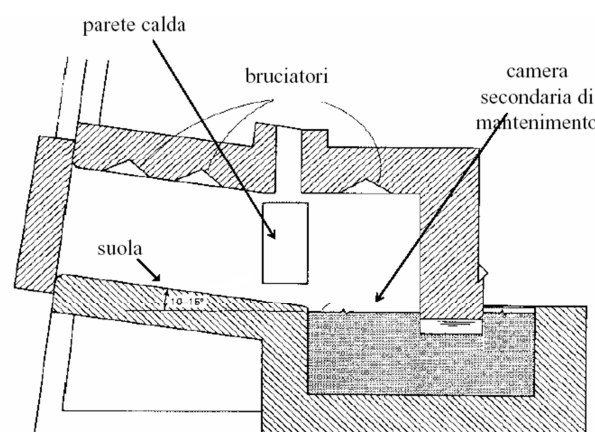


Figura 1.2 – Forno a riverbero a suola secca

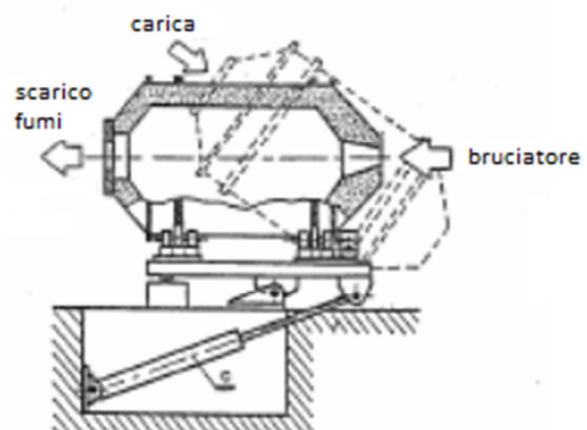


Figura 1.3 – Forno rotativo ribaltabile

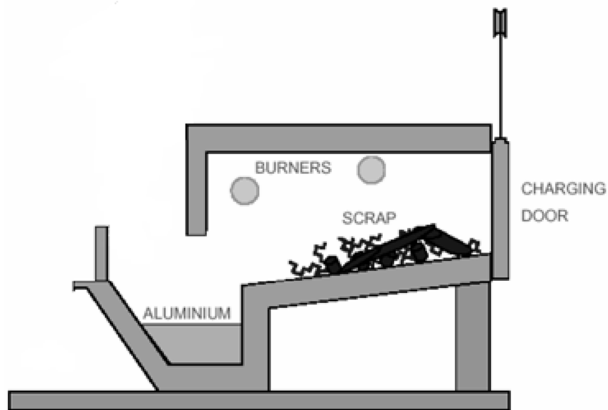


Figura 1.4 – Forno “sloping hearth”

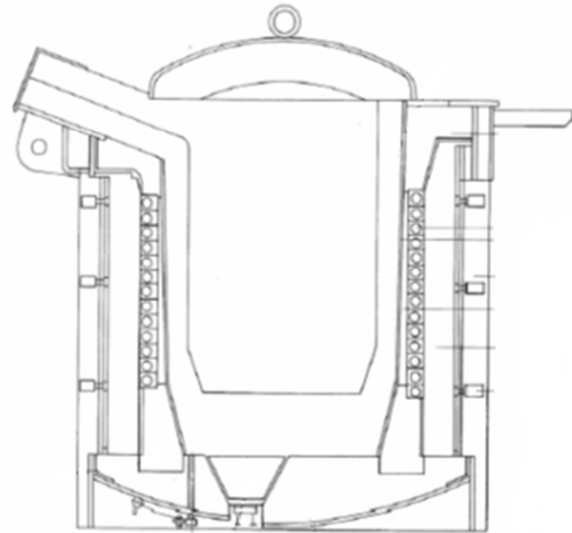


Figura 1.5 – Forno a induzione : crogiolo refrattario circondato da spire induttrici

#### 1.4 Principali processi di lavorazione

[3] [4]

Al termine del processo di fusione si è soliti suddividere l'alluminio e le sue leghe in due principali categorie :

- da lavorazione plastica, per la quale il metallo dovrà essere solidificato in placche o billette per poi subire lavorazioni come la laminazione a caldo o a freddo, l'estrusione, la fucinatura o lo stampaggio;
- da fonderia, per il quale il metallo fuso viene colato con varie tecniche negli stampi per ottenere la forma finale desiderata.

Le principali tecniche da fonderia, usate in ambito industriale per la colata dell'alluminio e delle sue leghe, sono definibili nel seguente modo :

- colata in sabbia : per prima cosa si costruisce il modello, ovvero la forma del pezzo definitiva che voglio ottenere, e si compatta della sabbia silicea (o terra argillosa) attorno ad esso mediante pestellatura manuale, a scossa e vibrazione, a compressione idraulica, mediante il vuoto. Successivamente si estrae il modello ottenendo così uno stampo che corrisponde al negativo del pezzo da ottenere comprensivo del sistema di colata e delle materozze, e si prosegue riempiendo tale stampo con il metallo fuso.

Ultima fase risulta quella di estrazione del pezzo solidificato che verrà in minima parte lavorato e trattato termicamente in base alle necessità.

- colata in conchiglia a gravità : rispetto alla colata in sabbia lo stampo risulta fatto in metallo (stampo permanente) e si evitano in questo modo tutte le operazioni di preparazione. La colata viene effettuata dall'alto in modo che lo stampo si riempia compattando il materiale sotto l'effetto della gravità.
- pressocolata : prevede l'iniezione ad alta velocità del metallo fuso grazie ad un pistone che lo spinge nello stampo metallico dotato di opportuni canali di sfiato ed estrattori. La disposizione del getto (canale in cui entra il metallo fuso) è progettata in modo da realizzare il riempimento dello stampo dal basso verso l'alto.

Sicuramente tra le tecniche proposte la più interessante per lo sviluppo in ambito industriale risulta la pressocolata, processo che permette di ottenere pezzi in modo veloce e con un buon grado di finitura superficiale. Anche questa tecnica però non è esente da difetti, infatti risulta impossibile utilizzare anime per ottenere direttamente delle cavità interne, e risulta impossibile anche trattare termicamente i getti a causa delle minuscole particelle di aria che restano intrappolate durante la colata. L'intenzione di eliminare questo ultimo difetto ha portato dunque a una fase di sperimentazione e sviluppo della tecnica di pressocolata sotto vuoto.

#### **1.4.1 Pressocolata sotto vuoto**

Le elevate velocità raggiunte dal fuso nel processo di pressocolata, unitamente alla complessità geometrica della cavità da riempire, determinano condizioni di notevole turbolenza. In tal modo l'aria e i gas presenti nella cavità possono facilmente venire intrappolati dal fronte di avanzamento liquido, ed inoltre in questo modo aumentano notevolmente la pressione nella cavità ostacolando il riempimento stesso. Risulta dunque evidente come un incremento qualitativo del processo non possa che dipendere dalla rimozione dell'aria dallo stampo prima dell'arrivo del fuso; concetto che ha portato allo sviluppo della pressocolata sotto vuoto.

Attualmente i più diffusi processi utilizzati per questo tipo di tecnica per l'alluminio e le leghe leggere sono il sistema Fondarex e il sistema Vacural.



Il sistema Fondarex è caratterizzato dal montaggio del gruppo di aspirazione direttamente sullo stampo, con valvole ad auto chiusura operative in tempi dell'ordine dei millesimi di secondo, azionate direttamente dal flusso del metallo. La valvola può essere posizionata sul lato o sopra lo stampo, o, laddove fattibile, sul portastampo. In analogia alla pressocolata convenzionale, si possono distinguere tre fasi principali :

- fase d'iniezione: il pistone, alla velocità media di 0.2 m/s, percorre il tratto iniziale della camera, e non appena la cavità è isolata dall'ambiente esterno, si attiva il sistema da vuoto che permette di raggiungere una pressione interna allo stampo dell'ordine dei 200 mbar;
- fase di riempimento dello stampo: il pistone aumenta la sua velocità fino a circa 4 m/s;
- fase di intensificazione della pressione: il pistone esercita la sua azione sul metallo fuso, che nel frattempo ha riempito tutta la cavità; si ha inoltre la chiusura rapida della valvola.

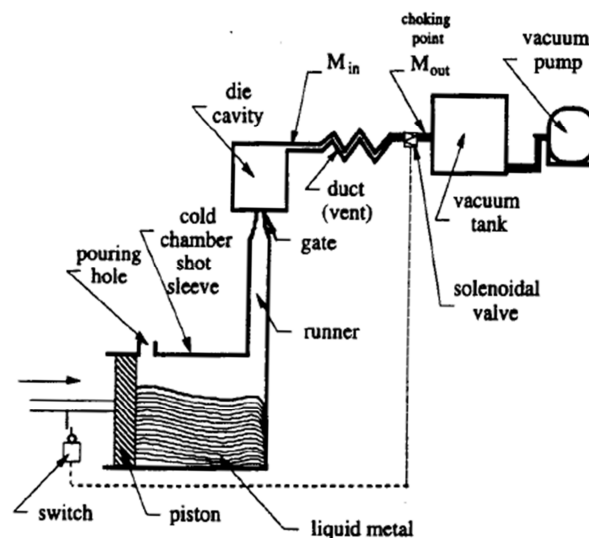


Figura 1.6 – Schema di funzionamento del sistema Fondarex

Il risultato di questo metodo è di ridurre notevolmente la pressione dell'aria residua presente nella cavità dello stampo rispetto al sistema tradizionale di pressocolata. Tuttavia la condizione ideale di raggiungimento di una pressione interna che si aggira intorno ai 50-70 mbar è di difficile ottenimento, e operativamente si riesce ad ottenere una pressione circa tre volte superiore. Varie sperimentazioni confermano comunque che si riesce ad ottenere un

miglioramento delle caratteristiche dei getti pressocolati già ad una pressione interna di circa 500 mbar, condizione che conferma dunque la validità del metodo. Inoltre la flessibilità per cui il sistema descritto può essere adattato ad attrezzature preesistenti senza richiedere costose modifiche è sicuramente una delle sue principali qualità.

L'altro tipo di sistema è il Vacural che consiste invece nella formazione del vuoto non solo nella cavità dello stampo (ovviamente dopo la sua chiusura) ma anche nella camera di iniezione. Nell'altro processo la camera di iniezione era aperta (quindi a pressione atmosferica) per la necessità di introdurre il metallo fuso ad ogni inizio ciclo, in questo caso invece anche questa camera risulta sottovuoto ed il fuso viene inserito tramite aspirazione direttamente dal forno o da un contenitore. In definitiva, il processo avviene secondo le seguenti fasi :

- produzione del vuoto;
- riempimento della camera d'iniezione;
- rimozione dei gas durante il processo di alimentazione del metallo;
- riempimento dello stampo con il metallo fuso sotto la spinta del pistone d'iniezione (ovviamente in condizioni di vuoto);
- solidificazione del metallo sotto pressione.

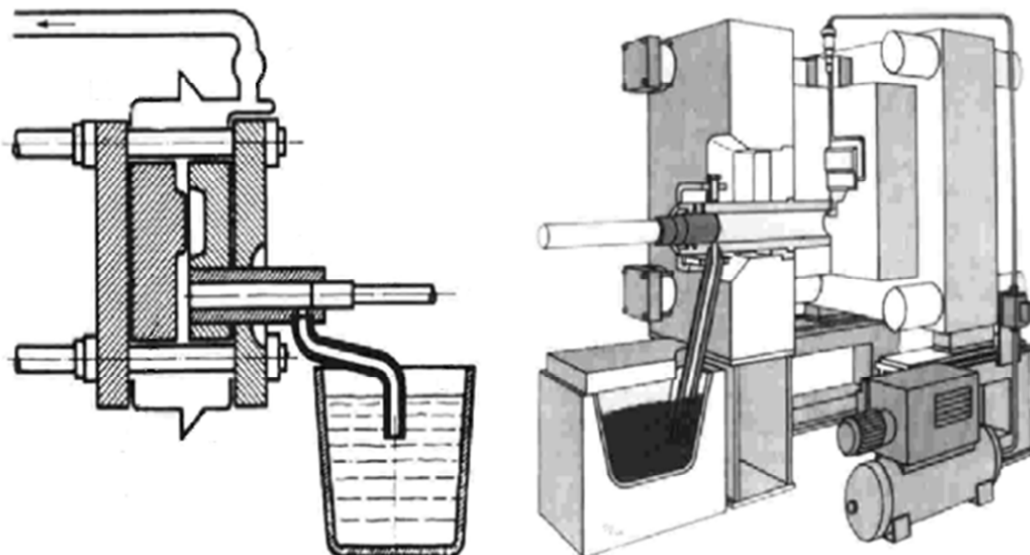


Figura 1.7 – Schema di funzionamento del sistema Vacural

Il processo garantisce l'uniformità del vuoto all'interno della cavità dello stampo, e si possono così ottenere getti a pareti sottili, caratterizzati da alta qualità superficiale e da un'ottima accuratezza dimensionale. Il concetto di "aspirare" il metallo al di sotto della superficie del bagno minimizza l'intrappolamento di film di ossido. Questi innegabili vantaggi presentano però alcuni risvolti meno positivi, come un certo allungamento del tempo di ciclo, la necessità di un impianto d'aspirazione di maggiore capacità e di un contenitore speciale, il dover utilizzare un forno di costruzione particolare (materiali adatti a minimizzare l'usura del tubo d'aspirazione e ad incrementare la vita utile della camera di colata).

In generale i vantaggi riscontrabili nel getto, conseguenti all'adozione della tecnica di pressocolata sotto vuoto, sono la riduzione della porosità da gas (quantificabile mediamente in un intervallo compreso tra il 25 e il 45%), la maggior stabilità del processo e una qualità più costante e controllata, che portano ad un incremento delle caratteristiche meccaniche come il carico di rottura e di snervamento. Inoltre la possibilità di ottenere dei getti con un contenuto estremamente ridotto di porosità gassosa offre ulteriori vantaggi, quali la trattabilità termica e la saldatura, operazioni entrambe non possibili con prodotti derivanti da una semplice pressocolata.

## **1.4.2 Processi innovativi**

In conclusione si può notare come nella processazione dell'alluminio, sia essa a partire dal minerale oppure dal rottame, siano presenti due macro fasi quali la fusione e la lavorazione per l'ottenimento della forma desiderata. Questa distinzione non si riscontra solo a livello concettuale, ma anche a livello fisico in quanto il materiale, una volta fuso, deve subire un processo intermedio di trasporto per essere disposto in lingottiere per la solidificazione, oppure per poter essere versato negli appositi sistemi per la colata. L'interruzione tra queste due fasi può portare ad una perdita di qualità, a dei rallentamenti nel processo, a difficoltà legate al trasporto.

Si sta lavorando, in questo senso, verso una soluzione che possa conglobare le due fasi per ottenere un prodotto più qualitativo e con una purezza elevata. La fusione in levitazione magnetica in crogiolo freddo è una tecnica che permette la fusione di alluminio secondario, o leghe leggere, attraverso processi di induzione mantenendo però la carica in sospensione ed

evitando quindi la contaminazione con le pareti del crogiolo. La successiva fase di solidificazione avviene ugualmente in levitazione, e per assicurare al prodotto finale una qualità e purezza elevate tutto il processo avviene sotto vuoto.

Essendo quindi l'intero processo realizzato all'interno di una camera di contenimento per poter effettuare il vuoto, viene maggiormente sottolineato il fatto di come la differenza tra fase di fusione e solidificazione debba essere minima, ovvero fatta con un sistema simile alla colata continua, mantenendo però il fenomeno di sospensione, o addirittura facendo solidificare il metallo nello stesso crogiolo dove si è effettuata la fusione.

Si tratta di una tecnica ancora in fase di sperimentazione che sta lentamente trovando degli spiragli nel contesto industriale.

Tale tecnica verrà analizzata con più precisione nei prossimi capitoli.



## Capitolo 2

# PRINCIPI DELL'ELETTROMAGNETISMO APPLICATI ALLA LEVITAZIONE

### 2.1 Elettromagnetismo

[5]

Si è dimostrato con gli anni che esiste una relazione ben definita tra elettricità e magnetismo, in particolare la variazione nel tempo di un campo elettrico produce un campo magnetico, e viceversa che la variazione nel tempo di un campo magnetico produce un campo elettrico. Si è deciso quindi di approfondire gli studi definendo l'elettromagnetismo come la branca della fisica che descrive i fenomeni legati all'interazione tra elettricità e magnetismo.

Le equazioni che riassumono e unificano i concetti di campo elettrico e magnetico sono da attribuirsi al fisico e matematico James Clerk Maxwell, vissuto negli anni '800 il quale correlò varie teorie ed osservazioni formulate fino ad allora. Le equazioni di Maxwell nella forma differenziale, valide nello spazio vuoto, assumono la seguente formulazione con  $\rho$  densità di carica,  $\mathbf{j}$  densità di corrente,  $\mathbf{E}$  campo elettrico e  $\mathbf{B}$  campo magnetico :

$$(2.1) \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left( \mathbf{j} + \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) \quad \left[ \frac{A}{m^2} \right]$$

che individua come sorgenti del campo magnetico le correnti di conduzione e le variazioni temporali del campo elettrico;

$$(2.2) \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \left[ \frac{T}{m} = \frac{V \cdot s}{m^3} \right]$$

che descrive la caratteristica di solenoidità del campo magnetico (afferma quindi che non esistono cariche magnetiche libere);

$$(2.3) \quad \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \left[ \frac{V}{m^2} \right]$$

che individua come sorgente del campo elettrico le variazioni temporali del campo magnetico;

$$(2.4) \quad \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad \left[ \frac{C}{m^3} \right]$$

che stabilisce il legame tra densità di carica e campo elettrico.

Per trattare gli aspetti elettromagnetici che caratterizzano un sistema di fusione in levitazione magnetica, bisogna tenere presente che tutte le parti componenti il sistema stesso vengono interessate dalle varie interazioni elettromagnetiche.

## 2.2 Levitazione magnetica nel crogiolo

[6]

Un induttore a spire di rame nel quale fluisce una corrente alternata di frequenza  $f$  e di intensità  $I$ , genera nello spazio circostante un campo di induzione magnetica  $\mathbf{B}$  di frequenza angolare  $\omega = 2\pi f$ . Un materiale conduttore posto nelle vicinanze dell'induttore subisce un flusso di campo magnetico alternato.

Come conseguenza alla legge di Lenz, la reazione ad una variazione di flusso genera delle correnti indotte di intensità  $\mathbf{j}$  (chiamate "Eddy currents") 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, cioè più sono alti la frequenza  $f$  del campo e dunque il suo modulo  $|B|$ ;
- quanto più il materiale è sensibile all'azione del campo, cioè se ha elevata conducibilità  $\sigma$ ;
- quanto più il materiale è in grado di direzionare le linee di flusso, cioè se possiede alta permeabilità magnetica  $\mu$ .

Si andranno qui di seguito ad elencare i principali fenomeni di interesse che si creano nel materiale coinvolto nell'interazione con il campo magnetico alternato prodotto dall'induttore.

### 2.2.1 Spessore di penetrazione

[5] [6]

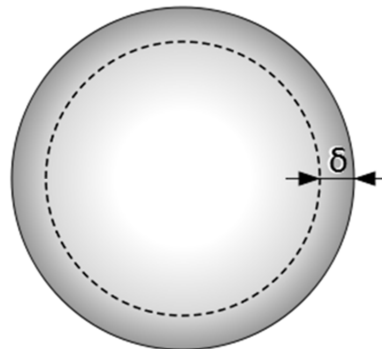
Le correnti parassite indotte nel materiale non si distribuiscono in modo uniforme lungo le sezioni trasversali, ma si concentrano maggiormente sulla superficie esterna. Questo spessore superficiale viene definito “skin depth”, la cui profondità è data dalla formula :

$$(2.5) \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\mu_r f}}$$

dove	$\mu$	permeabilità magnetica ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ )
	$\mu_0$	permeabilità nel vuoto ( $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ H/m)
	$\mu_r$	permeabilità relativa del materiale
	$\sigma$	conducibilità elettrica ( $\sigma = 1/\rho$ )
	$\rho$	resistività del materiale
	$\omega$	frequenza angolare del campo magnetico B ( $\omega = 2\pi f$ )

Osservando la formula si può notare che i parametri di influenza dello “skin depth” sono :

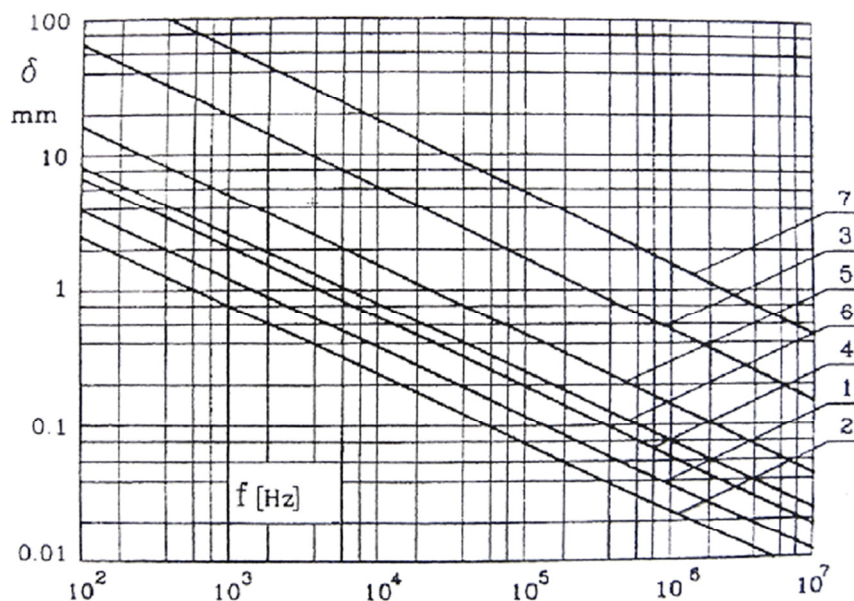
- il valore della frequenza del campo eccitante il materiale;
- la temperatura, in quanto esso viene definito attraverso  $\mu_r$  e  $\sigma$ , ovvero proprietà del materiale che dipendono dalla temperatura.



**Figura 2.1 – Rappresentazione dello skin depth su un corpo a sezione circolare**



In figura 2.2 viene riportato su scala bilogarithmica l'andamento dello spessore di penetrazione in funzione della frequenza per alcuni materiali considerati a diverse temperature.



**Figura 2.2 – Spessore di penetrazione in funzione della frequenza per diversi materiali : (1) acciaio a 20°C  $\mu_r=40$ ; (2) acciaio a 20°C  $\mu_r=100$ ; (3) acciaio a 800°C  $\mu_r=1$ ; (4) rame a 20°C; (5) rame a 800°C; (6) alluminio a 20°C; (7) grafite**

All'interno di questo spessore il campo magnetico diminuisce esponenzialmente a partire dalla superficie esterna dove ha valore massimo, fino ad annullarsi in corrispondenza del centro nel caso in cui la dimensione caratteristica  $L$  del materiale risulti essere maggiore del valore di  $\delta$ . L'effetto appena citato può essere illustrato attraverso il parametro di schermatura  $R_\omega$  definito come :

$$(2.6) \quad R_\omega = \mu\sigma\omega L^2 \approx \left(\frac{L}{\delta}\right)^2$$

con  $L$  dimensione (lunghezza) caratteristica del materiale che subisce l'induzione. Dunque, maggiore è  $R_\omega$ , minore sarà lo spessore di penetrazione in riferimento alla dimensione caratteristica.

## 2.2.2 Dissipazione dell'energia

[5]

Come osservato nel precedente paragrafo, la distribuzione del campo magnetico e della densità di corrente all'interno del materiale che subisce l'induzione seguono una legge di declino esponenziale del tipo :

$$(2.7) \quad S_x = S_0 e^{(-x/\delta)}$$

con  $S_0$  uguale al valore della misura nella superficie (quindi il valore massimo).

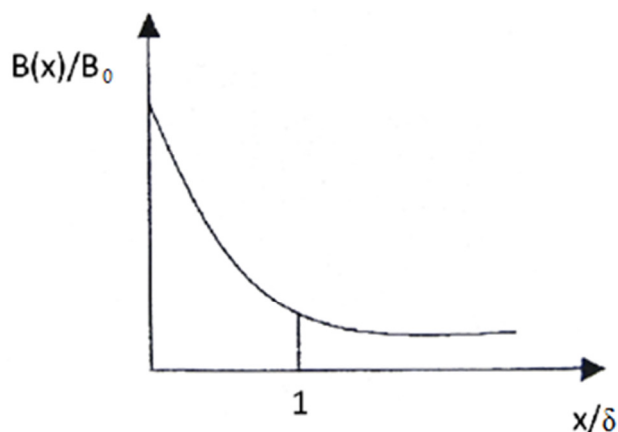


Figura 2.3 – Andamento qualitativo del campo magnetico all'interno del materiale

L'effetto termico dato dal calore sviluppato dal passaggio delle correnti parassite è paragonabile in prima approssimazione alla potenza dissipata nel mezzo per effetto Joule, che in riferimento ad un generico punto del corpo si considera pari a :

$$(2.8) \quad P_v = \rho J^2$$

con  $P_v$  densità di potenza volumetrica

$\rho$  resistività del materiale

$J^2$  valore efficace della densità di corrente

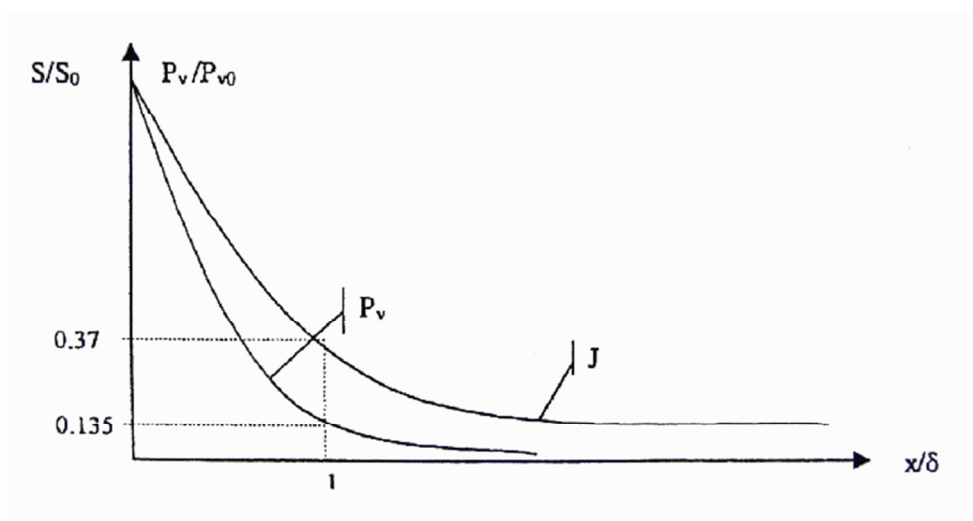
Ricordando quanto espresso dall'equazione (2.7) è possibile ottenere l'andamento verosimile della distribuzione della potenza all'interno del materiale che quindi segue anch'essa una legge di decadimento esponenziale :

$$(2.9) \quad P_v = P_{v_0} e^{(-2x/\delta)}$$

dove  $P_{v_0}$  è la densità di potenza calcolata in superficie.

Per una ulteriore migliore approssimazione bisogna tenere conto dell'importanza che riveste la forma dell'oggetto investito dal campo di induzione elettromagnetica, vale infatti che :

- in un corpo piatto il 60% del totale delle correnti indotte fluisce in uno strato superficiale di spessore  $\delta$  all'interno del quale la potenza indotta trasformata in calore è circa l'86% del totale;



**Figura 2.4 – Andamento qualitativo della distribuzione delle correnti indotte e della densità di potenza in riferimento ad un corpo piatto**

- anche per corpi cilindrici o tozzi, lo spessore  $\delta$  è un parametro chiave, e assieme alle dimensioni del corpo consente di prevedere l'efficacia del riscaldamento (un buon assorbimento di potenza e quindi un buon riscaldamento lo si ottiene se il diametro del pezzo è almeno il doppio dello spessore di penetrazione).

### 2.2.3 Forze indotte

[5] [6]

L'esistenza delle correnti parassite presenti nello "skin depth" del materiale che subisce l'induzione porta alla formazione di due principali tipologie di effetti :

- termico, dovuto alla dissipazione di calore per effetto Joule (visto precedentemente);
- meccanico, dovuto all'interazione fra il campo d'induzione magnetica circostante, generato dall'induttore, e le stesse correnti indotte nel pezzo.

Quest'ultima interazione, essendo il campo magnetico generato e le correnti parassite indotte perpendicolari l'uno alle altre e pulsanti alla stessa frequenza, da origine alla Forza di Laplace data dalla formula :

$$(2.10) \quad \mathbf{F} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

dove  $\mathbf{F}$  forza di Laplace per unità di volume

$\mathbf{B}$  campo di induzione magnetica alternato indotto

Anche le forze elettromagnetiche agenti sul pezzo rimangono confinate entro lo spessore di penetrazione elettromagnetica  $\delta$ , inoltre presentano una frequenza doppia rispetto a quella del campo che le ha generate

In accordo con la relazione di Ampere semplificata :

$$(2.11) \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$$

Esplicitando  $\mathbf{j}$  ed inserendola nell'equazione (1.9) si ottiene :

$$(2.12) \quad \mathbf{F} = \left( \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \right) \times \mathbf{B} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \frac{1}{\mu_0} \nabla (\mathbf{B}^2)$$

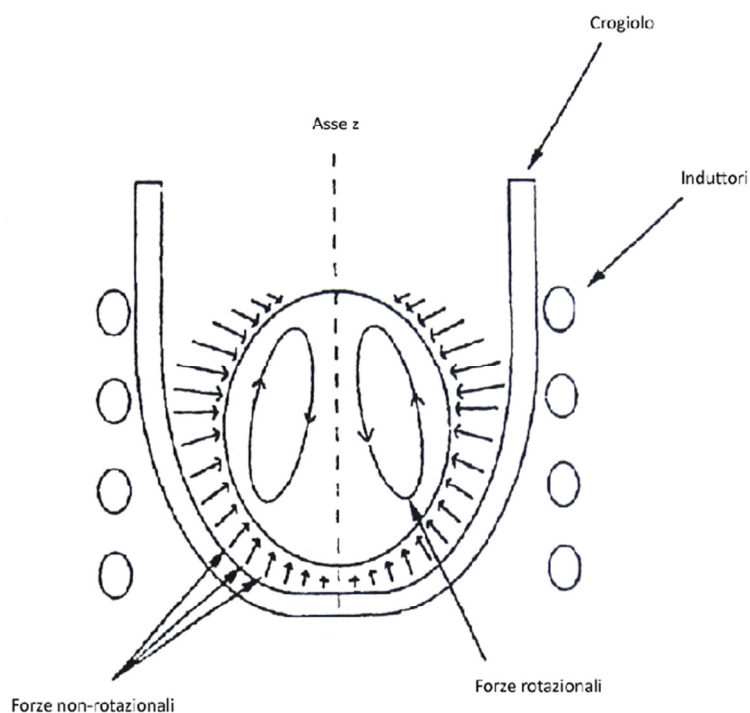
$$\mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B} + \nabla \left( \frac{\mathbf{B}^2}{2\mu_0} \right)$$

I due addendi che compongono l'equazione possono essere considerati singolarmente come componenti della forza totale, per cui vale :

$$(2.13) \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}_{rot} + \mathbf{F}_{irrot}$$

dove

- $\mathbf{F}_{rot} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}$  componente rotazionale, cioè quel contributo responsabile dell'effetto di rimescolamento elettromagnetico all'interno del metallo fuso dovuto alla distribuzione non uniforme delle forze di pressione superficiale;
- $\mathbf{F}_{irrot} = \nabla \left( \frac{B^2}{2\mu_0} \right)$  componente non-rotazionale, cioè quel contributo che genera una forza netta repulsiva tra il metallo fuso e il crogiolo a causa delle correnti indotte, tra loro opposte, presenti nelle rispettive superfici.



**Figura 2.5 – Forze rotazionali e irrotazionali in una carica sottoposta a levitazione in un crogiolo**

La componente non rotazionale genera un effetto di pressione che contribuisce a dare al metallo fuso una forma sferica, e come forza repulsiva tende a guidare il pezzo fino al raggiungimento di zone dove le variazioni di flusso sono meno intense. Quest'ultimo effetto va inteso quindi come una forza di sollevamento che tende a far levitare il fuso, e può essere considerata come gradiente della pressione magnetica :

$$(2.14) \quad P_m = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

con  $B$  valore efficace del campo magnetico.

## 2.2.4 Stirring elettromagnetico

[6] [7]

Come precedentemente descritto, la presenza di correnti indotte nel metallo fuso causa la nascita delle forze rotazionali e irrotazionali. Sono le componenti rotazionali a essere responsabili della formazione di moti all'interno del fuso, creando un fenomeno di mescolamento noto come "stirring". Relativamente alla sfera metallurgica questo effetto è di notevole importanza perché consente di :

- incrementare la qualità dei grani e ottenere una composizione chimica più omogenea;
- omogeneizzare le temperature;
- ottenere una ossidazione minore;
- diminuire la dissolubilità dell'idrogeno.

Si può affermare quindi che lo stirring elettromagnetico risulta dalla distribuzione non uniforme delle correnti indotte sulla superficie dei materiali fusi che ne determina la formazione di vortici all'interno.

La configurazione del movimento del fuso dipende da vari parametri tra cui lo spessore di penetrazione, e conseguentemente dal parametro di schermatura  $R_{\omega}$ . A titolo di esempio nella figure 2.6 e 2.7 sono rappresentati due casi di distribuzione delle correnti con relativo andamento dell'effetto di stirring nel caso di un convenzionale riscaldamento ad induzione.

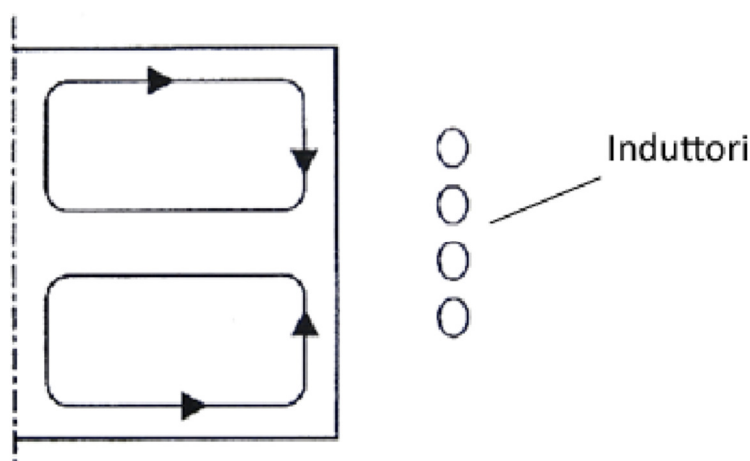
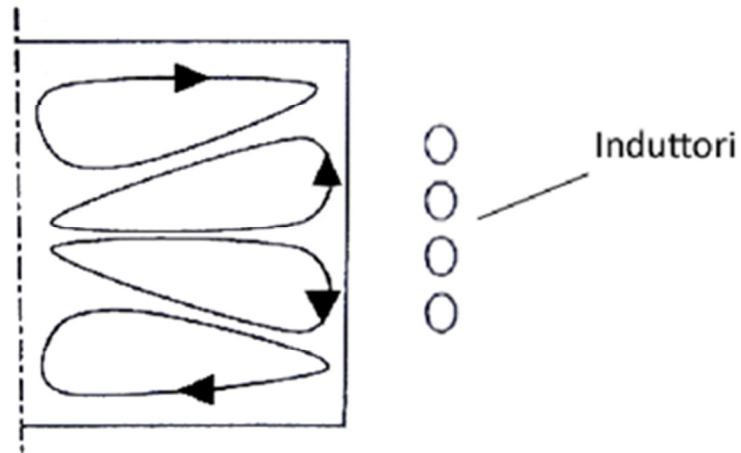


Figura 2.6 – Effetto di stirring in una carica nel caso in cui  $R_{\omega}$  sia maggiore di 1



**Figura 2.7 – Effetto di stirring in una carica nel caso in cui  $R_0$  sia molto maggiore di 1**

Si nota come nei due casi l'effetto di stirring sia notevolmente diverso; esiste dunque un valore ottimale del parametro di schermatura che offre un miglior risultato in termini di rimescolamento.

## Capitolo 3

# PROCESSO DI FUSIONE IN LEVITAZIONE MAGNETICA IN CROGIOLO FREDDO

### 3.1 Sistemi di levitazione

[6]

La fusione per induzione usando crogioli in materiale ceramico, nella quale i metalli fusi sono confinati entro il recipiente e ne vengono dunque a contatto, è una tecnica molto diffusa nell'industria metallurgica. Il limite di tale tecnica sta appunto nel fatto che il fuso, essendo a contatto con il crogiolo, si arricchisce di impurità che ne vanno a deteriorare le proprietà meccaniche. La crescente domanda negli ultimi anni di materiale con caratteristiche sempre più performanti, e dunque una purezza migliore, ha fatto sì che si cominciassero a testare nuove tecniche, una tra le tante è il processo di fusione per induzione in levitazione magnetica.

Il concetto di base della levitazione sta appunto nel tenere sospesa (senza alcun contatto) la carica all'interno del meccanismo, e ciò lo si può ottenere dal contributo non rotazionale delle forze indotte nel metallo derivanti dall'interazione tra le correnti indotte generate da un induttore a spire che emette un campo magnetico variabile ed il campo magnetico stesso (forza di Laplace). Questo contributo deve controbilanciare esattamente la forza di gravità.

Tra i vari tipi di levitazione si distinguono innanzitutto due tipologie :

- con crogiolo;
- senza crogiolo.

La prima categoria si divide ulteriormente in :

- a levitazione completa;



- a semilevitazione.

mentre la seconda categoria è garantita solo in condizioni di levitazione completa. Per tutte le tipologie citate la fusione è innescata dalla formazione delle correnti indotte all'interno del metallo che vanno a dissipare energia producendo calore ed innalzandone la temperatura.

### 3.1.1 Levitazione senza crogiolo

Questa tecnica di levitazione è caratterizzata dal non avere alcun supporto fisico per il contenimento della carica. Essa infatti viene tenuta in sospensione solamente dall'azione di bilanciamento delle forze esercitate da un gruppo di bobine alimentate a corrente alternata ad alta frequenza che prende il nome di levitatore. La disposizione di queste bobine è essenziale e solitamente viene utilizzata una forma conica che permette di concentrare l'azione delle linee di flusso magnetico sul fondo, le quali producono una pressione elettromagnetica rivolta verso l'alto che contrasta la forza di gravità causando la levitazione. Sopra a questa configurazione viene aggiunta una spira facente circolare corrente in verso opposto alle sottostanti creando così un effetto di stabilizzazione verticale.

La caratteristica di assenza del crogiolo, sebbene dia la certezza che non si possano manifestare fenomeni di contaminazione con le pareti, con la conseguente elevata qualità nella composizione del fuso, è tuttavia causa della limitazione maggiore all'utilizzo di questa tecnologia a livello industriale. Infatti l'elevata frequenza e l'effetto di stirring che si viene a creare causano forti instabilità nel materiale in levitazione compromettendo l'uso di questo tipo di tecnica e restringendolo solamente per pezzi di piccolissime dimensioni.

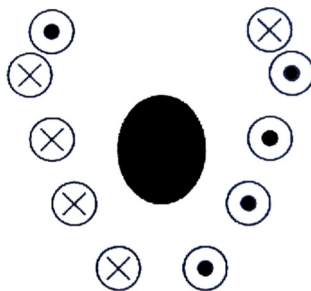


Figura 3.1 – Massa fusa in un sistema a levitazione senza crogiolo

### 3.1.2 Semilevitazione con crogiolo

Questo tipo di tecnologia si distingue dalla precedente per l'introduzione di un crogiolo in materiale conduttore (solitamente rame) con apposita base entrambi raffreddati in acqua che si interpongono tra le spire induttrici ed il metallo da far levitare. Durante la messa in opera di questi dispositivi, la carica metallica, dopo aver raggiunto le opportune condizioni di riscaldamento, poggia costantemente sul fondo del crogiolo mentre le pareti laterali rimangono distaccate da quest'ultimo.

Viene solitamente usato un crogiolo settorizzato per garantire una buona trasparenza elettromagnetica della parete, dalla quale dipende l'efficienza dei fenomeni di riscaldamento e levitazione. Per proteggere le pareti e la base del crogiolo dalle alte temperature raggiunte per causare la fusione del metallo, viene applicato un sistema di raffreddamento ad acqua; è proprio questo gradiente elevato di temperatura tra il crogiolo e il fuso, combinato con il fatto che la parte inferiore di quest'ultimo rimane a contatto con la base, a innescare la formazione di un piccolo spessore di materiale solidificato, chiamato "skull", che riesce a prevenire dalla contaminazione di impurità.

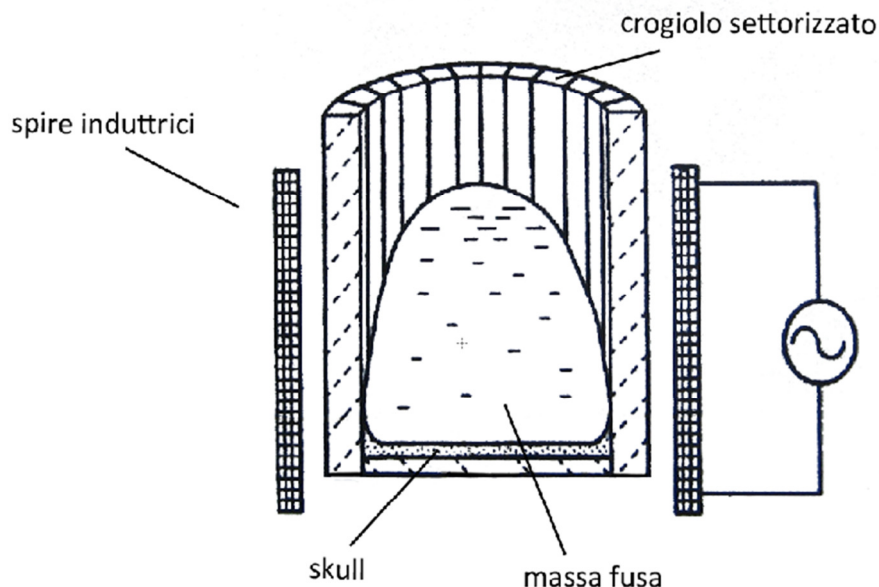


Figura 3.2 – Massa fusa in un sistema a semi-levitazione

### 3.1.3 Levitazione con crogiolo

Questa particolare tecnica sfrutta gli stessi principi di quella descritta al paragrafo precedente, con l'introduzione del fatto che in questo caso si sfrutta a pieno l'effetto delle forze non rotazionali per far levitare completamente il fuso. A differenza della prima tipologia (levitazione senza crogiolo), in questo caso si è deciso di introdurre nel processo un crogiolo in materiale conduttore per migliorare la stabilità della carica. Ovviamente le alte temperature raggiunte per portare a fusione il metallo danneggerebbero il crogiolo che deve essere opportunamente raffreddato attraverso sistemi che sfruttano un flusso d'acqua.

In questo processo è completamente assente il contatto tra fuso e pareti, sia laterale che inferiore del crogiolo, quando la carica è allo stato liquido evitandone totalmente ogni possibilità di contaminazione.

Questa tecnica di fusione è stata sviluppata in riferimento a quei materiali metallici che nei tradizionali processi di fusione presentavano difficoltà nel raggiungere le desiderate caratteristiche di elevata purezza e qualità. Uno dei problemi fondamentali concerne infatti le reazioni chimiche che si sviluppano tra il metallo in fusione ed il materiale di cui è composto il crogiolo nel caso di contatto tra di essi; infatti metalli ad alto punto di fusione (come Titanio, Molibdeno, Zirconio, Vanadio e Molibdeno), risultano difficilmente trattabili negli apparati tradizionali di fusione ad induzione per la loro caratteristica di elevata reattività nei confronti dell'ambiente e del crogiolo, compromettendone così la composizione chimica finale.

Tra tutte risulta dunque più interessante analizzare in dettaglio questo tipo di tecnologia valutandone innanzitutto i vantaggi ottenibili :

- a confronto con le altre tecniche impiegate nell'industria metallurgica non è presente il degrado dei materiali componenti il sistema (come possono essere i materiali refrattari per il contenimento o gli elettrodi per il riscaldamento);
- un alto grado di purezza non essendo il fuso a contatto con le pareti del crogiolo;
- rimescolamento intenso garantito dal fenomeno di stirring che aiuta ad ottenere una composizione più omogenea;
- la fusione si può effettuare in qualsiasi atmosfera, a partire dal vuoto spinto fino a pressioni elevate;

- processo di riscaldamento sicuro e stabile garantito dalla possibile regolazione di potenza dell'induttore.

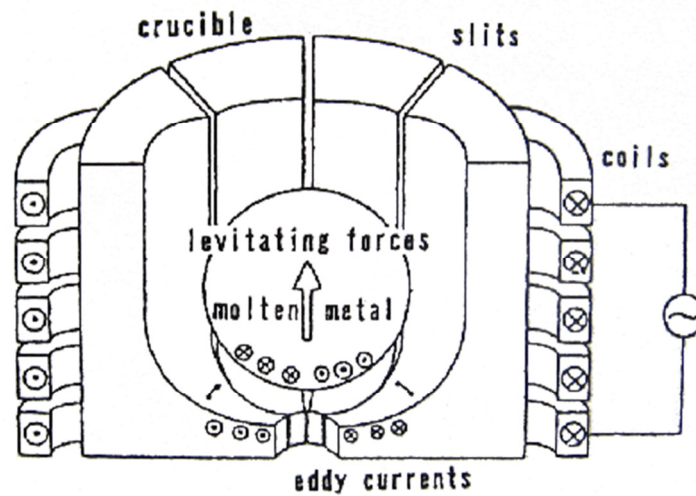


Figura 3.3 – Massa fusa in un sistema a levitazione con crogiolo

### 3.2 Analisi strutturale del sistema

[5]

Lo studio e la progettazione dei sistemi di levitazione con crogiolo freddo (ovvero raffreddato) hanno messo in luce alcuni parametri molto importanti per l'ottenimento di efficienti risultati del processo di fusione. Alcuni di questi riguardano la natura prettamente strutturale del crogiolo, dalla quale dipende la distribuzione delle correnti parassite che a loro volta generano le forza magnetiche repulsive sul metallo fuso.

Nei primi anni di sperimentazione degli impianti con crogiolo metallico si era constatato che quest'ultimo limitava l'azione del campo magnetico prodotto dall'induttore, fungendo da schermo elettromagnetico per il metallo che si voleva far levitare. Furono prese in considerazione due possibilità per evitare questo problema, ovvero :

- impiegare un crogiolo in rame a pareti molto sottili, il quale doveva presentare uno spessore più sottile dello skin depth elettromagnetico proprio del crogiolo così che il campo magnetico non incontrasse resistenza nel diffondersi attraverso di esso;

- impiegare un crogiolo in rame formato da più sezioni e raffreddato ad acqua.

Nel primo caso risultava esistere una condizione di incompatibilità con i forti vincoli meccanici imposti. Nel secondo caso invece al posto di un crogiolo ceramico passivo (trasparente al campo magnetico) si poteva operare con un crogiolo magneticamente attivo in grado di determinare la distribuzione del campo nello spazio circostante attraverso la sua forma, le proprie dimensioni, lo spessore e le proprie sezioni. Si è riscontrato che la presenza di tale crogiolo settorizzato permetteva un aumento del gradiente di pressione magnetica e stabilizzava la massa fusa, consentendo il funzionamento del processo ad una frequenza di alimentazione più bassa. Si scelse dunque di orientare gli studi verso questa seconda possibilità.

I principi del crogiolo freddo erano già stati scoperti nei primi anni del ventesimo secolo; intorno agli anni '60 fu poi fatto il primo reale sforzo diretto ad un'applicazione industriale. Dopo di esso si aprirono nuovi campi di ricerca sia a livello accademico per comprendere i meccanismi e le proprietà delle lavorazioni elettromagnetiche, sia su scala industriale per sviluppare nuove tecnologie, per migliorare quelle già esistenti e per estenderne l'utilizzo alla produzione di altre categorie di materiali quali ceramici, vetri e semiconduttori.

Conseguentemente alle scelte fatte di orientare la sperimentazione verso una levitazione che presentasse un crogiolo a settori, si possono individuare le problematiche principali relative al dimensionamento al fine di ottenere un processo il più efficiente possibile :

- ottimizzazione del numero di sezioni per ottenere un buon confinamento della carica;
- ricerca della miglior configurazione geometrica, interna ed esterna, che contribuisca ad un'opportuna distribuzione delle forze elettromagnetiche coinvolte.

### **3.2.1 Dimensionamento settori del crogiolo**

Relativamente all'ottimizzazione del numero di settori è di utile importanza visionare uno studio fatto dalla Fuji Electrics, il quale esperimento comportava la comparazione di due crogioli, uno suddiviso in 6 sezioni e l'altro in 24. E' stata testata la fusione di una quantità di

300 gr di una lega CuAl verificandone la diversa configurazione della massa durante il processo.

Come si nota dalla figura 3.4, nel crogiolo a 6 sezioni il metallo non presenta una configurazione stabile: spinto verso l'interno e contemporaneamente avvicinato alle fessure laterali, risulta avere dei punti di contatto con la parete. Nella configurazione a 24 sezioni invece non è osservabile il fenomeno appena citato, ma accade che il metallo subisce una pressione uniforme che lo confina nella regione centrale evitando così ogni tipo di contatto con le pareti del crogiolo.



Crogiolo a 6 sezioni



Crogiolo a 24 sezioni

**Figura 3.4 – Comportamento della massa fusa in crogioli a diverso numero di sezioni**

Analizzando successivamente la distribuzione termica della temperatura sulla superficie dei due crogioli, si sono individuate le regioni a più alta temperatura vicino al foro alla base del crogiolo, ed altre ad alta temperatura vicine alle fessure fra le sezioni. Questo fenomeno è spiegabile con il fatto che in quelle zone vi è presente la maggior concentrazione di correnti parassite che causano il riscaldamento per perdite termiche. E' inoltre emerso che nelle zone a più bassa temperatura, vale a dire nella parte centrale e curva delle sezioni, il metallo entra a contatto con il crogiolo per la modesta densità di correnti indotte presenti.

La distribuzione delle forze di pressione magnetica alla circonferenza del fuso non è presente in maniera uniforme, infatti risulta massima in corrispondenza delle fessure e minima in corrispondenza del mezzo di tali.

Si è concluso quindi che è preferibile utilizzare un numero sufficientemente elevato di sezioni, dal quale si possono ottenere i seguenti benefici :

- un processo di fusione privo di zone di contatto fra carica e pareti, ottenendo una distribuzione più uniforme delle forze di pressione sulla superficie del liquido;
- si riducono le zone a bassa temperatura garantendo migliori condizioni di fusione.

Successive ricerche hanno portato ad affermare che al numero di sezioni va inoltre correlato un altro parametro importante, la frequenza :

- per applicazioni ad alta frequenza si consiglia l'utilizzo di un crogiolo con un numero elevato di settori (da un minimo di 16 ad un massimo di 20);
- per applicazioni a basse frequenze si consiglia un numero più ridotto di settori (tra i 4 e gli 8).

Va inoltre preso in considerazione che esiste un limite all'aumento del numero di settori derivante dalle caratteristiche costruttive vincolanti :

- va valutata la necessità di ricavare all'interno della sezione un passaggio per il condotto di raffreddamento;
- va valutato il valore della larghezza della fessura che deve garantire un opportuno valore di tensione superficiale dal bagno fuso qualora mancasse uno strato di isolamento fra due sezioni contigue, per evitare la fuoriuscita del metallo (il limite inferiore è generalmente dato dal fatto che risulta tecnologicamente difficile garantire fessure inferiori ad 1mm).

### **3.2.2 Configurazione geometrica del crogiolo**

La geometria del crogiolo riveste un ruolo di primaria importanza perché da essa dipende la distribuzione delle forze repulsive magnetiche, e dunque la levitazione del metallo in analisi.

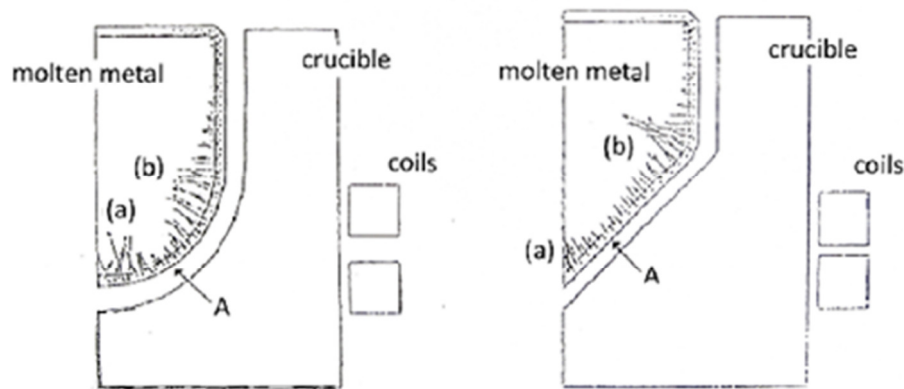
Gli studiosi della Fuji Electrics hanno scisso l'analisi in due sotto fasi :

- ottimizzazione profilo interno;

- ottimizzazione profilo esterno.

### 3.2.2.1 Profilo interno

L'esperimento ha coinvolto l'analisi di due geometrie possibili per il crogiolo, una con profilo interno a cono e l'altra con una curvatura, a parità di distanza dagli induttori. Si è assunto inoltre che le correnti indotte nel metallo fuso fluiscono in direzione circolare ad una profondità pari a tre volte lo spessore di penetrazione.



**Figura 3.5 – Andamento qualitativo delle forze repulsive in due diverse configurazioni di profilo interno del crogiolo**

Si osserva che per entrambe le configurazioni :

- la regione (a) contraddistingue le forze repulsive indotte alla superficie del fuso dalle correnti parassite che scorrono nella parte inferiore del crogiolo, in corrispondenza del foro di colata. E' la zona in cui la componente irrotazionale della forza di Lorentz è maggiore;
- la regione (b) contraddistingue le forze repulsive dovute invece alla corrente alternata del blocco di spire che agiscono in corrispondenza della superficie laterale in modo



inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra induttore e carica. E' la zona in cui è la componente rotazionale della forza di Lorentz ad essere predominante.

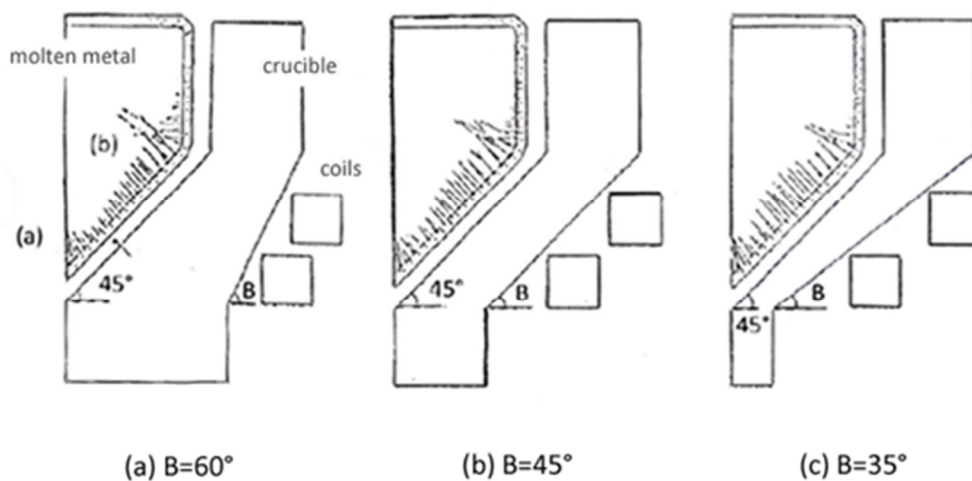
Concludendo, lo studio comparativo ha messo in luce come la forma conica abbia permesso di ottenere forze repulsive più elevate rispetto alla configurazione emisferica tradizionale, fermo restando che però in entrambi i casi si hanno zone in cui le forze repulsive sono troppo deboli che non consentono quindi di garantire le condizioni necessarie alla levitazione.

### 3.2.2.2 Profilo esterno

La configurazione ottimale del profilo interno si è visto non riuscire a garantire le condizioni necessarie alla levitazione, in questo senso gli studiosi della Fuji Electrics hanno dovuto implementare questa scelta con il dimensionamento del profilo esterno.

Per ottenere l'effetto di confinamento della carica all'interno del crogiolo, evitando zone di contatto fra fuso e pareti, è necessario che le forze magnetiche repulsive siano di intensità elevata e distribuite lungo tutta la superficie della carica in modo da non lasciare "zone deboli" nelle quali può avvenire il contatto.

L'intensità e la distribuzione di queste forze repulsive sono caratteristiche che dipendono dalla distanza fra carica e conduttore.



**Figura 3.7 - Andamento qualitativo delle forze repulsive in tre diverse configurazioni di profilo esterno del crogiolo**

La figura 3.7 mette a confronto tre diverse configurazioni, ciascuna caratterizzata da uno specifico valore di  $\beta$ , ovvero l'angolo del profilo esterno rispetto all'asse orizzontale.

Analizzando le figure si osserva che :

- (a) con  $\beta=60^\circ$  : le forze agenti sulla carica non sono distribuite uniformemente lungo tutta la superficie, e in corrispondenza dello spessore massimo della sezione si nota una zona di debole intensità che porterebbe ad un eventuale punto di contatto;
- (b) con  $\beta=45^\circ$  : realizzando la costanza dello spessore della sezione si riesce ad indurre nella carica una distribuzione più lineare delle forze repulsive, che meglio risponde all'esigenza di contenimento;
- (c) con  $\beta=35^\circ$  : la distribuzione delle forze è ancora regolare lungo la superficie, ma con questo tipo di configurazione si assottiglia la parete del crogiolo in corrispondenza del foro, condizione che provoca problemi di smaltimento di calore lì dove la concentrazione delle correnti parassite è elevata; si registra quindi un brusco innalzamento del calore in questa zona.

In conclusione si può affermare che le configurazioni che soddisfano la necessità di distribuzione delle forze per ottenere un buon contenimento della carica in sospensione, sono la (b) e la (c); tuttavia quest'ultima configurazione provoca un eccessivo surriscaldamento della base del crogiolo, e per questo motivo risulta preferibile la (b) nella quale non sono presenti zone deboli, la distribuzione delle forze repulsive è più lineare e inoltre le forze stesse risultano proporzionali al valore della potenza elettrica.

### 3.3 Frequenza del campo magnetico

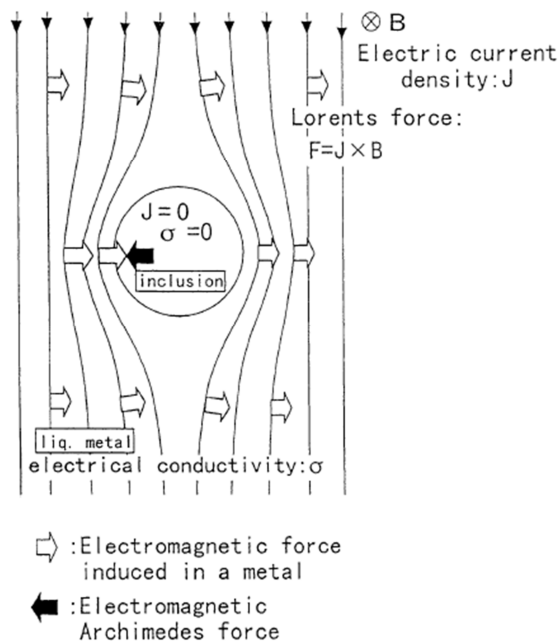
[6] [8] [9] [10]

La scelta della frequenza da applicare agli induttori è un parametro di grande importanza perché da esso dipendono i campi magnetici, e quindi le correnti indotte, responsabili del confinamento del metallo fuso. Un ottimo confinamento, sia in fase di levitazione che di solidificazione, garantisce una qualità superficiale migliore visto l'assenza di probabili contaminazioni derivanti dal contatto con le pareti del crogiolo.

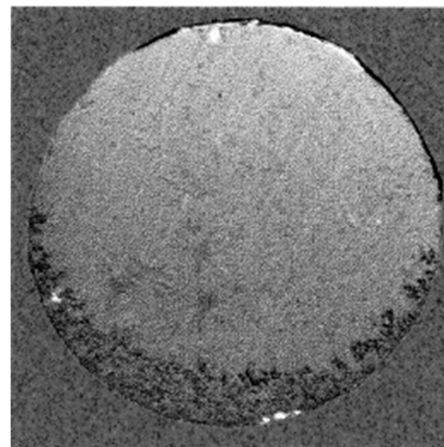
Nei tradizionali processi di colata la solidificazione del metallo avviene per diretto contatto tra il liquido e la parete raffreddata del contenitore; questo processo comporta la

formazione di difetti per i quali servono delle lavorazioni successive per eliminarli (asportazione meccanica per i difetti superficiali, oppure trattamenti di vario genere per quelli più interni).

Un ulteriore passo verso un prodotto migliore lo si è fatto con la fusione ad induzione con correnti continue, con la quale si può sfruttare il principio per l'eliminazione delle inclusioni : per la reazione alla forza elettromagnetica indotta nel metallo (le inclusioni non risentono di tale forza per la loro bassa conducibilità elettrica), le inclusioni vengono spinte in direzione opposta rispetto a quella della forza, e tale spostamento prende il nome di Forza Elettromagnetica di Archimede. In questo modo si riescono a concentrare le inclusioni in una parte marginale del metallo che potrà essere successivamente lavorata o trattata con più facilità.



**Figura 3.8 – Principio dell'eliminazione delle inclusioni**



**Figura 3.9 – Addensamento delle inclusioni dopo il trattamento**

Il miglior risultato di confinamento in solidificazione lo si otterrebbe utilizzando un dispositivo di colata elettromagnetica, nella quale la lingottiera viene sostituita da un campo elettromagnetico generato da una bobina percorsa da corrente alternata; con questa modifica

la solidificazione del metallo avviene mentre lo stesso subisce l'azione di confinamento del campo elettromagnetico, e in questo modo si riescono ad eliminare i difetti superficiali.

Questo ultimo metodo è però da considerarsi ideale perché avviene senza stampo, ed è quasi impossibile applicare tale sistema nelle colate dell'acciaio a causa dall'alta densità e velocità di colata. E' stata dunque introdotta una modifica a questo tipo di sistemi che prevede l'applicazione di un campo magnetico alternato all'esterno dello stampo : ciò permette di ridurre la pressione idrostatica tra stampo e metallo e di stabilizzare i menischi, entrambi fattori cruciali ai fini di una buona qualità superficiale.

Come visto nel capitolo precedente, esiste un forte legame tra gli effetti di riscaldamento, di levitazione e di stirring, dal momento che dipendono tutti dall'intensità delle correnti parassite date a loro volta dal campo magnetico variabile. Dunque la scelta della frequenza della corrente da applicare agli induttori per ottenere i campi magnetici risulta di grande rilevanza visto che permette di controllare l'intensità di ciascun effetto indotto. Per ciascun effetto voluto è possibile scegliere un valore ottimale della frequenza in modo da promuovere la superiorità di uno rispetto agli altri, e ciò può essere spiegato nel seguente modo:

- quando la frequenza è zero (campo magnetico continuo) non sono presenti correnti indotte nella carica e l'intensità di ciascun effetto indotto è nulla;
- quanto la frequenza tende ad un valore infinito lo skin depth, essendo inversamente proporzionale, tende ad un valore nullo, così che il campo magnetico viene espulso fuori dalla carica e non si presentano effetti di induzione elettromagnetica;
- una frequenza troppo elevata causerebbe un forte effetto di stirring che produrrebbe delle pericolose instabilità;
- una frequenza troppo bassa comporterebbe degli effetti di sostentamento e riscaldamento insufficienti.

Per le ragioni esposte ci deve essere un valore ottimale di frequenza, qualunque sia l'effetto analizzato, come viene mostrato in figura 3.10 .

Questo andamento presenta una sola eccezione, vale a dire l'effetto di pressione magnetica alla superficie, per cui vale che più alta è la frequenza e più alto risulta questo effetto. Per ricercare un valore ottimale di frequenza in questo caso bisogna tenere in considerazione anche altre parametri come ad esempio le perdite di calore per effetto Joule.

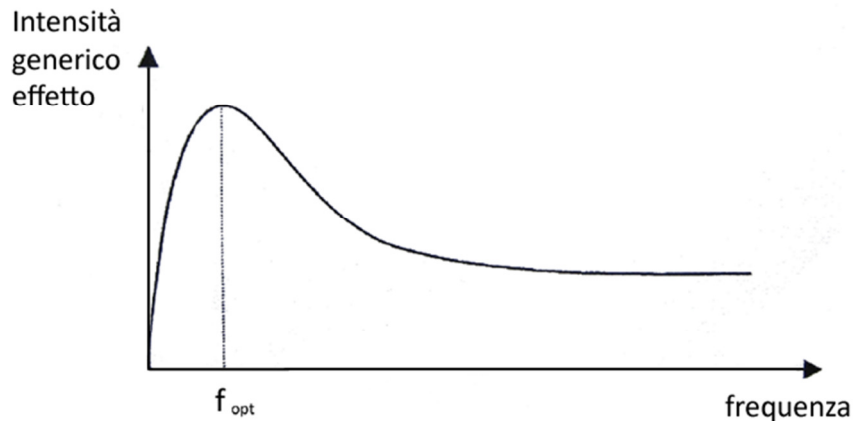


Figura 3.10 – Andamento dei vari effetti in funzione della frequenza

### 3.4 Solidificazione

[11]

Fino ad ora non si è esposto il problema principale della tecnica di levitazione, vale a dire la solidificazione.

La tecnica di solidificazione in levitazione, quindi senza contatti con le pareti del crogiolo, si può considerare come un processo ideale che permette l'eliminazione della nucleazione eterogenea favorendo quella omogenea, cioè con una notevole riduzione dei difetti.

Utilizzando il processo fin qui discusso di fusione in levitazione magnetica in crogiolo freddo, risulta difficile ottenere una solidificazione senza contatti. Infatti i fenomeni di riscaldamento e levitazione sono strettamente correlati tra loro dipendendo entrambi da una variabile comune (le correnti indotte), così quando l'induzione viene ridotta per raffreddare il metallo, viene inevitabilmente ridotta anche la forza di levitazione rendendo possibile il contatto tra fuso e crogiolo.

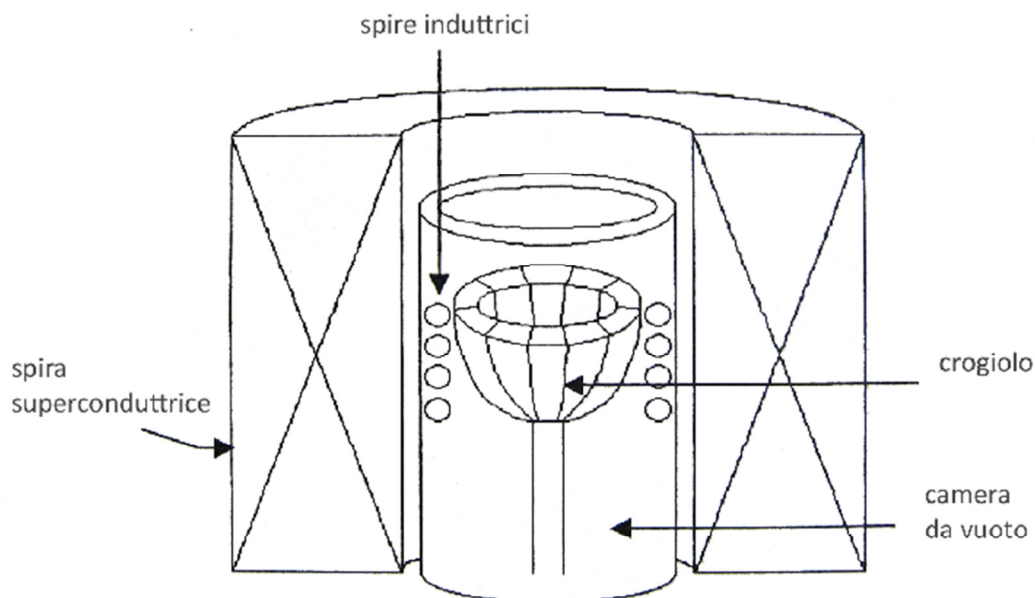
Un altro svantaggio di questa tecnica sta nel fatto che non risulta possibile applicare un sovrariscaldamento eccessivo : più alta è la potenza indotta (per causare il riscaldamento), più sottile diventa lo spessore di solido che si viene a formare in superficie dovuto al forte

gradiente termico tra il crogiolo e il metallo fuso; questo strato limita la conduzione termica all'interno della carica, impedendo quindi l'innalzamento di temperatura.

Per ovviare soprattutto al primo dei problemi descritti si è giunti alla sperimentazione di un sistema in grado di separare i due effetti critici di riscaldamento e levitazione, sistema composto da due fonti di campi magnetici :

- un campo ad alta frequenza, indotto quindi da una corrente alternata fatta circolare in delle spire che avvolgono il crogiolo;
- un campo costante rivolto verso l'alto, indotto da una corrente continua ad alta intensità che circola attraverso una spira di materiale superconduttore la quale avvolge completamente l'impianto.

L'applicazione di una corrente continua garantisce un miglior effetto di levitazione, mentre il fenomeno di stirring e riscaldamento è adibito solamente alla corrente alternata. In questo modo si riesce ad abbassare l'effetto di riscaldamento favorendo la solidificazione mentre il metallo è sospeso in levitazione per azione del gradiente del campo costante (gradiente inteso perché il campo va diminuendo man mano che ci si allontana dal centro, dove è presente il valore massimo).



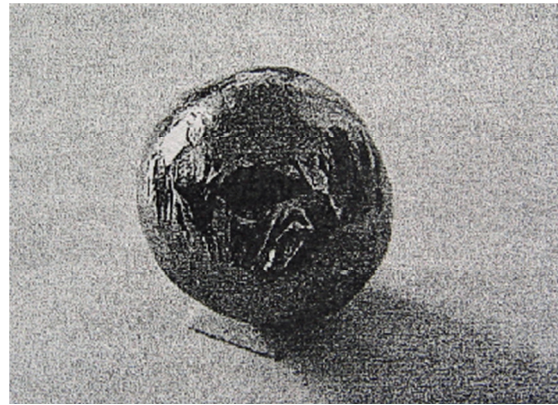
**Figura 3.11 – Sistema in vuoto a levitazione con crogiolo circondato da una spira alimentata da corrente continua**

Potendo dunque agire sul controllo di due parametri, la corrente alternata inviata alle spire e l'intensità del campo magnetico costante, si riesce ad ottenere il fenomeno di riscaldamento alzando il valore del primo parametro, mentre si ottiene la solidificazione in levitazione abbassando quest'ultimo e alzando il valore del campo costante.

Si riportano di seguito varie prove di solidificazione in levitazione di leghe TiAl che differiscono nella composizione.



**Figura 3.12 – Campione solidificato in contatto col crogiolo**



**Figura 3.13 – Campione solidificato senza contatti col crogiolo**

La figura 3.12 mostra una campione solidificato in contatto con le pareti del crogiolo. La sua forma risulta essersi sviluppata più in larghezza che in altezza, e il restringimento visibile nella parte alta sta a indicare che il fronte di solidificazione è partito dal basso e si è diretto verso l'alto, concludendosi appunto con la formazione di una zona di ritiro. La figura 3.13 mostra lo stesso campione solidificato però in completa sospensione. Esso presenta una forma più sferica e i fori di restringimento sono presenti nella parte centrale, comportamento che prova la presenza di due fronti di solidificazione, uno verso l'alto e uno verso il basso che si incontrano al centro.

Sono riportate di seguito la analisi al microscopio di due diverse leghe (l'ultima immagine presenta una scala di ingrandimento maggiore) :



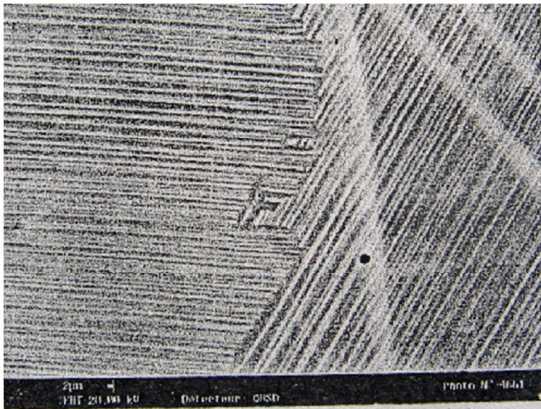


Figura 3.14 – Campione di Al-50at%Ti

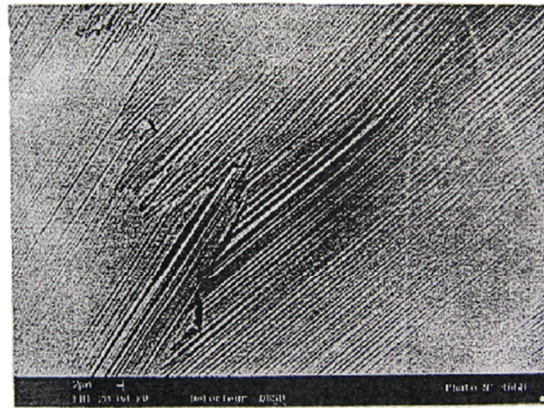


Figura 3.15 – Campione di Al-55at%Ti

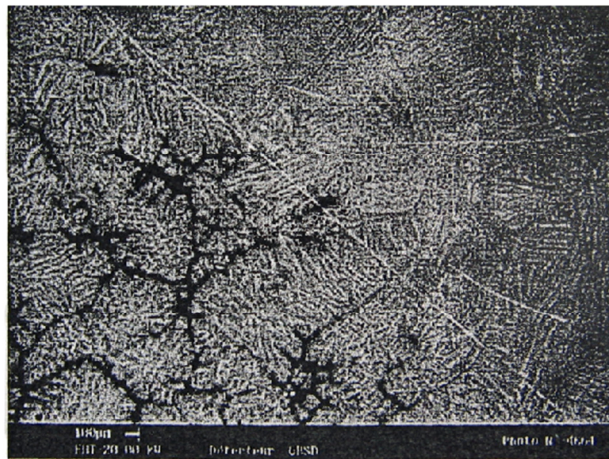


Figura 3.15 – Campione di Al-55at%Ti

Si può concludere affermando che la solidificazione senza contatti ha influenza sulla dimensione dei grani. Infatti, quando il metallo è solidificato normalmente si notano tanti grani piccoli, ma nel processo senza contatti la diffrazione dei raggi X mostra che il campione è formato da grani di più grandi dimensioni. Questo fenomeno è dovuto alla solidificazione omogenea, la quale parte da due punti mentre quella eterogenea parte dall'intera superficie a contatto, combinata col fatto che la solidificazione in sospensione risulta più lenta.





## Capitolo 4

### SISTEMI DA VUOTO

#### 4.1 Introduzione

[12] [13] [14]

Il termine “vuoto” è riferito alla situazione fisica che si presenta in una regione di spazio dove la pressione gassosa è sostanzialmente inferiore a quella atmosferica, ovvero 101325 Pa. A seconda che tale pressione gassosa sia di poco o di molto inferiore a quella di riferimento, i fenomeni che si verificano possono risultare assai diversi, ed è prassi distinguere diverse tipologie di vuoto in relazione al relativo intervallo di pressione interessato :

• basso vuoto	$10^5 - 10^2$ Pa	$10^3 - 1$ mbar
• medio vuoto	$10^2 - 10^{-2}$ Pa	$1 - 10^{-4}$ mbar
• alto vuoto	$10^{-2} - 10^{-6}$ Pa	$10^{-4} - 10^{-8}$ mbar
• ultra-alto vuoto	$<10^{-6}$ Pa	$<10^{-8}$ mbar
• vuoto estremo	$<10^{-10}$ Pa	$<10^{-12}$ mbar

Si indica dunque con il termine “grado di vuoto” la rarefazione ottenuta nel recipiente da evacuare, che viene misurata dalla pressione assoluta dei gas residui. Si precisa inoltre che questa classificazione non è rigorosa ma varia a seconda dei testi che si consultano, e serve solamente a dare un’idea di massima.

Il vuoto può sia essere prodotto volutamente all’interno di camere di confinamento per determinati scopi scientifici o tecnici, sia essere presente in natura. Riguardo quest’ultima affermazione risulta provato che la composizione del gas nell’atmosfera cambia al variare dell’altezza, più precisamente diventa sempre più ricca di atomi e molecole leggere man mano che ci si allontana dalla superficie terrestre. Dunque si ha una diminuzione di pressione all’aumentare dell’altezza in cui ci si trova rispetto al mare, fino ad arrivare ad una situazione di vuoto estremo nello spazio.

Negli ultimi decenni sono stati compiuti grandissimi progressi nell'ottenimento di un vuoto sempre più "spinto" (migliore), e oggi si riescono a raggiungere pressioni anche inferiori a  $10^{-10}$  Pa in ambienti quali parti di macchine acceleratrici di particelle. Le ragioni di questa forte spinta provengono sia esigenze per ricerche scientifiche, sia da richieste di alcuni settori in ambito industriale, i quali necessitano di tale applicazione per ottenere un livello qualitativo del loro output più elevato. Nella tabella 4.1 si possono notare alcuni dei campi applicativi del vuoto con il relativo range di pressione richiesto.

APPLICAZIONI	INTERVALLO PRESSIONE (Pa)
Simulazione spaziale	$10^5 - 10^{-4}$
Preparazione di film sottili	$10^{-1} - 10^{-8}$
Tubi elettronici (cinescopi, valvole termoioniche, collettori solari, ecc.)	$10^{-1} - 10^{-6}$
Metallurgia (fusioni e leghe sotto vuoto, metallizzazione, ecc.)	$10^5 - 10^{-1}$
Macchine acceleratrici di particelle	$10^{-4} - 10^{-11}$
Fisica dei plasmi e macchine per fusione nucleare	$10^5 - 10^{-8}$
Studio di superficie (struttura, composizione)	$10^{-4} - 10^{-9}$
Liofilizzazione	$10^1 - 10^{-1}$
Isolamento termico	$10^{-1} - 10^{-3}$

**Tabella 4.1 – Esempi di campi applicativi del vuoto con relativo range di pressione**

Alcune delle problematiche che trovano soluzione nell'adozione dei sistemi di vuoto, sia in ambito scientifico che industriale, possono essere :

- accrescere notevolmente il cammino libero delle molecole di gas in modo tale da permettere a tali molecole, atomi o ioni di raggiungere una superficie o un bersaglio opportuno, senza incappare in urti con molecole estranee facenti parte dell'ambiente in cui si opera (metallizzazione sotto vuoto o macchine acceleratrici di particelle);
- minimizzare il numero di molecole nello spazio circostante che possano interagire e reagire con le superfici da studiare, per poterne così tenere costante la composizione e ottenere informazioni sulle proprietà;
- impedire processi chimico-fisici causati dall'azione dei gas atmosferici (per la fusione di particolari metalli reattivi);
- rallentare i processi di decomposizione organica dovuti ad agenti aerobici (sistemi di imballaggio di materiale organico sotto vuoto);
- favorire l'isolamento termico eliminando il trasporto di calore per convezione;
- eliminare i gas disciolti contenuti in un dato materiale (degassaggio di oli e liofilizzazione), o i gas adsorbiti su una superficie (pulizia tubi elettronici e acceleratori di particelle);
- ridurre la concentrazione di uno o più gas particolari al di sotto di un livello critico;
- simulare particolari situazioni fisiche come quelle che occorrono nello spazio planetario.

#### **4.2 Perdite in un sistema sotto vuoto**

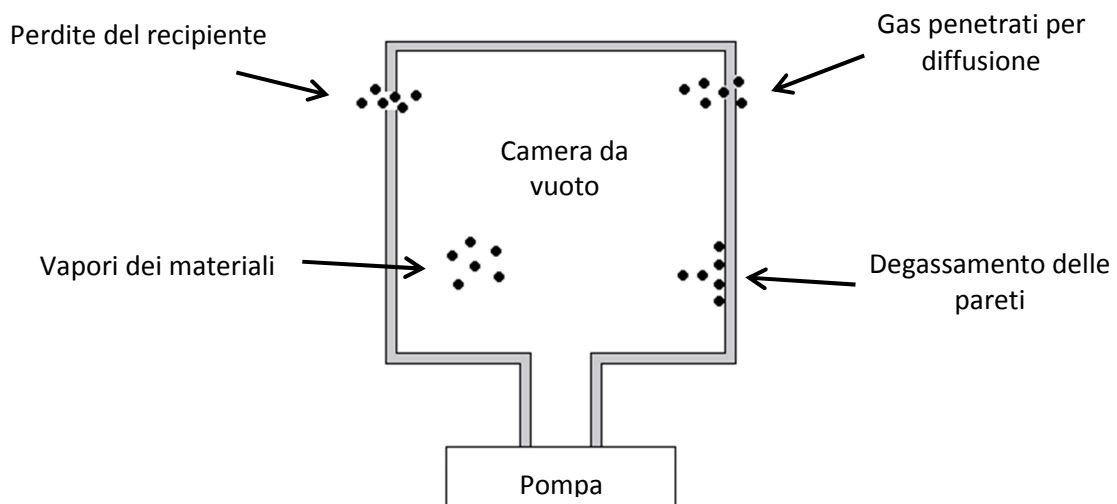
**[13] [15]**

Produrre il vuoto significa asportare molecole di gas o vapore contenute in un determinato recipiente o sistema, quest'ultimo costituito solitamente da una camera da vuoto, un impianto di pompaggio, un apparato di misura del vuoto e un complesso di giunti, valvole, guarnizioni che permettono l'isolamento.

Solitamente si ha a che fare con processi, all'interno dei sistemi a vuoto, che comportano il rilascio di un certo flusso di gas, e quest'ultimi sono causa di "inquinamento"

dell'ambiente nel quale si vuole lavorare e devono perciò essere tolti, al fine di ottenere un risultato maggiormente qualitativo. Le principali sorgenti di tali flussi di gas sono :

- perdite del recipiente, o dell'intero sistema  $Q_f$
- degassamento delle pareti  $Q_d$
- tensione di vapore dei materiali  $Q_v$
- permeazione del recipiente, o dell'intero sistema  $Q_p$



**Figura 4.1 – Perdite in un sistema sotto vuoto**

La quantità totale di gas entrante nel recipiente per unità di tempo si può dunque definire come :

$$(4.1) \quad Q_{tot} = Q_f + Q_d + Q_v + Q_p$$

Questa formula ha validità generale per qualsiasi regime di vuoto, ma in alcuni casi certi termini hanno predominanza rispetto ad altri. In particolare nel basso vuoto il contributo del degassamento delle pareti è trascurabile, invece nell'ultra-alto vuoto è proprio questo termine

a limitare la minima pressione raggiungibile (una volta minimizzati gli altri contributi). Si analizzano ora con più precisione gli effetti dei singoli contributi della formula 4.1.

Il gas che entra nel sistema a causa delle perdite è dovuto essenzialmente a due fattori :

- difetti nel materiale che costituisce la superficie di separazione tra ambienti da evacuare e atmosfera esterna. I difetti possono essere dovuti alla presenza di cricche, inclusioni, bolle aperte, difetti nelle saldature di giunzione, difetti nelle brasature tra materiali, ecc..
- perdite dovute alle imperfezioni nel collegamento tra le varie parti del contenitore realizzate attraverso sistemi di flangiatura e relative guarnizioni.

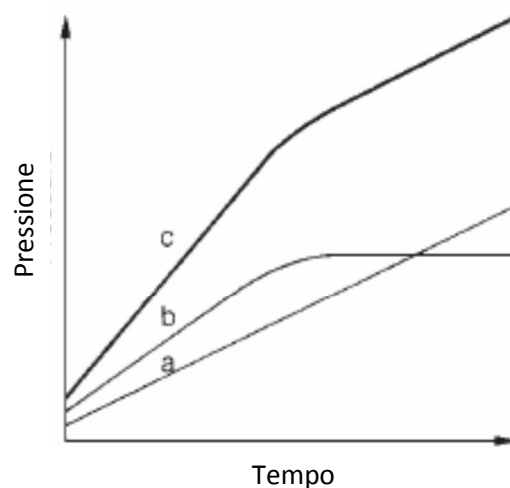
Questo tipo di perdita riveste grande importanza soprattutto nei sistemi ad ultra-alto vuoto o a vuoto estremo, e conviene solitamente renderla trascurabile rispetto al termine di degassamento delle pareti. Per la localizzazione di tale perdite si utilizza un cercafughe ad elio oppure uno spettrometro di massa tarato sulla massa dell'elio. Per quanto riguarda i collegamenti tra parti di un contenitore o tra condotti si utilizzano solitamente apposite flange interfacciate con la superficie da isolare con delle guarnizioni che assicurano la tenuta del vuoto. Queste ultime sono tipicamente elastomeri nei sistemi a basso e medio vuoto, mentre si utilizzano materiali metallici teneri come rame, alluminio, oro o piombo nei sistemi con grado di vuoto superiore.

Un secondo contributo arriva dal gas che proviene dal degassamento delle pareti, e costituisce il fattore dominante nella determinazione del vuoto nei sistemi a ultra-alto vuoto. Tale degassamento è originato dal rilascio nell'atmosfera dei gas che si trovano in superficie, all'interno del reticolo cristallino o polimerico dei materiali esposti al vuoto. Questo fenomeno diminuisce progressivamente con il passare del tempo grazie all'esposizione dei materiali alle basse pressioni, ma può essere considerevolmente ridotto grazie a trattamenti termici effettuati sui materiali componenti il sistema. Il trattamento più comune risulta il riscaldamento delle superfici esposte al vuoto a temperature e tempi variabili in base al risultato che si desidera ottenere (in generale più alta è la temperatura rispetto a quella reale di esercizio, più breve è la durata del processo e più efficace risulta il trattamento stesso). In generale per qualificare il fenomeno di degassamento in un sistema lo si lascia per circa 24 ore in condizioni di vuoto continuo (con la pompa sempre in funzione) a temperatura ambiente, o a quella di processo, andando successivamente a misurare il grado di

degassamento totale. Questa misura, che però tiene conto di tutti i contributi delle varie perdite, può essere effettuata in due modi :

- dinamicamente, ovvero in condizioni di pompaggio stazionario e raggiunta la pressione limite inferiore. Nota la velocità di pompaggio e la pressione totale all'interno del contenitore, dal loro prodotto si ottiene il valore di  $Q_{tot}$  ;
- staticamente, ovvero raggiunto il valore limite inferiore della pressione, si isola il contenitore e si registra il valore di crescita di pressione stessa nel tempo. Il prodotto della derivata in funzione del tempo della pressione per il volume del contenitore fornisce il valore di  $Q_{tot}$ .

Si nota che nel primo caso non è possibile scindere il termine di perdita totale da quello relativo solo al degassamento ( $Q_d$ ), mentre il secondo metodo permette tale scissione, in particolare si può apprezzare la presenza del contributo di una perdita  $Q_f$  distinguendolo dal termine di interesse  $Q_d$  . Infatti la presenza di una perdita come contributo dominante dà come risultato una ricrescita di pressione lineare nel tempo, mentre se risulta dominante il fenomeno di degassamento (oppure la tensione dei vapori dei materiali  $Q_v$ ), la ricrescita mostra una saturazione dopo un certo periodo.



**Figura 4.2 – Andamento di risalita della pressione in un recipiente dopo l'isolamento dalla pompa :**

- a) risalita dovuta alla presenza di una perdita;**
- b) risalita dovuta a degassamento delle pareti;**
- c) risalita dovuta alla combinazione dei due effetti.**

La terza componente che caratterizza le perdite totali è il gas derivante dalla tensione dei vapori nei materiali. Tale concetto si spiega con il fatto che quando un liquido è introdotto in un recipiente chiuso ad una data temperatura, all'interno del recipiente si crea un equilibrio dinamico a seguito del quale il numero di molecole che nell'unità di tempo hanno energia cinetica tale da allontanarsi dalla superficie di liquido diventando vapore, è uguale al numero di molecole che dal vapore rientrano nel liquido. La pressione che il vapore esercita sulle pareti del recipiente quando si trova in equilibrio dinamico con il liquido ad una data temperatura è chiamata tensione di vapore. Tale fenomeno è dipendente da temperatura e pressione, ovvero aumenta al crescere della temperatura e aumenta al diminuire della pressione. Si può dunque affermare che in base ai materiali che possono andare in fusione, o ai liquidi che possono essere presenti (anche a temperature più basse di quella di evaporazione), come per esempio prodotti per la pulizia dei vari componenti, è possibile riscontrare una pressione che ostacola il raggiungimento del vuoto dovuta al fenomeno appena descritto.

L'ultimo componente da menzionare sono i gas entranti a causa della permeazione del recipiente o dei vari componenti del sistema (ad esempio vetro, guarnizioni). La permeazione è il passaggio del gas attraverso lo spessore finito di materiale solido che fa da interfaccia tra ambiente in vuoto e ambiente a pressione atmosferica (o a pressione inferiore purché superiore a quella interna). Nella permeazione sono inclusi anche i fenomeni di diffusione di un gas nella struttura del materiale interessato dal fenomeno.

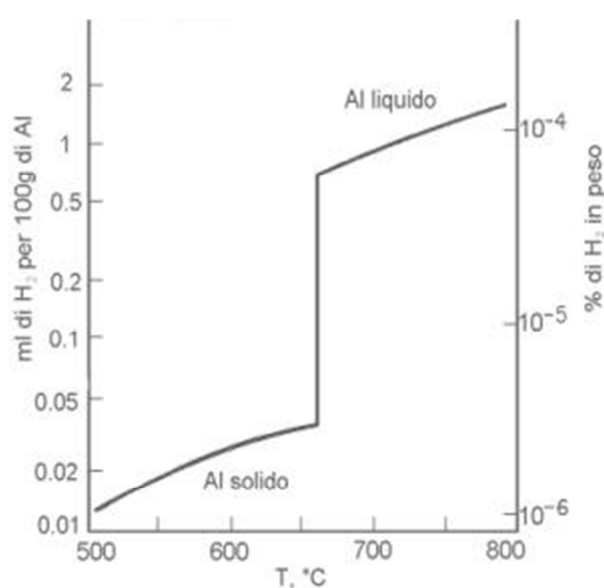
### **4.3 Alluminio e sua affinità con altri elementi**

**[16] [17]**

L'ottenimento del vuoto in apposite camere è un processo che acquisisce rilevante importanza qual ora lo si abbini a processi di fusione dell'alluminio e leghe leggere. Infatti nell'ambiente in cui si processa normalmente l'alluminio sono presenti alcuni componenti, quali ossigeno e idrogeno, che vanno a peggiorare la qualità del prodotto solidificato. L'ossigeno a contatto con il metallo fuso crea uno strato di ossido, composto da allumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ed essendo l'alluminio molto reattivo tale strato si forma istantaneamente. L'idrogeno invece risulta dannoso perché va a creare delle porosità non volute nel materiale.



La porosità è legata ad un problema di sovrasaturazione che il metallo solidificato può avere nei confronti del gas precedentemente assorbito dalla fase liquida. A differenza di altri metalli, l'alluminio assorbe quasi esclusivamente idrogeno e a questo gas è pertanto da imputare la responsabilità della produzione di difettosità sotto forma di pori, anche di dimensioni tali da essere osservabili ad occhio nudo. La solubilità dell'idrogeno nell'alluminio, come appare evidente dalla figura 4.3, aumenta all'aumentare della temperatura sia nella fase solida che in quella liquida, presentando una discontinuità (più di un ordine di grandezza) in corrispondenza del punto di fusione.



**Figura 4.3 – Solubilità dell'idrogeno nell'alluminio**

Mentre per l'ossigeno la maggior sorgente risulta l'aria, l'idrogeno proviene in principal modo dalla reazione che si crea tra alluminio e vapore d'acqua ( $2\text{Al} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}$ ), quest'ultimo riscontrabile nell'atmosfera con alto grado di umidità, nei crogioli più nuovi (necessitano di un processo di pre-riscaldamento), negli attrezzi da fonderia e nei refrattari. Il problema della creazione di bolle di gas all'interno della matrice metallica durante la solidificazione, venendosi drasticamente a ridurre la capacità del metallo di ospitare gas disciolto, può pertanto essere trattato come un vero e proprio fenomeno di segregazione, con nucleazione e accrescimento di un precipitato in fase gassosa. La reazione tra alluminio e vapore d'acqua è presente in quantità elevata alle temperature operative di fonderia, anche se

tuttavia lo strato di ossido che si forma sopra i bagni protegge in parte il fuso da questa reazione. E' importante notare che, intorno a 930°C il film di ossido perde la sua natura protettiva e il vapore acqueo può penetrare fino al metallo sottostante. Sebbene questa temperatura sia lontana dalle normali temperature di fusione, si deve comunque fare attenzione ad evitare che alcune zone della superficie raggiungano questi valori. Per questi motivi, che sanciscono l'idrogeno come un componente dannoso, nei processi di fonderia si applicano tecniche per ridurre la quantità nella fase liquida dell'alluminio o delle sue leghe. Una di queste tecniche è il degasaggio, del quale esistono diverse tipologie raggruppabili in :

- degasaggio naturale, ovvero si aspetta che il metallo, se molto gasato, perda da solo una certa quantità di idrogeno. Questo metodo richiede però molto tempo ed inoltre è applicabile se le temperature non sono troppo elevate e se l'atmosfera sopra il metallo è secca;
- degasaggio sotto vuoto, ovvero si favorisce la formazione di bolle d'idrogeno attraverso la riduzione della pressione atmosferica. Le bolle una volta formatesi vengono rimosse dalla pompa. I tempi sono ragionevoli e possono essere accorciati insufflando contemporaneamente azoto nel metallo attraverso un tubo;
- degasaggio con gas inerti o reattivi, ovvero si insuffla all'interno del fuso, attraverso appositi sistemi (tubo semplice, sistema rotante e diffusore), una certa quantità di gas sotto forma di piccole bolle che riescono a intrappolare l'idrogeno e risalire in superficie. Tra le varie tipologie quest'ultima risulta la più efficace, e i gas solitamente usati sono argon e azoto.

In conclusione si può affermare che l'eliminazione di questi componenti nocivi, presenti nell'ambiente di processazione dell'alluminio fuso, può evitare la nascita dei difetti sopra descritti conferendo maggior qualità al metallo solidificato.

#### 4.4 Problematiche

[18] [19]

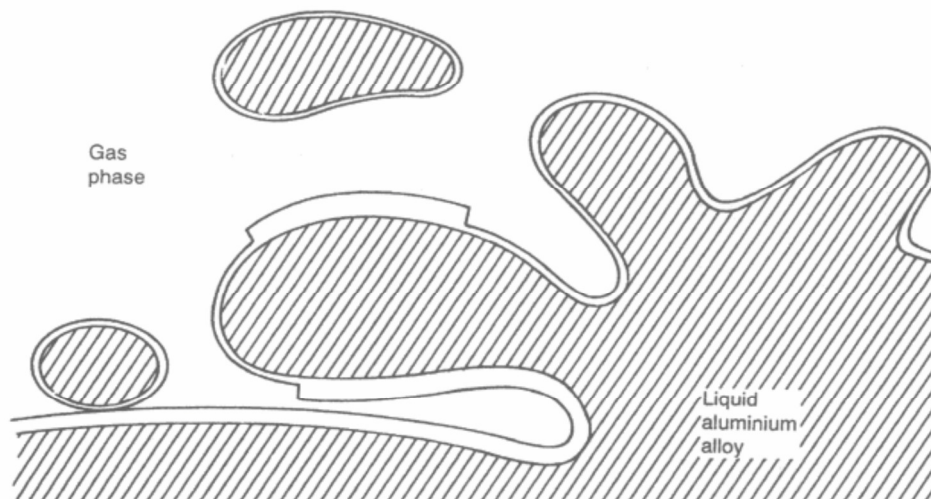
La fusione di alluminio in vuoto presenta notevoli vantaggi ma non è certo esente da difetti. Infatti se da un lato questo processo rappresenta un metodo di degasaggio, visto che la solubilità dell'idrogeno in un metallo in fase liquida risulta proporzionale alla radice quadrata della pressione parziale del gas nell'atmosfera a contatto con il fuso, dall'altro la nucleazione

delle bolle è pesantemente influenzata dalla pressione esercitata sul liquido la quale regola la quantità di idrogeno che può essere assorbita e la quantità che invece viene segregata. A tal proposito risulta infatti che un abbassamento della pressione va a favorire la nucleazione delle bolle di gas che possono rimanere intrappolate nel metallo in caso di solidificazione rapida, mentre un innalzamento della stessa, come ad esempio succede in un processo di pressofusione, riduce o addirittura elimina il problema della porosità, imponendo al gas di rimanere intrappolato nella matrice metallica. Inoltre un altro fattore che abbinato al precedente può favorire lo sviluppo di bolle di gas è il ritiro di volume nella fase di solidificazione, ed essendo elevato nell'alluminio e nelle sue leghe (può andare dal 3,5% al 8,5%) va a creare dei vuoti che localmente abbassano il valore della pressione, aiutando l'innescio del processo di nucleazione.

Da queste considerazioni si evince che un controllo errato dell'intero processo può portare alla formazione di difetti nel metallo solidificato.

#### **4.4.1 Fenomeno del doppio film di ossido**

Un altro difetto che può presentarsi durante la fusione dell'alluminio, sia in vuoto che a pressione più alta, è il fenomeno del doppio film di ossido, studiato in vari esperimenti e descritto di seguito. Come più volte esposto, quando l'alluminio viene a contatto con l'atmosfera contenente ossigeno, la superficie si ossida in modo estremamente rapido. Così, se nel processo sono presenti trasferimenti turbolenti, può accadere che lo strato superficiale di fuso si ripieghi su se stesso andando a intrappolare una certa quantità di gas presente nell'atmosfera soprastante (come visibile in figura 4.4). Tale gas si presenta dunque ricoperto di uno strato di ossido e può liberamente fluire all'interno del fuso costituendo a tutti gli effetti un difetto il quale agisce come catalizzatore per le molecole di gas presenti all'interno del metallo causandone la nucleazione e accrescimento con successiva nascita di una porosità una volta solidificato.



**Figura 4.4 – Moto turbolento della superficie dell'alluminio che porta alla probabile formazione del difetto del doppio film di ossido.**

Il comportamento di questo tipo di difetto è stato studiato da Raiszadeh e Griffiths, i quali hanno analizzato più pezzi di alluminio puro (>99,7 wt.% Al) fatti prima fondere in un crogiolo di grafite in forno ad induzione ad una temperatura di circa 850 °C, e successivamente portati in un piccolo forno tenuto a temperatura costante di 800 °C da resistenze e connesso ad una pompa a vuoto. I fusi sono stati tenuti in quest'ultimo forno per un tempo di 10, 20 e 60 minuti, sia a normale pressione atmosferica sia sotto vuoto a 80 mbar.

E' stato inoltre verificato, con l'uso di una radiografia real-time a raggi X, l'effetto introdotto da Nyahumwa di consumazione dell'atmosfera interna (formata da ossigeno e azoto) relativa a questo tipo di difetti. Accade infatti che dopo un periodo di incubazione, lo strato di ossido formato inizialmente da allumina amorfa diventa prima  $\gamma$ -allumina e successivamente  $\alpha$ -allumina. Queste evoluzioni della struttura sono accompagnate da un fenomeno di contrazione del volume di ossido che, essendo quest'ultimo estremamente sottile e avendo bassa rigidità, favorisce la formazione di cricche le quali portano l'atmosfera internamente contenuta a diretto contatto con il metallo. L'alto grado di ossidazione dell'alluminio porta all'immediata formazione di nuovo ossido nelle cricche aperte con conseguente consumo dell'atmosfera, e questo procedimento si ripete fino a che non si esaurisce l'ossigeno contenuto nel difetto.

In accordo con la legge di Stokes si ha che il galleggiamento/affondamento dei difetti causati dal doppio film di ossido è direttamente proporzionale al loro diametro. Generalmente, in condizioni di pressione atmosferica, tali difetti presentano una densità maggiore dell'alluminio fuso e tendono dunque a sedimentarsi sul fondo col passare del tempo. Accade però che nel caso in cui il contenuto iniziale di idrogeno nel fuso è superiore alla quantità di equilibrio associata all'ambiente atmosferico contenuto nei difetti, l'idrogeno diffonde all'interno di tali attraverso le cricche che si formano (a causa del fenomeno precedentemente descritto) causandone l'espansione con relativo abbassamento di densità, e se quest'ultima raggiunge valori inferiori a quella dell'alluminio il difetto comincia a galleggiare ed emergere verso la superficie. Nel caso invece in cui il fuso rimanga in condizioni di vuoto (80 mbar) si è riscontrato che questi difetti espandono il loro volume fino a 12,5 volte e mezzo, e in combinazione all'effetto di espansione dovuto alla diffusione d'idrogeno, possono raggiungere densità tali da permettere il loro galleggiamento, il quale risulta molto più efficace rispetto alla condizione di pressione esterna di 1 atm. Tale effetto può a volte essere modificato proprio dall'eccessiva espansione dei gas contenuti che causano lacerazioni sulla superficie dell'ossido con conseguente consumo di atmosfera (il contenuto di ossigeno anche in condizioni di 80 mbar di pressione è tale da causare l'ossidazione del metallo), la quale porta ad una diminuzione dell'effetto di galleggiamento. Risulta dunque possibile che tale impoverimento dell'atmosfera interna dei difetti causi un innalzamento della densità totale, e nel caso superi quella dell'alluminio si verifichi la loro sedimentazione sul fondo.

Il tasso di desorbimento di idrogeno da parte dell'alluminio liquido a pressione atmosferica è molto basso, ma il fenomeno di galleggiamento del difetto dovuto al doppio film di ossido in condizioni di vuoto agisce come procedura di degasaggio e fa diminuire più velocemente il contenuto del gas. L'inconveniente risulta nel fatto che più l'idrogeno si dissolve nell'alluminio, e più l'espansione dei difetti viene limitata risultando in un minor fenomeno di galleggiamento e dunque in un minor tasso di eliminazione dei difetti stessi.

In conclusione i provini analizzati hanno evidenziato la tendenza ad un complessivo miglior effetto di galleggiamento con conseguente maggior tasso di rimozione delle particelle di idrogeno disciolto nel caso in cui il fuso sia in condizioni di vuoto.

## 4.5 Ottenimento del vuoto

[15] [20] [21]

Per fare il vuoto, come anche per mantenerlo, è necessario avere dei dispositivi meccanici che asportino dai recipienti interessati il gas contenuto, attraverso delle condutture; tali dispositivi si chiamano pompe da vuoto. In buona sostanza, una pompa a vuoto è un compressore, in quanto porta un fluido in fase gassosa da una pressione più bassa ad una più alta. La differenza sta nel fatto che un compressore lavora a pressione di aspirazione costante, mentre la pompa a vuoto lavora a pressione di aspirazione variabile (decescente) e a pressione di mandata costante. Ciò che caratterizza e distingue ogni pompa da vuoto è sostanzialmente :

- portata (definita anche come velocità di pompaggio), ovvero la misura della quantità di gas, in termini di volume, che la pompa riesce ad aspirare dal recipiente nell'unità di tempo;
- intervallo di pressione di funzionamento. Per tale intervallo infatti la pompa ha una velocità di aspirazione costante e massima, mentre al di fuori la velocità decade rapidamente;
- pressione minima raggiungibile, ovvero quel valore misurato quando ogni ulteriore riduzione di pressione nel tempo risulta trascurabile.

Mentre la misura della pressione limite raggiungibile da una pompa, che è ottenuta mettendo in comunicazione diretta un piccolo volume con la bocca della pompa, non presenta particolari problemi, la misura della velocità di pompaggio risulta più complessa e può essere influenzata da perdite nell'impianto a vuoto (precedentemente descritte). La misura della velocità di pompaggio alle diverse pressioni è effettuata misurando il tempo di evacuazione di un recipiente di volume  $V$  noto, e le pressioni iniziale e finale. Infatti, nell'ipotesi che il processo d'evacuazione sia isoterma (ipotesi ragionevole dato che la massa dei gas è in genere piccola rispetto alla massa del recipiente e della pompa e gli scambi termici sono abbastanza rapidi), si può scrivere per un processo ideale (senza perdite) :

$$(4.2) \quad pV = cost$$

Questa equazione, derivata rispetto al tempo, porta alla seguente relazione :

$$(4.3) \quad V \left( \frac{dp}{dt} \right) + p \left( \frac{dV}{dt} \right) = 0$$

che può essere scritto nella forma :

$$(4.4) \quad -\left(\frac{V}{p}\right) dp = \Sigma dt$$

essendo per definizione  $\Sigma=dV/dt$  la velocità di pompaggio della pompa. Integrando l'equazione differenziale sopra descritta su un intervallo di tempo  $t_1 - t_2$  sufficientemente breve in modo da poter considerare  $\Sigma$  costante, si ottiene :

$$(4.5) \quad -V \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = \int_{t_1}^{t_2} \Sigma dt$$

$$\Sigma = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left( \frac{p_1}{p_2} \right)$$

Effettuando la misura della pressione per una serie di intervalli di tempo consecutivi, si può ricavare l'andamento della velocità di pompaggio. Quando la pressione del recipiente si avvicina alla pressione ultima, la misura di  $\Sigma$  con questo metodo può essere falsata dalla presenza di perdite nel sistema e dal degasaggio delle pareti. Nel caso in cui nell'impianto vi sia una perdita con portata costante  $Q_{tot}$ , si ha che il prodotto  $pV$  non è più costante, e quindi scriveremo che :

$$(4.6) \quad d(pV) = Q_{tot} = cost$$

L'equazione assume ora la forma :

$$(4.7) \quad -V \left( \frac{dp}{dt} \right) + Q_{tot} = \Sigma p$$

$$\Sigma = \frac{V}{t_2 - t_1} \ln \left( \frac{p_1 - Q_{tot}/\Sigma}{p_2 - Q_{tot}/\Sigma} \right)$$

Risulta dunque evidente che per determinare la velocità di pompaggio è necessario misurare la portata della perdita. Tale misura viene effettuata isolando il recipiente dalla pompa, dopo averlo evacuato, e misurando la variazione di pressione nel tempo. Infatti nell'ipotesi che il processo di degasaggio sia trascurabile, dalla equazione precedente, avendo posto uguale a zero la portata della pompa, si ricava :

$$(4.8) \quad p(t) = \frac{Q_{tot}}{V} t$$

da cui si ottiene il valore di  $Q_{tot}$ .

### 4.5.1 Tipologie di pompe

L'intero processo di pompaggio che porta al raggiungimento di bassi valori di pressione si può in generale suddividere in più parti. Risulta infatti che fino al basso o medio vuoto prevale il fenomeno di asportazione delle molecole nella fase gassosa senza risentire del degassamento delle pareti. Col diminuire della pressione, le molecole del gas presente risultano essere quasi tutte sulle pareti del contenitore, e il pompaggio consiste appunto nell'asportare tali molecole. Al raggiungimento del vuoto più spinto (l'ultra-alto vuoto) le pareti risultano essere "pulite", e le molecole che si vanno ad asportare sono quelle presenti nel reticolo cristallino dei materiali presenti nel contenitore.

Le pompe da vuoto possono essere suddivise in tre categorie principali in base al principio di funzionamento :

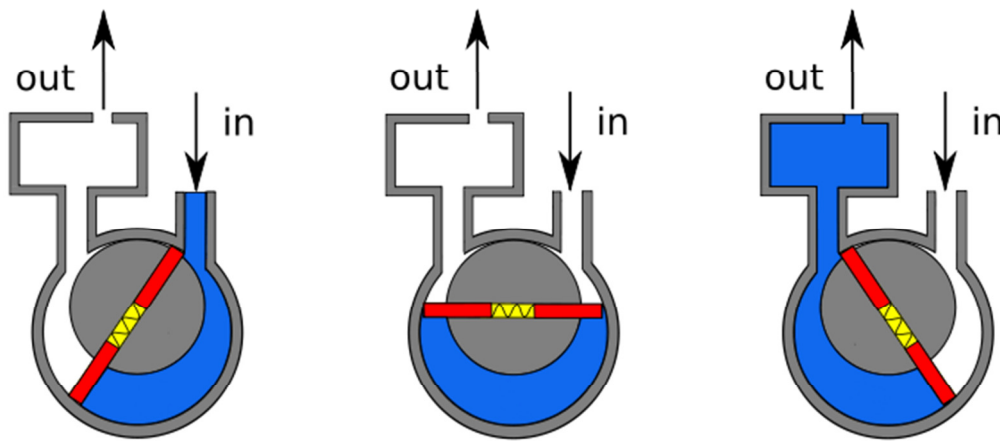
- a spostamento di parete, ovvero quelle che usano un meccanismo per espandere ciclicamente una cavità permettendo al gas di affluire dalla camera da vuoto, e una volta aspirato la cavità viene sigillata, il gas compresso ed espulso verso l'atmosfera (es. pompe rotative e roots);
- a trasferimento di quantità di moto, dette anche pompe molecolari, ovvero le pompe che usano jet di fluidi densi ad alta velocità o lame rotanti ad elevata velocità in maniera tale da imprimere un grande impulso alle molecole di gas, forzandone l'uscita (es. pompe turbomolecolari e a diffusione);
- ad intrappolamento, ovvero quelle che catturano i gas residui in un solido o su una superficie assorbente (es. pompe criogeniche).

Tra le categorie appena descritte, verranno analizzati brevemente di seguito i tipi di pompa da vuoto maggiormente utilizzati sia industrialmente che in laboratorio per effettuare esperimenti scientifici.

Le pompe rotative appartengono alla categoria "a spostamento di parete", il loro funzionamento si basa sul movimento di organi meccanici e proprio questa loro caratteristica impedisce il raggiungimento di elevati gradi di vuoto, dato che le parti in movimento non possono assicurare una tenuta perfetta. Vengono dunque utilizzate per ottenere il basso o medio vuoto, o per effettuare il pre-vuoto necessario al funzionamento di altri tipi di pompe. Esse sono costituite da un rotore provvisto di palette mobili che ruota eccentricamente in uno



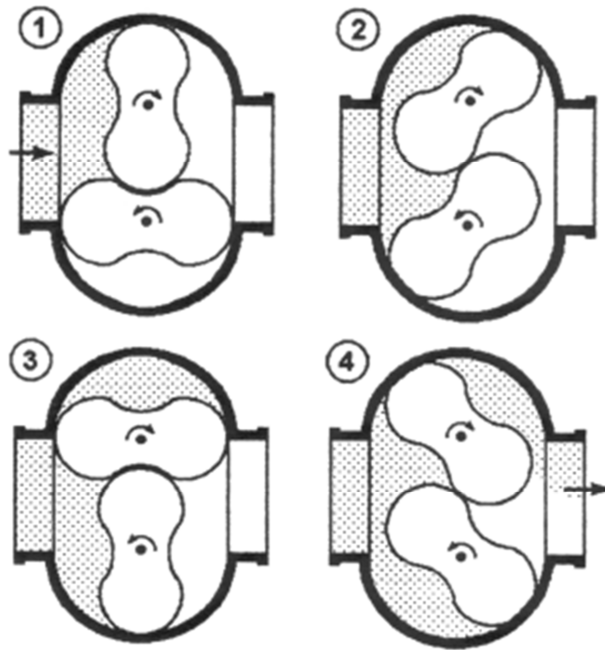
statore. Le palette vengono tenute a contatto con la superficie interna dello statore da una molla e dalla forza centrifuga. Tra le palette e lo statore è sempre presente un velo d'olio come elemento di tenuta. La variazione di volume delle camere crea depressioni (fase di aspirazione) e compressioni dell'aria (fase di scarico). Nella fase di aspirazione il gas viene estratto dalla camera da vuoto tramite il manicotto di aspirazione, successivamente grazie all'eccentricità del rotore la camera continua ad aumentare di volume. Una volta raggiunto il volume massimo il manicotto di aspirazione viene chiuso da una seconda paletta mentre la camera della pompa comincia a diminuire di volume consentendo ai gas di essere espulsi dal manicotto di scarico. Le pompe rotative raggiungono pressioni di  $10^{-3}$  mbar, limite dettato dalla non perfetta tenuta degli organi in movimento, e dal degassamento dell'olio lubrificante.



**Figura 4.5 – Funzionamento di una pompa rotativa**

Un'altra tipologia di pompe a “spostamento di parete” sono le roots, composte da una camera ovale nella quale è alloggiata una coppia di lobi rotanti. I lobi, comandati da un dispositivo esterno, ruotano in maniera sincrona, con senso di rotazione opposto e non vengono mai in contatto né con la parete della cavità né tra di loro. Proprio per tale motivo, per poter assicurare la tenuta del vuoto, la tolleranza in fase di progettazione e realizzazione deve essere mantenuta inferiore a 0,1 mm. Questo tipo di pompe funziona inoltre senza olio lubrificante, permettendo così di evitare la contaminazione dei gas che peggiorerebbero lo stato di vuoto ottenibile. I gas vengono trasportati dall'aspirazione alla mandata venendo racchiusi negli spazi che si creano tra il profilo dei denti e la parte interna della camera, e durante tale processo non ha luogo alcuna compressione o espansione degli stessi gas

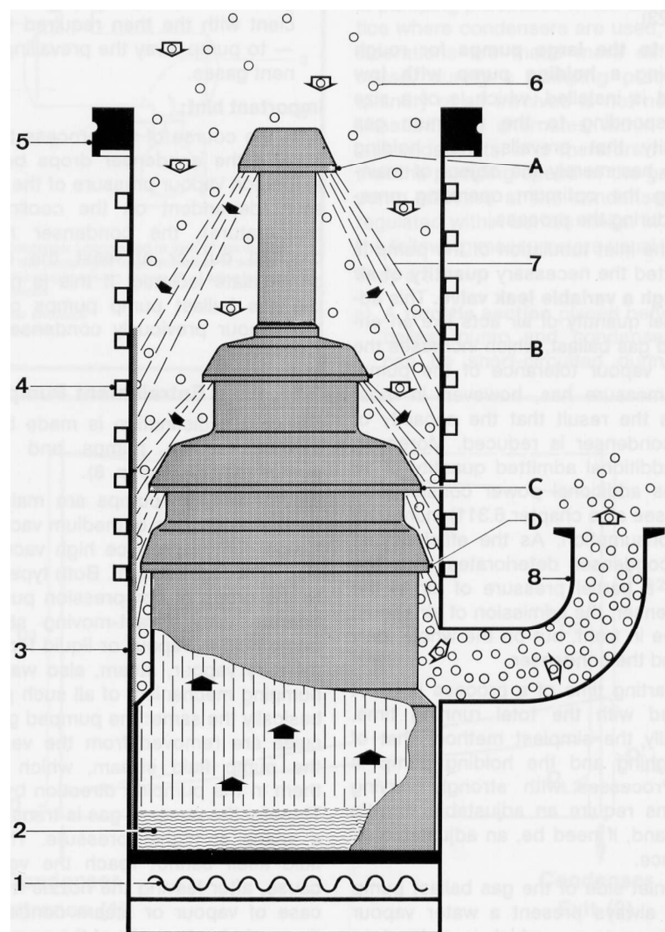
intrappolati. Durante un singolo giro dell'albero che fa girare i lobi avvengono più fasi di trasporto di gas (4 in una configurazione con ingranaggi a due lobi), e questo permette di raggiungere portate elevate. Le pompe roots possono raggiungere pressioni inferiori a  $10^{-3}$  mbar, ma solo se usate in serie con una pompa rotativa che garantisce un pre-vuoto.



**Figura 4.6 – Funzionamento di una pompa scroll**

La pompa a diffusione è una pompa “a trasferimento di quantità di moto”, adatta per alto vuoto e priva di parti in movimento; essa è in grado di generare una pressione inferiore a  $10^{-5}$  mbar, e il suo funzionamento è basato sulla diffusione dei vapori di un olio a bassissima tensione di vapore (in genere olio di silicone). La pompa è costituita da un recipiente inferiore che contiene l'olio e il sistema di riscaldamento (una resistenza da fornello elettrico), dal quale si erge un condotto verticale che termina con una serie di ugelli rivolti verso il basso; il tutto è contenuto in un recipiente collegato con la camera dove si deve fare il vuoto e con una pompa ausiliaria (solitamente si usa quella rotativa) necessaria per creare il pre-vuoto. Il fornello riscalda l'olio e lo porta ad evaporazione, le molecole di vapore salgono attraverso la colonna centrale, colpiscono i deflettori e cadono verso il basso formando un fascio di molecole ad alta velocità. Le pareti della pompa che contengono la colonna sono raffreddate ad acqua e forniscono una superficie di condensazione per il vapore che, di conseguenza, torna alla fase

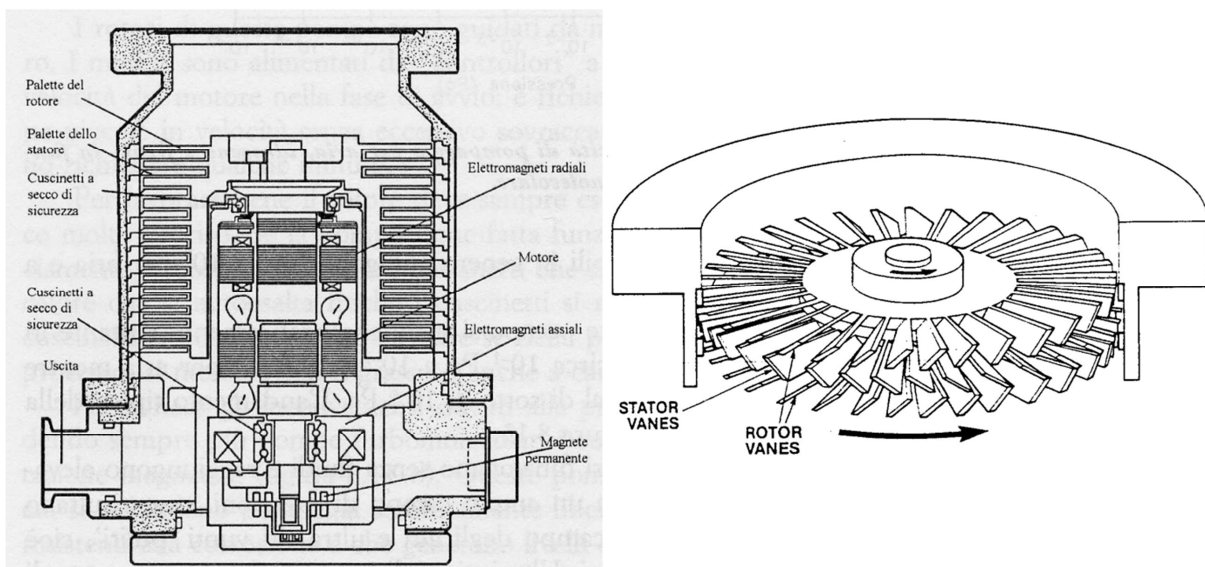
liquida nel recipiente. Le molecole del gas da evacuare, a causa del loro moto termico, diffondono nella pompa e collidono con le molecole del vapore acquistando una componente di velocità diretta verso il basso; esse vengono spinte in questa direzione trascinate dal fascio molecolare e finiscono per essere evacuate dalla pompa ausiliaria. I condotti di collegamento con la camera e con la pompa ausiliaria sono muniti di diaframmi e raffreddati, così da far condensare i vapori d'olio evitandone la fuoriuscita. La pressione minima raggiungibile è determinata dalla tensione di vapore dell'olio utilizzato.



**Figura 4.7 – Funzionamento di una pompa a diffusione.**

- |   |  |
|---|--|
| <b>1 – Sistema di riscaldamento</b>                         | <b>6 – Particelle di gas</b>                 |
| <b>2 – Recipiente olio</b>                                  | <b>7 – Fascio di vapori</b>                  |
| <b>3 – Corpo della pompa</b>                                | <b>8 – Connessione alla pompa ausiliaria</b> |
| <b>4 – Sistema di raffreddamento</b>                        | <b>A .. D – Ugelli</b>                       |
| <b>5 - Flangia di connessione al recipiente da evacuare</b> |  |

Altre pompe a “trasferimento di quantità di moto” sono quelle turbomolecolari, ovvero pompe secondarie (che lavorano dunque in serie con le rotative) per l’alto vuoto, utilizzate generalmente in laboratorio o nei microscopi elettronici. Esse sono pompe a trascinamento in cui il rotore è formato da vari dischi equipaggiati di alette, i quali ruotano tra altri dischi (definiti statorici perché non girano) anch’essi equipaggiati di alette ma inclinate in senso opposto. Le lamelle rotoriche urtano le molecole d'aria, spingendole verso quelle statoriche; l'urto contro queste, grazie al loro orientamento, fa passare le molecole al rotore successivo, dove il processo si ripete. Queste lamelle sono orientate in maniera progressiva in modo da adattarsi alle differenti pressioni presenti all'interno della pompa stessa. La velocità di rotazione di tali pompe può raggiungere le decine di migliaia di giri al minuto, velocità per le quali risulta di massima importanza l’utilizzo di cuscinetti molto resistenti (solitamente a sfere in ceramica). Montando i cuscinetti risulta necessario lubrificarli con olio, la cui evaporazione causata dalla bassa pressione comprometterebbe la qualità del vuoto generato dalla pompa stessa. Per tale motivo alcune di queste pompe vengono equipaggiate con cuscinetti magnetici, appunto per eliminare la presenza di fluidi lubrificanti. Una pompa turbomolecolare può raggiungere vuoti dell'ordine di  $10^{-10}$  mbar; essa deve essere usata di norma in serie con una pompa da vuoto primaria, che provvede ad innalzare la pressione del gas in uscita, permettendo di scaricarlo in atmosfera.



**Figura 4.8 e 4.9 – Spaccato di una pompa turbomolecolare con dettaglio sui dischi statorici e rotorici**

La pompa criogenica appartiene alla categoria “ad intrappolamento”, e funziona secondo il principio della parete fredda per il quale se una superficie all’interno di un sistema da vuoto viene raffreddata i vapori ed i gas presenti tenderanno a condensare su di essa, riducendo così la pressione nella camera. Se la temperatura raggiunta dalla parete è sufficientemente bassa i gas potranno anche solidificare. La pressione limite di questa pompa dipende dalla tensione di vapore del gas da evacuare alla temperatura della parete fredda. Con tali pompe si possono raggiungere gradi di ultra-alto vuoto se come fluido refrigerante si utilizza l’elio, ottenendo pareti fredde aventi temperature vicine a quelle dell’elio liquido (4,2 K). In tal caso, ad esclusione di elio e idrogeno, tutti gli altri gas presentano una pressione base inferiore a  $10^{-10}$  mbar. Per intrappolare l’idrogeno vengono introdotte delle piastre ricoperte da carboni attivi che essendo molto porosi ne permettono l’assorbimento. Le pompe criogeniche non scaricano il gas pompato, ma lo trattengono solidificato sulle pareti fredde. Per questo motivo la pompa presenta una capacità massima di pompaggio, e oltrepassata la soglia necessita di una fase di rigenerazione. Quest’ultima fase consiste nell’isolare la pompa dal recipiente da evacuare, connetterla a un sistema da vuoto primario e interrompere la circolazione del fluido refrigerante permettendo così ai gas di tornare allo stato gassoso ed essere assorbiti dalla pompa ausiliaria.

## CONCLUSIONE

Alla fine di questo lavoro di tesi è emerso il fatto che il vuoto è l'ambiente di lavoro ideale per ogni tipo di processo dato che preserva il materiale dalle impurezze che possono essere presenti in atmosfera, e dunque migliora le sue caratteristiche. La fusione dell'alluminio, specialmente se effettuata con un sistema a levitazione, è uno di questi processi vista la caratteristica tipica di questo metallo a ossidare istantaneamente a contatto con l'atmosfera, e vista l'attitudine ad assorbire una grande quantità di idrogeno all'aumentare della sua temperatura. Proprio quest'ultimo aspetto è considerato un fattore critico perché fonte della nascita di porosità a causa del rilascio delle molecole di idrogeno al momento del passaggio in fase solida (enorme divario di solubilità tra le due fasi). La creazione del vuoto agisce in senso positivo perché rappresenta un metodo di degassaggio (la solubilità dell'idrogeno in fase liquida è proporzionale alla radice quadrata della pressione parziale del gas nell'atmosfera a contatto con il fuso), ma allo stesso tempo favorisce la nascita di porosità più grandi dato che una bassa pressione all'esterno del materiale tende a far espandere i pori presenti. Un altro fenomeno negativo che viene a formarsi soprattutto quando l'alluminio subisce un moto turbolento, è il difetto del doppio film di ossido che può compromettere la qualità del materiale fungendo da sito di iniziazione per la nascita di porosità. L'applicazione di un grado di vuoto non troppo elevato (quelli solitamente raggiungibili con impianti non eccessivamente costosi) può favorire l'eliminazione del difetto grazie ad un suo maggior effetto di galleggiamento (finisce in superficie per venire aspirato dalla pompa), ma non riesce a garantire una purezza elevata a causa della variabilità proprio di tale effetto, che in alcuni casi può risultare in una notevole riduzione del galleggiamento intrappolando così il doppio film all'interno del materiale. Inoltre la formazione dell'ossido anche a pressioni molto basse indica la presenza in tale atmosfera di una quantità d'aria sufficiente a far innescare il processo e a dar luogo alla formazione del difetto del doppio film di ossido.

Per evitare la formazione di queste impurità bisognerebbe dunque operare in condizioni di ultra-alto vuoto, il quale risulta però difficile da raggiungere visto le numerose perdite che possono essere presenti in un sistema, ed applicabile solo con dei sistemi di pompaggio che operano in serie, e dunque dispendiosi sotto il profilo economico.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] F. Zanatta, “*Alluminio, processi di produzione innovativi e tecnologie meccaniche*”, appunti del corso di Metallurgia dei metalli non ferrosi, Università degli studi di Trento, Facoltà di ingegneria dei materiali, a.a. 2002/2003
- [2] F. Bonollo, A. Tiziani, “*Alluminio: tecnologie produttive*”, Corso di Applicazioni industriali metallurgiche, Università degli studi di Padova, Facoltà di ingegneria gestionale
- [3] [http://www.dmfc.unict.it/siracusa/web1/materiale\\_didattico/l3.pdf](http://www.dmfc.unict.it/siracusa/web1/materiale_didattico/l3.pdf)
- [4] [http://www.aluplanet.com/ita/info\\_eco\\_doc\\_PO.asp?Doc=3650](http://www.aluplanet.com/ita/info_eco_doc_PO.asp?Doc=3650)
- [5] C. Padrin, “*Fusione di materiali metallici mediante sospensione e confinamento magnetico in crogiolo freddo*”, Tesi di Laurea, Università degli studi di Padova, Facoltà di ingegneria gestionale, a.a. 2000/2001
- [6] P. Gillon, “*Cold crucible induction melting: theory and applications*” HIS 01
- [7] H. K. Moffatt, “*Electromagnetic stirring*”, Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics, University of Cambridge, 1990
- [8] S. Asai, “*Recent development and prospect of electromagnetic processing of materials*”, Science and technology of advanced materials, 2000
- [9] Qiang Wang, Chun-jiang Wang, Tie Liu, Kal Wang, Ji-cheng He, “*Control of solidified structures in aluminum-silicon alloys by high magnetic fields*”, J Master Sci, 2007
- [10] Jeong-Ho Kim, Eui-Pak Yoon, “*Elimination of Fe element in A380 aluminum alloy scrap by electromagnetic force*”, Journal of materials science letters, 2000
- [11] E. Fourreaux, P. Gillon, “*Contactless processing of massive metallic materials*”, HIS 01
- [12] [http://mcvirgo.roma1.infn.it/~ricci/dispense/Vuoto/Vuoto\\_parte1.pdf](http://mcvirgo.roma1.infn.it/~ricci/dispense/Vuoto/Vuoto_parte1.pdf)
- [13] [http://www.roma1.infn.it/people/luci/labo\\_termo/Sistemi\\_da\\_vuoto.pdf](http://www.roma1.infn.it/people/luci/labo_termo/Sistemi_da_vuoto.pdf)
- [14] [http://it.wikipedia.org/wiki/Vuoto\\_%28fisica%29](http://it.wikipedia.org/wiki/Vuoto_%28fisica%29)



- [15] P. Sonato, *“Lezioni di scienza e tecnologia del vuoto”*, Università di Padova, 2005
- [16] [http://www.titierre.com/pagina\\_degasaggio\\_tecnica.htm](http://www.titierre.com/pagina_degasaggio_tecnica.htm)
- [17] [http://www.ing.unitn.it/~colombo/Porosit\\_alluminio/Porosit\\_Alluminio\\_1481im.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/Porosit_alluminio/Porosit_Alluminio_1481im.htm)
- [18] R. Raiszadeh, W. D. Griffiths, *“The behavior of double oxide film defects in liquid Al alloy under atmospheric and reduced pressures”*, Journal of alloys and compounds, 2010
- [19] M. Divandari, J. Campbell, *“Oxide film characteristics of Al-7Si-Mg alloy in dynamic conditions in casting”*, International journal of cast metals research, 2004
- [20] [http://www.roma1.infn.it/people/luci/labo\\_termo/Vuoto\\_parte3.pdf](http://www.roma1.infn.it/people/luci/labo_termo/Vuoto_parte3.pdf)
- [21] [http://it.wikipedia.org/wiki/Pompa\\_a\\_vuoto](http://it.wikipedia.org/wiki/Pompa_a_vuoto)