

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | Università degli Studi di Udine |  |
|  | Facoltà di Ingegneria |  |

###### Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

# Dipartimento di Ingegneria CIVILE ED ARCHITETTURA

# Tesi di Laurea

***Simulazione della colata in conchiglia a bassa pressione***

***di leghe di rame***

|  |  |
| --- | --- |
| **Relatore** | Laureando |
| **Prof. Fabio Miani** | **Paolo Lizier** |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **ANNO ACCADEMICO 2011/2012** |  |

**SOMMARIO**

Il seguente elaborato vuole sottolineare come la simulazione del processo di colata in conchiglia a bassa pressione sia un elemento fondamentale per la determinazione finale dei particolari prodotti attraverso questa tecnica che, per altro, procura ottime caratteristiche meccaniche ed elevata qualità.

Lo studio oltre che individuare e seguire alcuni esempi pratici, fornisce delle linee guida su quella che nell’insieme è una modellazione completa, analizzando tutte le possibili variabili che intervengono. Si arriva al risultato evidente che dimostra l’importanza dell’affiancamento di software di simulazione in quelle che sono le fasi di processo che conducono a migliorare il prodotto finale.

Nel concreto questa tesi si apre con una breve ma significativa introduzione delle caratteristiche generali delle lavorazioni per pressofusione compresa la colata in conchiglia a bassa pressione. Di seguito in maniera completa vengono descritte le principali leghe di rame con relative caratteristiche, mirate nella sostanza all’utilizzo delle stesse nei processi di pressofusione e colata. Successivamente viene trattato in maniera particolareggiata il processo di colata a bassa pressione motivando, con una specifica parte dedicata, anche scelta e caratteristiche di macchine e processo.

Segue, nella parte centrale del lavoro, un’introduzione alla simulazione del processo per poi entrare nello specifico, con i due capitoli principali del corpo della tesi, a sviluppare in sostanza tutte le possibili variabili simulabili del processo, individuando con il software alcune elaborazioni. Ci si concentra in seguito ad esaminare le operazioni di simulazione senza trascurare eventuali confronti tra dati elaborati con diversi software e tra diverse tecniche entrate in uso comune per il supporto alla buona riuscita del prodotto finale.

Chiude l’elaborato un analisi tecnica delle varie possibilità di simulazione che valuta accorgimenti, migliorie e fornisce un quadro generale sulla praticità effettiva di questo tipo di sperimentazione che si riscontra nella realtà. Il lavoro termina con le relative osservazioni finali.

**INDICE**

|  |  |
| --- | --- |
| 1. **INTRODUZIONE** 2. **LA PRESSOFUSIONE**    1. **Introduzione alla pressofusione**    2. **Processo di pressofusione**       1. **Macchine da pressofusione**    3. **Principali leghe da pressofusione**    4. **La pressofusione a bassa pressione**    5. **Evoluzioni delle pressofusione** 3. **IL RAME E LE SUE LEGHE**    1. **Il rame**       1. **Proprietà del rame**       2. **Impieghi del rame**    2. **Le leghe di rame**       1. **Colabilità e suoi parametri delle leghe di rame**          1. **Colabilità del bronzo**          2. **Colabilità dell’ottone**             1. **Ottoni da colata al piombo**          3. **Colabilità dei cuprallumini**          4. **Colabilità della lega rame argento** 4. **PROGETTARE E SIMULARE PER PRESSOFUSIONE A BASSA PRESSIONE**    1. **Progettazione della conchiglia**       1. **La conchiglia**       2. **Materiali per la conchiglia**          1. **Le leghe di nickel berilio**    2. **Progettazione del canale di colata**    3. **Simulazione delle fasi della colata con software 3D**       1. **Il riempimento**       2. **La solidificazione**       3. **Le sollecitazioni** 5. **SIMULAZIONE DEI PARAMETRI FISICI**    1. **Il coefficiente di scambio termico**       1. **Creazione di modelli di scambio termico**       2. **Algoritmo inverso e metodo di stima non lineare del coefficiente di scambio termico interfacciale equivalente**       3. **Misura della temperatura durante il processo di solidificazione**       4. **Calcolo del coefficiente di scambio termico interfacciale**          1. **Condizioni al contorno**          2. **Discussione dei risultati calcolati**    2. **La viscosità**       1. **Viscosità al punto di fusione**       2. **Dipendenza della viscosità dalla temperatura**       3. **Dipendenza della viscosità dalla composizione**          1. **Lega Cu-Zn**    3. **Modelli di cinetica termodinamica per la simulazione della solidificazione nelle leghe binarie di rame e calcolo delle proprietà termo fisiche**       1. **Descrizione del modello teorico per leghe di rame**       2. **Strategie di calcolo e descrizione dei modelli**       3. **Calcolo delle proprietà termo fisiche**           1. **Entalpia**          2. **Conduttività termica**          3. **Densità**       4. **Risultati di calcolo**          1. **Movimento d’interfaccia di fase durante il raffreddamento**          2. **Entalpia, densità e frazioni di fase**          3. **Effetti della velocità di raffreddamento sui diagrammi di stato**          4. **Valutazione delle proprietà**          5. **Simulazione di solidificazione della lega Cu-Zn**          6. **Confronto tra simulazioni ed analisi di un caso reale**             1. **Valutazione dell’attendibilità della simulazione con software Pandat**             2. **Simulazione del problema reale oggetto di studio**             3. **Analisi visiva del problema reale**             4. **Soluzioni proposte** 6. **ANALISI PER L’OTTIMIZZAZIONE DELLA SIMULAZIONE**    1. **Metodi di valutazione per l’ottimizzazione della scelta dei materiali**       1. **Ottimizzazione nella scelta delle proprietà delle leghe di rame da pressofusione**       2. **Ottimizzazione nelle scelta delle proprietà dei materiali da conchiglia**       3. **Ottimizzazione nella scelta delle proprietà dei materiali per le anime**    2. **Ottimizzazione della sperimentazione pratica**    3. **Ottimizzazione delle fasi di solidificazione**       1. **I difetti**       2. **Minimizzazione dalla porosità da gas**       3. **Minimizzazione della formazione di ossidi**       4. **Eliminazione delle porosità da ritiro**    4. **Ottimizzazione del riempimento di uno stampo a più impronte**    5. **Durata delle attrezzature per una produzione di presso colata**    6. **Sistema di provini per lo studio di microstruttura e comportamento meccanico delle leghe presso colate**    7. **Simulazione del processo per la riduzione delle tensioni**    8. **Sviluppo ottimizzato del componente attraverso la simulazione del processo** 7. **ANALISI DELLA SIMULAZIONE**    1. **Miglioramento dei parametri di processo**    2. **I materiali delle attrezzature**    3. **Confronto tra porosità misurata e simulata**    4. **Considerazioni sulle tensioni residue**    5. **Verifiche dei risultati simulati** 8. **CONCLUSIONI**   **BIBLIOGRAFIA** | Pag.1  Pag.3  Pag.3  Pag.5  Pag.6  Pag.7  Pag.7  Pag.12  Pag.16  Pag.16  Pag.17  Pag.18  Pag.21  Pag.27  Pag.30  Pag.33  Pag.35  Pag.36  Pag.40  Pag.41  Pag.42  Pag.44  Pag.46  Pag.48  Pag.50  Pag.51  Pag.53  Pag.54  Pag.55  Pag.57  Pag.57  Pag.57  Pag.57  Pag.58  Pag.59  Pag.61  Pag.62  Pag.63  Pag.63  Pag.64  Pag.64  Pag.65  Pag.67  Pag.67  Pag.69  Pag.70  Pag.70  Pag.71  Pag.71  Pag.72  Pag.72  Pag.74  Pag.77  Pag.79  Pag.81  Pag.82  Pag.82  Pag.83  Pag.84  Pag.85  Pag.86  Pag.86  Pag.86  Pag.88  Pag.89  Pag.90  Pag.91  Pag.95  Pag.97  Pag.98  Pag.99  Pag100  Pag101  Pag102  Pag103  Pag103  Pag105  Pag106  Pag106  Pag107  Pag.108  Pag.109  Pag110  Pag112 |

**1. INTRODUZIONE**

Questo lavoro di tesi è una parte di un progetto che mira ad implementare l’uso della simulazione di colata nella produzione di getti di leghe di rame, principalmente bronzi ed ottoni. Lo scopo fondamentale è di verifica dei risultati ottenuti tramite software di modellazione già in uso comune, e di effettuare eventualmente un miglioramento sull’accuratezza degli elaborati finali.

La simulazione del processo di colata in conchiglia a bassa pressione per mezzo di software specifici, è basata sul metodo a volumi finiti FVM comparabile alla tecnica agli elementi finiti FEM. L’eleborazione inizia con la definizione del getto disegnato tramite programmi CAD-3D, questi poi forniscono ai software di simulazione l’adatta costruzione geometrica attraverso un formato riadattabile che la suddividerà in un numero di elementi appropriati per mezzo della costruzione di una struttura detta mesh.

Nello specifico dunque, le analisi simulate vengono effettuate per migliorare il processo di produzione oltre che aiutare ed impostare studi futuri. Più la simulazione della colata diventa di uso comune nelle aziende, più i tempi di calcolo per le simulazioni saranno ridotti. L’implemento e lo sviluppo dell’informatica, ha reso possibile un aumento di precisione delle simulazioni stesse, così che oggi si possa tener conto di ogni piccolo dettaglio dei processi di colata e mantenere i tempi di elaborazione ridotti. Durante gli ultimi anni, grazie al miglioramento delle potenzialità dei calcolatori,inoltre, il numero di volumi finiti utilizzati dal software nella simulazione è cresciuto esponenzialmente portando ad numero maggiore di elementi nella geometria della mesh ed a una maggiore accuratezza della simulazione.

L’affidabilità delle simulazioni dipende dalla precisione dei dati preliminari, è dunque importante che i valori dei parametri fisici dei materiali utilizzati nei modelli di simulazioni siano corretti. In virtù di questo va sottolineato che una modellazione errata, come una incompleta, è conseguenza di forvianti risultati. Spesso, questo significa che alcuni dei parametri necessitano di essere determinati o verificati. I programmi di simulazione forniscono un database delle proprietà per diversi materiali e leghe, tuttavia includono soltanto i materiali più comunemente utilizzati. Senza dati iniziali disponibili per viscosità, tensione superficiale e coefficiente di scambio termico, il software come detto può fornire, per poi utilizzare, un’approssimazione degli stessi. Altri parametri e valori di processo vengono individuati direttamente in fonderia.

La simulazione di un processo di colata a bassa pressione può essere divisa al suo interno in tre principali livelli tali da permettere di simulare diversi fattori e poter realizzare considerazioni finali su quello che è il quadro generale del processo. Riempimento, solidificazione e valutazione delle sollecitazioni sono i tre principali campi di una simulazione completa. I primi due sono di gran lunga più comuni, mentre la stima delle sollecitazioni comprende la simulazione di tensioni e deformazioni. Essa viene fatta con molta più cautela e solamente su richieste specifiche in quanto i moduli di simulazione per i programmi sono costosi e richiedono oltre che molta potenza al calcolatore, elevate competenze nella creazione della simulazione e nell'interpretazione dei risultati.

Il lavoro, oltre a ciò descritto, sviluppa una completa analisi di quelle che sono le potenzialità che un software di simulazione mette a disposizione, valutando nello specifico i fondamentali passaggi di individuazione di eventuali difetti con relativa correzione e di possibili varianti del modello iniziale che, nel complesso, forniscono una soluzione globale di tutto il processo.

**2. LA PRESSOFUSIONE**

La pressofusione è un processo di fusione tecnicamente giovane che permette la trasformazione dei metalli in manufatti per mezzo di colata. La relativa tecnologia, figlia di un arte antichissima e già nota agli egizi, si è sviluppata nei secoli attraverso diverse metodologie: fusione in terra, fusione in conchiglia a gravità, pressofusione e sue evoluzioni.

La fusione in conchiglia è uno dei metodi più antichi di colata in stampo metallico ed è il predecessore diretto della pressofusione. Nella colata in conchiglia il metallo, riscaldato a temperatura poco più alta di quella di fusione, viene colato per gravità nella forma metallica, ove solidifica rapidamente. Il contatto del metallo con le pareti metalliche della conchiglia, che viene appositamente lubrificata e pulita periodicamente, consente di ottenere prodotti anche con superfici lisce. La fusione in conchiglia permettere la produzione di getti in serie medio grandi con buoni ritmi produttivi, alta finitura superficiale, ottima compattezza ed elevate caratteristiche meccaniche.

**2.1. Introduzione alla pressofusione**

Pressofusione, è l’abbreviazione di fusione in conchiglia sotto pressione ed è il sinonimo di pressocolata. Il processo industriale di fonderia in forma permanente, conduce il metallo fuso iniettato a pressione in uno stampo metallico e lo mantiene a tale pressione per un tempo di raffreddamento sufficiente. Questo processo apparve per la prima volta negli Stati Uniti verso la seconda metà dell’Ottocento, tuttavia soltanto dopo la prima metà del Novecento ha avuto gli sviluppi più significativi.

La pressofusione o pressocolata è una tecnica relativamente moderna ed ha avuto un evoluzione molto rapida. È uno dei processi di colata in conchiglia o forma permanente ed è spesso il mezzo più rapido ed economico per trasformare metalli in oggetti aventi un elevato grado di finitura. L'evolversi della pressofusione è stata determinata dal modello di sviluppo della nostra società, rivolto alla produzione di beni di consumo in grandi e grandissime serie. Trova applicazione in tutti i campi di fabbricazione di prodotti ed apparecchiature complesse che si avvalgono di componenti metallici non ferrosi, anche se in tempi recenti si è tentato di produrre per pressofusione anche manufatti in leghe ferrose con scarsi risultati. Negli ultimi anni sono stati condotti molti esperimenti in merito e vi sono tuttora alcuni impianti per la pressofusione di acciaio inossidabile in America. Lo sviluppo della pressofusione di leghe ferrose è tuttavia frenato da difficoltà connesse alle elevate temperature richieste dalla fusione delle stesse, elemento questo che comporta un'insoddisfacente durata ridotta degli stampi co conseguenti costi.

Le attrezzature necessarie alla produzione dei pezzi pressofusi sono specifiche dei processi e sono le macchine di pressofusione o, più semplicemente, presse, che come anche gli stampi veri e propri, sono caratterizzate da elevati costi. Gli investimenti su queste macchine sono fattori che determinano alti costi di ammortamento, i quali diventano via via meno incidenti con la realizzazione di numeri crescenti di pezzi dello stesso tipo e prodotti in sere. La fabbricazione di pezzi pressofusi è dunque economicamente valida e conveniente quando le serie da produrre sono dell'ordine minimo delle decine di migliaia di pezzi. Il contenimento dei costi è legato alle cadenze di produzione, per cui le macchine sono spesso corredate di varie attrezzature atte ad automatizzare e meccanizzare il processo, quali robot per il prelievo dei pezzi, dispositivi per la lubrificazione automatica delle cavità dello stampo ed altri. Un ruolo determinante nel contenimento dei costi e per conseguire buona qualità viene svolto dallo stampo, questo infatti deve essere progettato, costruito e utilizzato per ottenere le cadenze di produzione previste. Risultati soddisfacenti si possono ottenere soltanto possedendo tecniche approfondite nei vari settori, basate su rigorosi fondamenti scientifici, quindi sulla conoscenza ed il dominio di varie discipline. Per la realizzazione pratica di nuovi pezzi, nuovi stampi e nuove macchine e attrezzature, sono determinanti infatti esperienza, sensibilità, intuito, creatività e capacità pratiche. Gli elementi che concorrono e interagiscono nel processo per ottenere risultati finali uniformi su grandi e grandissime serie debbono essere quindi strettamente controllati nei loro valori ed è necessario che le variabili interessate siano il più possibile rese costanti. Tali fattori sono molteplici e di varia natura come fisico-chimica, metallurgica, termica, meccanica (cinematica e dinamica), idraulica, inoltre tutti questi fattori che debbono essere fra di loro armonizzati per la riuscita dei pezzi. Il processo nel suo insieme e le macchine utilizzate, sono da sempre sotto esame ed in continua evoluzione, ma già ad oggi si hanno numerosi vantaggi che questo lavoro di tesi ad evidenzierà nel loro specifico anche più di qualche volta, tra questo:

* velocissimo riempimento della cavità dello stampo;
* alimentazione compensativa del ritiro di solidificazione;
* perfetto e totale riempimento della cavità dello stampo;
* conferimento al pezzo di una struttura cristallina fine.

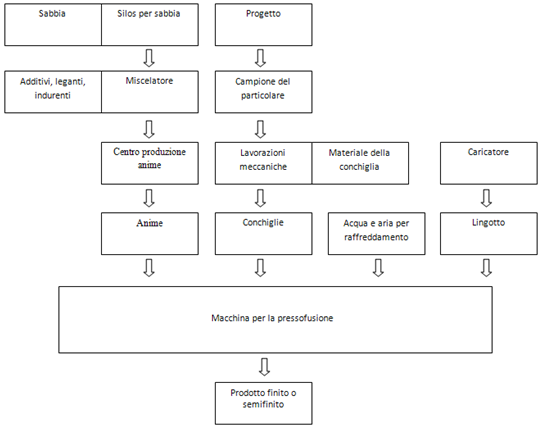
Altri importanti caratteristiche e proprietà conformi alle specifiche di fabbricazione richieste al fornitore e tipiche del processo sono:

* elevati standard di qualità;
* geometrie complesse;
* spessori minimi;
* tolleranze dimensionali ristrette;
* minimi sovrametalli;
* elevate finiture superficiali.

Tutte queste richieste tendono ad aumentare progressivamente nella loro qualità, e ciò implica l'impiego di mezzi di produzione ogni giorno più sofisticati oltre che maggiori conoscenze delle tecnologie e delle tecniche operative del processo da parte di progettisti, costruttori di stampi, tecnici metodisti ed operatori. Il processo della pressofusione è stato in quest'ultimo decennio oggetto di indagini, studi e sperimentazioni finalizzati all'esame delle condizioni di riempimento della cavità dello stampo e delle influenze di detto riempimento sulla riuscita del getto. Si è cercato di fare anche studi paralleli e stabilire correlazioni fra caratteristiche meccaniche e tecnologiche dei pezzi e condizioni di stampaggio, così da poter individuare delle regole matematiche capaci di conferire al processo di pressofusione un carattere scientifico al pari di qualunque altro procedimento industriale.

**2.2. Processo di pressofusione**

Nel processo di pressofusione la forma è chiamata stampo o conchigla ed è costituito da due semi-stampi generalmente di acciaio o ghisa, per cui i metalli utilizzati nel processo saranno tutti i materiali che fondono a temperature minori, come leghe di alluminio, zinco e magnesio. La pressione di iniezione va da 2 a 150MPa a seconda dei casi, essa viene mantenuta per tutta la durata del processo sino ad avvenuta solidificazione, mentre le presse idrauliche garantiscono la chiusura dello stampo anche ad elevate pressioni di esercizio. A permettere il raffreddamento del pezzo, vi è un sistema di circolazione di liquido all’interno dello stampo. Una volta solidificato il metallo, le presse aprono i due stampi in modo che il pezzo possa essere prelevato. Un diagramma base di una linea di produzione per la pressofusione in conchiglia è presentato di seguito (Figura 2.1).



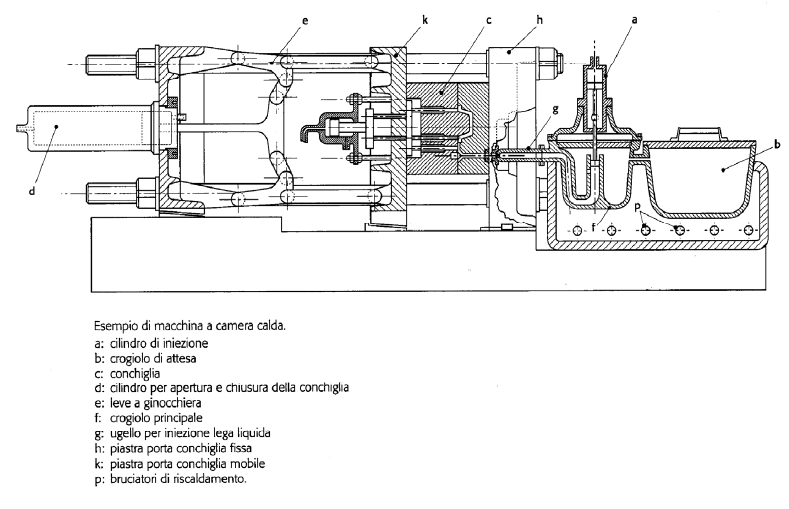
**Figura 2.1**. Schema base di una linea di produzione per la pressofusione in conchiglia.

**2.2.1. Macchine da pressofusione**

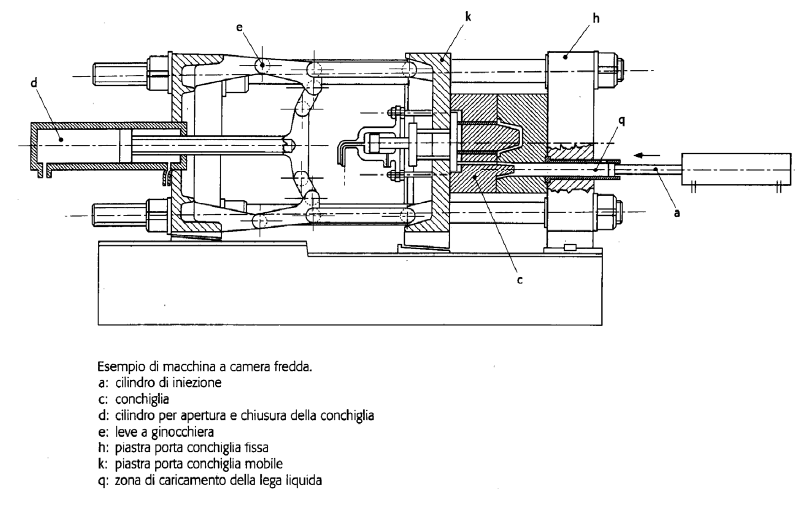
Le macchine per la pressofusione sono movimentate da energia idraulica tramite pistone oleodinamici con sistema a ginocchiera per garantire la resistenza alla spinta metallostatica. I pistoni sono mossi da energia che viene conferita al fluido mediante pompe azionate elettricamente. Il sistema di chiusura-apertura è guidato da quattro colonne fisse. Le presse più diffuse si diversificano in base al sistema di iniezione della lega all’interno della macchina stessa, si individuano quindi: “*macchine a camera calda”* e *“macchine a camera fredda*”.

Nelle *macchine a camera calda* (Figura 2.2), (iniettofusione) la pressione di mantenimento è più bassa rispetto alla camera fredda e va dai 2 ai 15MPa. In queste macchine il forno fusorio è integrato, fa parte della macchina, ed il dispositivo d'iniezione è collocato nel crogiolo. La produttività è altissima, anche 1000 pezzi/ora per articoli di piccole dimensioni. Il crogiolo, scaldato da un forno con bruciatore, contiene il metallo fuso che attraverso un foro viene aspirato dal pistone entro la camera d'iniezione e di qui viene compresso nella conchiglia attraverso un iniettore. Queste macchine possono avere oltre al sistema di inietto fusione a pistone tuffante anche un sistema di inietto fusione a camera di compressione con gas in pressione, o un sistema con camera di pressione oscillante ove la camera si riempie basculando. La conchiglia è costituita da uno stampo fisso e da uno stampo mobile scorrevole entro perni di guida e che quindi può essere rimosso con sistemi oleodinamici per permettere l'espulsione del getto solidificato. La conchiglia deve essere progettata in modo che, dopo l'apertura, il getto sia trattenuto dalla parte mobile e possa essere rimosso solo con l'azione di estrattori. Questi sono perni disposti entro fori ricavati nella conchiglia e comandati da molle che, all'apertura della conchiglia, provocano l'espulsione del getto. Il processo a camera calda, grazie alla presenza della fornace integrata, garantisce un miglior controllo della temperatura di esercizio ad elevati ritmi produttivi, infatti il prelievo diretto dal serbatoio rende il processo più veloce ed inoltre, considerate le maggiori dimensioni del serbatoio, la lega risulterà più uniforme come composizione e temperatura rispetto a quella trattata in camera fredda, con conseguente struttura del prodotto più omogenea. Per contro la temperatura del processo non potrà essere troppo elevata per non compromettere la produttività del sistema, evitando quindi tempi lunghi di raffreddamento. Le parti a contatto con il metallo fuso inoltre tendono ad usurarsi, per questo è indicata per leghe che presentano basso punto di fusione (<600°C) come zinco e piombo.

Nelle *macchine a camera fredda* (Figura 2.3), (pressofusione) la pressione di mantenimento è più alta rispetto alla camera calda e va dai 15 ai 150MPa. La seconda differenza consiste nel fatto che in queste macchine il forno fusorio ed il crogiolo sono separati dalla macchina. La produttività si aggira tra i 20 ed i 200 pezzi/ora. La camera d'iniezione delle macchine a camera fredda è collegata direttamente alla parte fissa della conchiglia, il materiale fuso viene introdotto di volta in volta dall'operatore nella camera d'iniezione attraverso un apposito foro. L'azione del pistone, comandato da sistema oleodinamico o idraulico, comprime infine il materiale fuso entro la cavità della conchiglia. Anche in questo caso la conchiglia può essere aperta per rimuovere il getto mediante estrattori. Il processo a camera fredda presenta un minor controllo di temperatura del getto liquido ed una produttività minore. Visti i tempi maggiori dovuti all’inserimento del metallo fuso e soprattutto alla temperatura di esercizio decisamente maggiore, rispetto alla camera calda si perde capacità produttiva di processo e si recupera in flessibilità dei materiali utilizzati. Le macchine a camera fredda sono indicate per leghe di alluminio e rame con temperature di fusione di 650-700°C per Al, e di 1000-1100°C per Cu.



**Figura 2.2**. Macchina per pressofusione a camera calda.



**Figura 2.3**. Macchina per pressofusione a camera fredda.

A seconda della macchina per colata la conchiglia può essere a sezione verticale od orizzontale. Il sistema di funzionamento di entrambi i tipi di è simile, cambia soltanto la struttura della conchiglia. Nelle macchine a sezione verticale, quelle descritte nelle figure precedenti, solitamente entrambe le sezioni della conchiglia sono mobili per mezzo di un manipolatore. La linea di sezione della conchiglia orizzontale consente alla metà inferiore di essere fissa e posta sopra la fornace, con la metà superiore mobile per il carico.

Nelle macchine a sezione verticale, la conchiglia è mossa attraverso due diverse posizioni, fornace e stazione di preparazione. Nella zona di preparazione, la conchiglia è preparata immergendo le mezze conchiglie in acqua di grafite per controllare la temperatura dell’intero stampo e per aggiungere uno strato di grafite sulle cavità dello stesso. Dopo l’immersione, vengono aggiunte le anime e la conchiglia viene chiusa e sistemata nella fornace per il riempimento di metallo fuso. Una volta che la conchiglia è accuratamente posizionata sopra il canale di alimentazione del metallo liquido, la macchina per colata inizia ad aumentare la pressione nella camera a pressione della fornace, in tale modo il metallo fuso viene forzato attraverso i canali di risalita sino all’interno della conchiglia. Il canale di risalita si estende in modo tale da assicurare che il metallo di riempimento dello stampo sia libero da film di ossido ed inclusioni. La macchina di colata regola la pressione all'interno della camera chiusa secondo una curva di pressione predeterminata. Dopo che lo stampo ha terminato il riempimento, la pressione viene mantenuta per un tempo sufficiente tale che il metallo abbia tempo per solidificare all'interno dello stampo. Il tempo necessario di mantenimento alla pressione finale è diverso per ogni diversa colata. Un fattore che sottolinea l’ottima progettazione di queste macchine, indirizzata al miglioramento del processo nel suo complesso, è che la pressione viene mantenuta in modo tale che il metallo fuso nell’iniettore non sia completamente solidificato, in questo modo una quantità minima di metallo freddo viene restituito al forno quando la pressione viene ridotta. Ad avvenuta rimozione della pressione dall’interno della fornace, se il processo non è automatizzato, la conchiglia viene riportata alla stazione di preparazione, dove viene aperta e l’oggetto metallico ricavato viene rimosso mediante perni di espulsione o dall'operatore o dalla macchina stessa se automatizzato. A questo punto a seguito di una preventiva pulizia della conchiglia, il ciclo può ricominciare dal principio.

Nelle macchine con conchiglia a sezione orizzontale, il ciclo è generalmente lo stesso. La differenza sostanziale sta nel fatto che le semi conchiglie non vengono immerse per il controllo della temperatura ed il riscaldamento richiesto come i canali di raffreddamento sono integrati nello stampo. La temperatura della conchiglia può essere controllata con maggiore precisione, per esempio, è possibile iniziare il raffreddamento della conchiglia in alcune zone anche durante il ciclo di colata. Le macchine di colata con stampi a sezione orizzontale, attraverso termocoppie situate all’interno della struttura della conchiglia, hanno di gran lunga maggiori probabilità di essere controllate sia per quanto riguarda distribuzione del calore della colata che del suo raffreddamento. La ragione di questo è che la strumentazione può essere inserita adiacente ai canali di raffreddamento dello stampo.

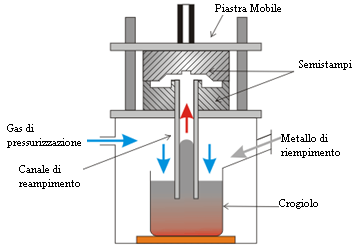
**2.3. Principali leghe da pressofusione**

Le leghe da pressofusione possono essere ferrose o non ferrose, solitamente il processo è utilizzato per quelle non ferrose in quanto hanno temperatura di fusione minore. Le leghe leggere sono quelle maggiormente utilizzate, tra queste distinguiamo:

* Le leghe di rame: presentano buona conducibilità elettrica e termica, buona resistenza a corrosione ed all’usura; sono per questo utilizzate molto in cuscinetti e guarnizioni. Le leghe a base di rame come l’ottone, hanno elevate applicazioni anche nel settore della componentistica idraulica come valvole, rubinetti e corpi per strumenti di misurazione. Non va dimenticato il bronzo, lega di rame storica nel vero senso del termine.
* Le leghe d’alluminio sono le più utilizzate nelle tecniche di pressofusione a bassa pressione. Alcune delle più comuni applicazioni sono rappresentate da componenti per l’industria automobilistica come blocchi motore (precedentemente fatti in ghisa per smorzare la vibrazioni), ruote (cerchi in lega) e nei componenti delle sospensioni. Molto utilizzate anche in aeronautica.
* Le leghe di magnesio: sono leghe leggere con buona resistenza alla corrosione.
* Le leghe di zinco: hanno buona fluidità (zama).

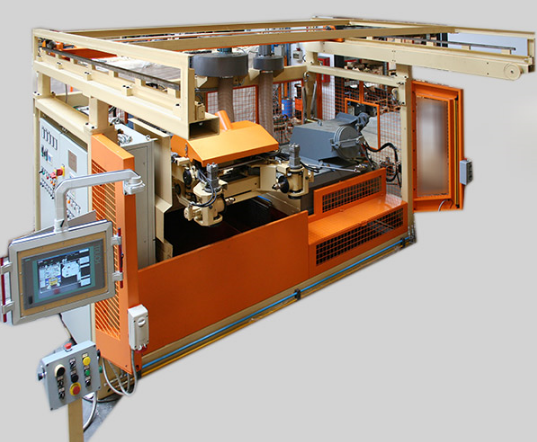
**2.4. La pressofusione a bassa pressione**

Viene utilizzata sin dalla prima metà del ventesimo secolo. È comunemente una tecnica di produzione per grandi volumi, ottima qualità e fornisce ai componenti delle leghe alta integrità anche nei i metalli non ferrosi come alluminio, magnesio e per molte leghe di rame. È tipicamente caratterizzata da macchine ad asse verticale con fornace posizionata nella parte bassa della macchina ad iniezione in sorgente a bassa pressione. I prodotti ottenuti sono di qualità buona, tuttavia leggermente inferiore rispetto quelli prodotti con sistemi di pressofusione ad alta pressione proprio a causa delle pressioni inferiori. Lo stampo viene riempito di metallo proveniente da un crogiolo posto sotto pressione tipicamente dell’ordine dei 0,7 bar. La pressofusione a bassa pressione è particolarmente adatta per la produzione di componenti simmetrici rispetto ad un asse di rotazione come ruote automobilistiche in lega leggera. Espulsione, operazioni di chiusura ed apertura degli stampi, raffreddamento ed operazioni di pressurizzazione sono controllate con PLC e relative valvole di pneumatiche attraverso un software che segue il grafico di pressurizzazione per macchine da pressofusione in bassa pressione (Figura 2.4).



**Figura 2.4**. Schematizzazione del funzionamento della pressione a bassa pressione.

Le macchine per la pressofusione a bassa pressione (Figure 2.5a e 2.5b) sono altamente automatizzate e solitamente richiedono soltanto un operatore per macchina che ha il compito di far attenzione alla partenza del ciclo di colata, controllare le colate ed inserire eventuali anime. A seconda della struttura della conchiglia, l’operatore può anche essere responsabile della rimozione del metallo solidificato dalla conchiglia. Idealmente i parametri di processo possono essere stabiliti prima che la conchiglia venga utilizzata in fase di produzione attraverso simulazioni, ma spesso gli operatori sono anche responsabili, se necessario, dell’aggiustamento di questi stessi parametri.



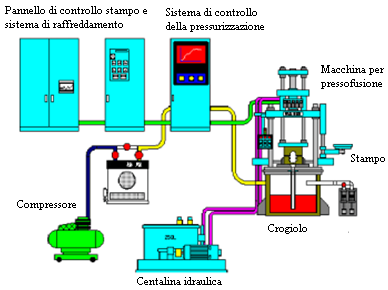
**Figura 2.5a**. Macchina compatta per pressofusione in conchiglia a bassa pressione.



**Figura 2.5b**. Macchine per pressofusione in conchiglia a bassa pressione.

Questa tecnica di colata è adatta alla produzione di diverse tipologie di componenti per medio-grandi lotti di produzione in quanto occorre ovviare agli elevati costi di investimento, nei quali è richiesta una qualità di colata è importante.

Uno dei principali vantaggi di questo processo è l’elevato controllo del riempimento delle cavità della conchiglia, inoltre va sottolineato che nelle curve del condotto si ha passaggio e riempimento di metallo fuso senza moto turbolento. L’andamento infatti risulta essere il più laminare da ottenere con questi processi. Il risultato finale è che migliorano le proprietà meccaniche per il 5-6% se comparate con le produzioni delle simili tecniche di colata a gravità per le stesse leghe. Una delle ragioni del miglioramento delle proprietà meccaniche è la scarsità di formazione dei film di ossidi, ciò è il risultato del riempimento lento e laminare della lega fusa nelle cavità. La presenza di film ossidati è ulteriormente ridotta dal fatto che la lega fusa è forzata ad entrare nella conchiglia ed arriva direttamente dalla fornace. I film ossidati si trovano più frequentemente sulla superficie del metallo fuso nella parte superiore della fornace. Con questo metodo gli ossidi da questa fonte sono totalmente eliminati e si mantiene un elevato controllo del riempimento che porta di conseguenza ad una basso tasso di rifiuto/scarto. Un altro significativo vantaggio del processo è che il maggior volume che occupa la lega fusa della colata può essere minimizzato con un corretto studio della colata. Risulta evidente quindi, che i sistemi di colata vengano progettati in modo che i movimenti di solidificazione del metallo fuso avvenga dal punto più lontano del particolare da produrre sino ai sistemi di entrata, eliminando inoltre completamente il metallo in eccesso. La scarsità di sovrametallo fuso migliorerà la resa delle colate significativamente ed abbasserà anche i costi di produzione delle colate con conseguente minor richiesta di lavoro per la pulizia di bave da colata. È utile a riferimento di quanto detto introdurre una schema di funzionamento di un impianto per pressofusione a bassa pressione (Figura 2.6).



**Figura 2.6**. Schematizzazione di un impianto per pressofusione in conchiglia a bassa pressione.

Il motivo per il quale la pressofusione a bassa pressione è una delle migliori tecniche per le fusioni di leghe di rame, vedi l’ottone per componenti per settore idraulico come valvole e rubinetti, è che la tecnica consente anche forme complicate sia interne che esterne. Queste sono possibili da ottenere con l’uso di anime in sabbia. Larghe quantità di oggetti d’ottone colati subiranno poi finiture superficiali attraverso lavorazioni di rettifica, lucidatura e rivestimenti come cromatura o placcatura. I pressofusi a bassa pressione forniscono anche l’alta qualità di colata che è richiesta a questi componenti. Lo svantaggio principale, che è causa del lungo processo di produzione, gli errori si possono trovare soltanto a fine processo e ciò risulta comprensibilmente un costo. Con una corretta progettazione dalla conchiglia ed un buon controllo del processo, tuttavia gli errori originati nei vari livelli del processo di colata possono essere minimizzati.

**2.5. Evoluzioni della pressofusione**

Sebbene la pressofusione a bassa pressione sia una delle più affidabili tecniche di colata per l’elevata qualità del prodotto ci sono alcuni settori con notevole range di miglioramento e quindi oggetto di indagini e cospicui studi. Una delle principali fasi di studio e sperimentazione con ottimo margine evolutivo a causa di alcune problematiche, è l’insufficienza di controllo della colata e del riempimento della conchiglia. Spesso per intervenire direttamente sul problema si agisce sui tempi, aumentandoli, per migliorare il processo. Nonostante quindi i tempi più elevati di riempimento facciano crescere il tempo di ciclo, i benefici finali superano questo handicap. Il lavoro di ricerca sull’argomento è valso finora a stabilire, a grandi linee, alcuni valori tipici delle grandezze in gioco, ma ancora molto resta da fare. Spesso, infatti, si presentano numerose difficoltà in quanto l'entità di alcune di queste variabili è legata alla figura geometrica del pezzo. La sperimentazione ha tuttavia permesso un notevole progresso nella costruzione delle macchine di pressofusione, specialmente per quanto riguarda la parte di iniezione. Oggi si può disporre di macchine che facilitano molto l'ottenimento di buoni getti pressofusi.

Obbiettivo fondamentale per le pressofonderie è la ricerca del massimo della qualità senza costi aggiuntivi, in altre parole aumentare la produttività. Questo risultato può essere ottenuto tramite l’utilizzo di macchine automatizzate particolarmente veloci. Una macchina veloce permette oltre che un’elevata produttività anche dei benefici di qualità grazie alla cadenza regolare determinata dall’automazione. I movimenti macchina (chiusura apertura del piano mobile, estrazione) hanno già raggiunto velocità molto elevate che difficilmente possono aumentare a causa dei limiti quali l’indebolimento della macchina stessa per urti o vibrazioni con conseguente perdita di affidabilità. Particolare attenzione viene prestata alla fase di versamento del metallo liquido nel contenitore. Il tempo di ciclo di una macchina è principalmente influenzato dal tempo di solidificazione del getto e dal tempo di lubrificazione dello stampo. In questa fase viene applicato un film che favorisce il facile distacco del getto durante l’estrazione e con una doccia d’acqua si provvede al raffreddamento della superficie dello stampo. Quando si vogliono raggiungere cadenze estreme tali tempi vanno ridotti al minimo, di conseguenza il circuito di termoregolazione dello stampo deve venire espressamente progettato, questo, rappresenta uno dei punti critici al fine di raggiungere un basso tempo di ciclo. La testata del lubrificatore dello stampo deve essere progettata in modo ottimale seguendo la mappatura tecnologica di lubrificazione e termica dello stampo stesso. Per ridurre ulteriormente i tempi si utilizzano robot di carico, per l’estrazione del getto ed anche per la lubrificazione, tutto ciò deve essere sincronizzato per mezzo di software di gestione della macchina.

Sotto la spinta delle esigenze di qualità e produttività sono state elaborate e realizzate già ad oggi nuove metodologie e sistemi pressofusori tra cui:

* Automatizzazione delle macchine (Figura 2.7): il processo di pressofusione viene gestito completamente da due robot. Un primo viene utilizzato per lo scarico ed il controllo dei getti prodotti. Dopo la fase di pressofusione, il robot preleva il getto, ne controlla l’integrità a mezzo di sensori ad infrarosso, poi lo deposita nella torre di raffreddamento ad aria forzata con ventilatori centrifughi. La lubrificazione dello stampo viene realizzata per mezzo di un altro robot spray che garantisce la massima rapidità e precisione seguendo il disegno dello stampo così da garantire una lubrificazione ideale in tempi ridotti. Grande beneficio deriva dall’utilizzo della centralina della “Jet cool” o “superfreddo” che provvede a raffreddare con acqua pressurizzata fino a 120 bar le spine dello stampo con dimensioni ridottissime fino a 4mm di diametro esterno, evitando  così i negativi fenomeni di metallizzazione. Alla fine di ogni ciclo di raffreddamento un passaggio di aria forzata pulisce i piccoli passaggi in modo da garantire il corretto svolgimento delle operazioni.



**Figura 2.7.** Macchina per pressofusione automatizzata con robot.

* Acurad: riempimento lento della cavità dello stampo;
* Sotto vuoto: iniezione con contemporanea aspirazione dell'aria contenuta nella cavità. Senza il vuoto l’aria normalmente presente ed i gas prodotti dal metallo liquido nella camera di iniezione e nelle cavità dello stampo, sono difficilmente espulsi per la quasi totalità dallo stampo. Questo comporta una serie di problematiche quali la produzione di pezzi con porosità interne (inglobamento di aria e gas di fusione). Le porosità interne riducono la resistenza meccanica del pezzo specialmente quando sono “sottopelle” cioè vicino alla superficie del pezzo. Queste poi durante le lavorazioni meccaniche o di finitura, diventando visibili ad occhio nudo;
* Centrifuga: si sottopone il metallo fuso a forze centrifughe all’interno di una conchiglia rotante per produrre getti di forma anulare o tubolare senza utilizzo di anime, la densità del getto risulta uniforme ed eventuali disuniformità si manifestano sulla superficie interna della cavità dove generalmente sono accettabili;
* Vacural: iniezione con lega aspirata dal forno.
* Tixocasting: riempimento della cavità con materiale semisolido. Le macchine di pressocolata (Figura 2.8) che sfruttano questa proprietà del materiale devono essere dotate di un’iniezione adatta a lavorare con un materiale in forma semisolida, quindi con una corsa maggiorata compatibile con la lunghezza della billetta e con forza maggiorata che aiuti le fasi di iniezione. Sono possibili due tipi di iniezione:

*dinamiche, d*urante il riempimento dello stampo, il materiale semisolido, anche se in forma globulare ha una viscosità decisamente superiore alla lega in forma liquida;

*statiche,* durante la compressione finale.

Le velocità di iniezione richieste sono, con il materiale semisolido, piuttosto basse mentre la pressione finale è molto elevata. Le billette preventivamente tagliate vengono caricate nel forno di preriscaldo ad induzione che dispone di stazioni per garantire il corretto riscaldamento in funzione del tempo di ciclo desiderato. Raggiunta la temperatura ottimale il contenitore della billetta viene prelevato da un robot e caricato in macchina. Viene attivata la fase di iniezione interamente controllata in anello chiuso per velocità e pressione. Il ciclo si svolge nel modo tradizionale ed alla fine il pezzo viene prelevato dal robot di scarico e portato nella zona adibita alle operazioni di smaterozzatura e finitura del getto. Un robospray fornito di speciale testa di lubrificazione provvede alla lubrificazione dello stampo.



**Figura 2.8**. Macchina con tecnologia tixocasting o semisolido

Le conoscenze acquisite, il miglioramento delle macchine ed i nuovi metodi di riempimento della cavità, lasciano intravedere nuove ulteriori possibilità nella produzione di getti di qualità e con alte cadenze di produzione. Tuttavia ci sono alcune nuove visioni su come il problema del controllo del riempimento possa essere risolto. Il controllo computerizzato delle macchine di colata per esempio, permette già di utilizzare curve di pressione ottimizzanti per il riempimento. Dove le curve di pressione sono ottimizzate correttamente, la velocità di riempimento risulterà ottima per ogni punto riempito. L’ottimizzazione di queste curve non è ancora comune, risulta impegnativo determinare l’attuale tasso con il quale la conchiglia viene riempita senza l’uso di stampi con strumentazione. Tutto ciò fa sì che le curve di pressione ottimizzate spesso forniscano strutture fuori fase, causando anche problemi maggiori rispetto alle curve non ottimizzate.

Nel futuro si potranno vedere più stampi nei quali sarà possibile determinare il tasso di riempimento in tempo reale attraverso l’uso di sonde. Ciò che potrà essere effettuato è monitorare la pressione dei gas inerti sopra la conchiglia e misurare il cambiamento di capacità tra la massa fusa e la piastra di fissaggio dello stampo, un altro possibile elemento migliorativo è il rivestimento dello stampo. Per esempio nella pressofusione a bassa pressione di leghe di rame le conchiglie sono tradizionalmente ricoperte di grafite. Oggi i nuovi rivestimenti disponibili migliorano il controllo del trasferimento di calore dal metallo fuso allo stampo. Migliori materiali di rivestimento miglioreranno sia la qualità dei prodotti da pressofusione sia il controllo dei processi di colata.

**3. IL RAME E LE SUE LEGHE**

**3.1. Il rame**

Scoperto già nella preistoria, fu uno dei primi metalli ad essere utilizzato dall’uomo. Il rame è rimasto nell’uso corrente più a lungo di qualsiasi altro metallo, ha un’evoluzione di 600 anni di applicazioni basate sulla combinazione delle sue ottime proprietà quali: facilità di lavorazione, buona resistenza alla corrosione, elevata conducibilità ed ottima attitudine a formare leghe. Insieme all’oro è il solo metallo comune colorato, il rame puro ha un colore marrone-rosso, mentre nelle sue leghe il colore va dal bianco (argenti al nichel e cupro-nichel) al giallo oro. Di simbolo Cu e numero atomico 29, ha struttura reticolare cubica a facce centrate ed appartiene agli elementi di transizione della tavola periodica.

La sua produzione prevede varie fasi per arrivare al metallo partendo dai minerali. Il rame si trova allo stato puro come rame nativo (Figura 3.1), ma soprattutto sottoforma di minerali quali solfuri e carbonati basici. La percentuale di metallo estraibile da un minerale di rame, (Figura 3.2), è piuttosto bassa, tuttavia, i numerosi giacimenti sparsi in tutto il mondo riescono a soddisfare l'alta domanda di questo metallo. I principali del rame nativo, importante per la produzione del metallo, si trovano negli USA, Bolivia, Cile, Russia e Zaire.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 3.1**. Rame nativo. | http://www.ing.unitn.it/%7Ecolombo/RAME_E_SUE_LEGHE/Image1.gif  **Figura 3.2**. Minerali del rame, bornite e calcopirite. |

Con il termine puro si intende una percentuale del metallo che oscilla tra il 99.85% ed il 99.99%. Nei minerali da cui viene estratto il rame ‘per via secca’ si ha bassa concentrazione dell’elemento, ciò impone diversi stadi di lavorazione. I minerali vengono frantumati e macinati prima di essere introdotti nella camera di flottazione, dove il rame si separa dal resto dei frammenti, che precipitano. La polvere arricchita di rame passa nel forno a riverbero dove buona parte delle impurità viene rimossa sotto forma di gas. Si ottiene una miscela di rame e ferro, detta metallina, sopra la quale galleggiano delle scorie che vengono eliminate, mentre il resto della fusione raggiunge un convertitore. Il rame fuso viene colato in stampi ed ulteriormente purificato per elettrolisi prima di essere utilizzato. La maggior parte dei prodotti del rame è disponibile sia in forma di getti che in forgiati. Il rame una volta prodotto viene legato in quanto al suo stato puro risulta difficile da lavorare perché tenero e con elevata conducibilità termica ed elettrica. Le leghe di rame, al contrario, sono dure e resistenti, hanno elevata resistenza elettrica e di conseguenza non possono essere utilizzate come materiale conduttore. Le più importanti leghe sono l'ottone, una lega di zinco, ed il bronzo, una lega di stagno. Il rame viene anche utilizzato insieme anche con oro, argento e nichel ed è un importante costituente di leghe come il metallo Monel, il metallo per proiettili, e l’argento tedesco.

**3.1.1. Proprietà del rame**

La scelta del rame o di una delle sue leghe, viene fatta prendendo in considerazione le sue proprietà. Tra le proprietà meccaniche si evidenzia da subito una *resistenza meccanica* relativamente bassa, ma al contempo una *duttilità* elevata. Per la sua configurazione cristallina il rame non presenta un accentuato snervamento nella prova di trazione, in genere viene specificata la tensione convenzionale con deformazione permanente dello 0.2%. Le basse temperature riescono ad aumentare la resistenza meccanica mantenendo una buona duttilità, viceversa le alte temperature riducono la resistenza meccanica e possono avere effetti negativi sulla duttilità. Per la maggior parte delle applicazioni la duttilità e la resistenza alla corrosione sono i principali criteri di scelta e la resistenza meccanica viene considerata di importanza secondaria. La *resistenza a fatica* dipende dal numero di cicli cui è sottoposto il materiale. Alcune delle principali proprietà sono riportate di seguito. (Tabella 3.1).

**Tabella 3.1**. Proprietà caratteristiche del rame.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Proprietà /caratteristica*** | ***Valore*** |
| Peso specifico | 9,1 Kg/dm^3 |
| Densità a 20°C | 8920 Kg/m^3 |
| Temperatura di fusione | 1084°C |
| Temperatura di ebollizione | 2562°C |
| Calore di fusione | 13KJ/mol |
| Calore di vaporizzazione | 306 KJ/mol |
| Resistività a 20°C | 1,69 x 10^-8 ohm x m |
| Conducibilità elettrica | 59,6 x 10^6 ohm x m |
| Conducibilità termica | 390 W/(m x K) |
| Coefficiente di espansione 20-100 °C | 17 x 10^-6/K |
| Variazione di volume in fusione | 4% (circa) |
| Modulo elastico | 117GPa |
| Carico di rottura | 216MPa |
| Carico di snervamento | 48MPa |

Come già detto una delle caratteristiche principali del rame è la *conducibilità* infatti oltre il 50% di tutto il rame è impiegato per scopi elettrici. Tale proprietà viene ridotta dalle lavorazioni a freddo come pure dall’aggiunta di leganti, in generale all’aumentare della resistenza meccanica diminuisce la conducibilità (per esempio l’aggiunta dell’1% di cadmio riduce la conducibilità del 5%). L’alligazione del rame diminuisce la conducibilità sia elettrica che termica, quest’ultima in minor quantità, l’ammontare della riduzione dovuta ad alligazione dipende solo dagli effetti che particolari atomi di soluto hanno sul reticolo del rame. Un fattore molto riduttivo per la conducibilità è rappresentato inoltre dalle impurità che introducono dei problemi nelle condizioni operative, per ovviare ciò bisogna operare un controllo di queste ultime se utilizzato per applicazioni elettriche.

Un’altra ma non meno importante caratteristica del rame è la *resistenza alla corrosione*, infatti, in atmosfera normale ed in acqua, questa è elevata. Sulla superficie dal rame si crea una pellicola di ossido che svolge azione protettiva. Il metallo non è attaccato dai prodotti alcalini, eccetto che dall’ammoniaca, mentre l’acido nitrico e cloridrico lo dissolvono rapidamente. Aggiunte di leganti quali boro, litio e cadmio, riducono la velocità di ossidazione sia a temperatura ambiente che a quelle alte sviluppando una pellicola protettiva, tuttavia si riducono sia conducibilità che facilità di lavorazione aumentando la resistenza meccanica. Ottoni contenenti più del 15% di zinco sono molto suscettibili alla dezincificazione, dove lo zinco è selettivamente rimosso per corrosione dalla superficie del materiale, lasciando uno strato poroso di rame e prodotti di corrosione. Questo fenomeno si presenta particolarmente in acque che contengono molto ossigeno ed anidride carbonica, e con acque calme o poco mosse.

Le leghe come il rame possono essere facilmente assemblate attraverso i vari processi meccanici o di saldatura, quindi presentano buona *saldabilità*.

Il rame ha la caratteristica di poter essere facilmente *riciclato* al 100% conservando le stesse caratteristiche chimico-fisiche e tecnologiche del primario, per questo, ad esempio in Italia, il 40% dei semilavorati di rame e leghe è ottenuto riciclando rottami. Ciò avviene in tutti i Paesi del mondo in quanto il riciclato non ha svalutazioni rispetto al primario. Tale valore corrisponde al 100% dei semilavorati prodotti 30 anni fa (vita media utile dei prodotti di rame e leghe di rame); per questo è possibile affermare che il rame è la materia prima per la quale disponiamo di maggiori riserve, anche se non esistono in Italia miniere da cui estrarlo.

**3.1.2. Impieghi del rame**

Le leghe di rame hanno l’enorme vantaggio di poter essere immediatamente utilizzate dopo la colata, in particolare quando sono richieste resistenza a sforzi di trazione e/o compressione, resistenza all'usura da contatto (cuscinetti, bronzine, ingranaggi), lavorabilità a freddo, conducibilità termica e/o elettrica, aspetto estetico e resistenza alla corrosione (bronzi artistici, corpi di valvole (Figura 3.3), componenti vari per l'industria chimica). La grande versatilità del processo di produzione, permette di utilizzare diverse tecniche e svariati materiali per ottenere, nel prodotto metallico finale, le caratteristiche desiderate.



**Figura 3.3**. Esempi di particolari prodotti per pressofusione: raccordi e valvole.

L’elevata conducibilità elettrica è la ragione primaria di scelta del rame, poi, con pari importanza, si considerano resistenza a corrosione, facilità di lavorazione e buona conducibilità termica. Il rame, puro e ridotto in fili, trova la sua maggiore applicazione per la produzione e l'utilizzo dell'energia elettrica (non per il trasporto, i cavi degli elettrodotti a media ed alta tensione non sono di rame ma di alluminio, a causa della maggiore resistenza meccanica) e nella produzione di circuiti stampati per l’elettronica. I principali altri utilizzi del rame e delle sue leghe sono brevemente elencati di seguito:

* In architettura il rame è impiegato per eseguire tetti e coperture, gronde, scossaline, pluviali ed altri elementi di lattoneria.
* I tubi di rame vengono usati per trasportare acqua potabile, gas combustibili, gas medicali, acqua per il riscaldamento e fluidi per condizionamento e refrigerazione. Il rame è impermeabile ai gas, è facilmente piegabile, resiste alla corrosione e non invecchia se esposto alla radiazione solare.
* Grazie alla sua eccellente conduttività termica è uno dei materiali che rende più efficiente lo scambio di calore, per questo lo si utilizza negli scambiatori di calore, nei pannelli solari e nei pannelli radianti a parete e a pavimento.
* Il rame è molto usato dagli artigiani, dagli artisti e dai designer per il suo colore e la sua facile lavorabilità che lo rendono adatto per molti usi ornamentali.
* Coniature di monete, al giorno d'oggi le monete da 10, 20 e 50 centesimi e da 1 e 2 euro (Figura 3.4) sono in lega di rame, la parte gialla è chiamata Nickel brass CuZn20Ni5), mentre la parte bianca è un cupronickel (CuNi25), quelle da 1, 2 e 5 centesimi sono semplicemente di acciaio ramato esternamente (Figura 3..).
* Il rame, insieme ad alluminio e zinco, viene utilizzato anche in applicazioni tecnologicamente avanzate, come per esempio nelle leghe a memoria di forma, che assumono due forme diverse a seconda se sono al di sopra o al di sotto di una certa temperatura.
* Un'altra applicazione particolare è nel campo della superconduzione. Nei materiali superconduttori ad alta temperatura la caratteristica è dovuta all'esistenza di piani atomici paralleli di rame e ossigeno.



**Figure 3.4 e 3.5.** Monete da un centesimo di euro e da un euro, in circolazione in Europa dal 2001.

Il rame puro non è adatto ad essere colato perché poco scorrevole e perché origina facilmente getti spugnosi, per questo motivo nella pressofusione vengono utilizzate le sue leghe. Si lavora invece per deformazione a freddo con molta facilità ed in dimensioni molto grandi lavorate fra 650° – 800°C, a temperature inferiori o superiori il metallo diventa fragile. La lavorazione meccanica provoca incrudimento ed è necessario farla seguire da una ricottura a 600°C.

La ricottura è l’unico trattamento termico al quale può essere sottoposto il rame puro ed è applicato sia nel caso che debba essere detensionato in seguito a lavorazione meccanica, che nel caso in cui si debba rigenerare la struttura cristallina incrudita da lavorazioni plastiche a freddo (estrusione laminazione ecc.). La temperatura migliore è 550°C ed a tale temperatura deve essere tenuto il tempo minimo indispensabile perché si uniformizzi, dopo di che può essere raffreddato sia all’aria, sia, ancor meglio in acqua. Allo stesso modo anche con la ricottura di una lega a fase singola, i cristalli deformati e sotto sforzo sono trasformati in cristalli privi di tensioni attraverso riassetto, ricristallizzazione e crescita dei grani. Nei metalli più pesantemente deformati, la ricristallizzazione avviene a più basse temperature rispetto a quelli meno deformati. I grani risultano più piccoli e più uniformi quando il metallo da ricristallizzare risulta molto deformato. La grandezza del grano, quindi, si controlla attraverso lavorazioni a freddo e ricottura. Una grana fine è favorita da grandi incrudimenti e ricotture veloci e brevi, mentre una grana grossa si ottiene normalmente con modesti incrudimenti e lunghi tempi di ricottura.

I processi di trattamento termico possono essere applicati al rame ed alle sue leghe, per ottenere omogeneizzazioni, rilassamento di tensioni residue, solubilizzazioni, indurimenti per precipitazione e tempre. Se si desidera conservare la brillantezza del rame è necessario che il ciclo avvenga in atmosfera controllata in forni a tenuta o addirittura sottovuoto. A tale scopo si possono utilizzare gas puri, come l’azoto o atmosfere ricavate dalla combustione “di idrocarburi” più o meno completa (esempio esogas).

Esistono delle limitazioni sia nell’uso che nei processi a cui possono essere sottoposti il rame e le sue leghe a causa delle reazioni chimiche che si hanno con ossigeno ed idrogeno. Il rame infatti può legarsi con l’ossigeno, esso reagisce con l’idrogeno ad elevate temperature. Quest’ultimo diffonde all’interno del metallo solido combinandosi con l’ossigeno dando luogo a vapore d’acqua che va ad esercitare pressioni sufficienti a produrre cricche (*infragilimento da idrogeno*). Tali reazioni gassose si possono verificare nella saldatura o nella saldo-brasatura mediante idrogeno od idrocarburi, oppure nella tempra in presenza di questi gas. Tale pericolo può essere eliminato in diversi modi. Il primo modo si può ottenere aggiungendo un ossidante (boro, litio o fosforo, il più economico) durante le operazioni di raffinazione e colata, esso ha affinità con l’O2 maggiore del rame. Non bisogna però eccedere, in quanto un piccolo eccesso di desossidante riduce la conducibilità. Un secondo procedimento per evitare infragilimento da idrogeno è effettuare una colata sotto vuoto, questo processo garantisce un prodotto migliore ma implica impianti particolarmente costosi. Va ricordato che seppure il rame ha un bassissimo contenuto di ossigeno può acquisirlo nel corso dei processi di lavorazione.

**3.2. Le leghe di rame**

Le leghe di rame possono essere divise in differenti gruppi a seconda della loro composizione. I gruppi includono *rame puro o raffinato, rame basso legato, rame fortemente legato*. La prima famiglia, i rami, sono commercialmente puri, contengono meno dello 0,2% di impurezze totali e sono morbidi e duttili. Le leghe di rame bassolegate contengono piccole percentuali di vari elementi leganti che modificano una, o più, proprietà base del rame. Tra le leghe fortemente legate troviamo i bronzi, gli ottoni ed i cupro-nickel. Tutte le differenti leghe di rame sono considerate colabili, tuttavia la colatura delle diverse leghe presenta distinzioni una dall’altra, a causa dalle differenti composizioni. Molte delle differenze di composizione sono effetto della ricerca di un continuo miglioramento della colabilità delle leghe stesse.

Una principale categoria di leghe di rame è quella del *rame raffinato* con tenore di Cu>99,8%. Il rame industriale, invece, presenta delle impurezze maggiori che possono essere addebitate sia a depurazione insufficiente dei minerali di origine, sia ad elementi aggiunti durante l’elaborazione del metallo stesso.

L’ossigeno combinato sotto forma di ossidulo di rame (Cu2O), si forma quando il bagno fuso di rame viene a contatto con l’aria, una parte di esso solidifica originando una ragnatela di eutettico (Cu-Cu2O) ai bordi dei grani di Cu. Normalmente l’ossigeno che si combina col rame liquido varia dallo 0.05 al 0.11% cui corrisponde una concentrazione di Cu2O dello 0.5 ÷ 1%. Il Cu2O in concentrazioni superiori allo 0.9% forma a 1063°C un eutettico col 3.4% di Cu2O ( = 0.39% di ossigeno). A tale combinazione cominciano a degenerare le proprietà meccaniche del metallo. In quantità contenute quindi la presenza di O2 nel rame non genera decadimenti fisici o meccanici sensibili. Normalmente, per ragioni di economicità, l’elemento disossidante più usato è il P (fosforo), che però è anche uno degli elementi più nocivi per la conduttività elettrica. Raramente il rame disossidato al P viene usato per applicazioni elettriche, infatti la conduttività elettrica anche per tenori molto bassi di P (0.04 – 0.012%) si aggira sul 95% IACS.

In base a queste brevi considerazioni, ed ai metodi di elaborazione del metallo visti precedentemente, è possibile suddividere le varie qualità di rame ottenibili industrialmente secondo la classificazione: ‘Rame Puro’ o ‘Rame Raffinato’ (classificazione americana) che tenga conto sia dell’elaborazione, sia delle sue caratteristiche chimico - fisiche - meccaniche (Tabella 3.2).

**Tabella 3.2**. Leghe di ‘rame puro’ purezza: > 99.8% Cu.

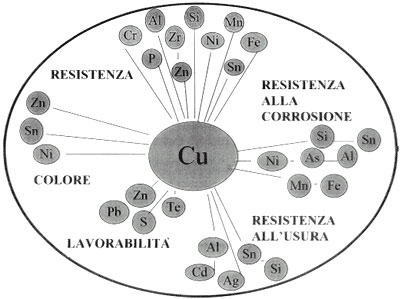
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***Nomenclatura*** | ***Livello Ossidi*** | ***Principali elementi presenti, conduttività*** |
| Cu-EPT | Non disossidato | Ossidulo di rame 0,02-0,05%, conduttività 100%IACS, Per usi elettrici |
| Cu-FRTP | Non disossidato | Ossidulo di rame 0,02-0,05%, conduttività 85-90%%IACS, Per usi meccanici |
| Cu-DLP | Disossidato | Fosforo 0,04-0,12%, conduttività 85-98% IACS, Per usi meccanici |
| Cu-DHP | Disossidato | Fosforo 0,13-0,5%, conduttività 70-90% IACS, per usi meccanici |
| Cu-OFE | Esente da ossigeno | No ossidulo, no disossidante, ottenuto sottovuoto, conduttività >100% IACS, per usi elettrici anche in ambiente riducente |
| *Cu-OF* | Esente da ossigeno |

Un’altra categoria di leghe di rame è quella del *rame basso legato* con tenore di Cu>99%. Vengono commercialmente definite con questo nome le leghe di rame con alcuni elementi in lega in tenori molto bassi. Segue per i principali elementi di lega una breve descrizione (Tabella 3.3).

**Tabella 3.3**. Leghe di ‘rame basso legato’ purezza: > 99% Cu.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Principale elemento legante*** | ***Caratteristiche apportate alla lega*** |
| Argento | Ag 0,02-0,25%, possiede elevata conduttività elettrica, innalza la temperatura di ricristallizzazione da 175 a 300°C, non crea infragilimenti in saldatura. |
| Cadmio | Cd 0,5-1,5%, fornisce le stesse caratteristiche dell’argento, dopo incrudimento possiede resistenza all’usura e allo scintillio, per linee elettriche ferroviarie. Influisce poco sulla conduttività. |
| Cadmio-Stagno | (bronzo telefonico) Cd 0,2-1% Sn 0,2-1% aumenta rispetto a solo Cd le resistenza all’usura, buona resistenza meccanica. |
| Cromo | Cr 0,3-1.2% Rafforza la lega aumentandone la resistenza meccanica e conservandole sino a 450°C soprattutto dopo bonifica per riprecipitazione, abbassa conduttività termica ed elettrica di poco, usato per produzione di elettrodi in macchine di saldatura. |
| Zirconio | Zr 0,1-3% è una lega da bonifica ha elevata conduttività, utilizzato in applicazioni ad alta temperatura e che richiedono alta conducibilità. |
| Zolfo o Tellurio | S 0,2-0,5% T 0,3-0,8% adatti per lavorazione ad asportazione di truciolo, forniscono trucioli corti. |
| Arsenico | As 0,15-0,5% come il fosforo, migliora la resistenza all’ossidazione anche ad alte temperature, ma abbassa la conduttività, innalza la temperatura di ricristallizzazione. |
| Ferro | Fe <0,1% non solubile, è usato come elemento raffinatore di bronzi, ottoni ed alluminati, migliora la resistenza meccanica, innalza la temperatura di fusione. |
| Antimonio | <0,1% negli ottoni avvia la de zincatura (evaporazione dello zinco nelle leghe fuse), nei bronzi aumenta la resistenza meccanica e la duttilità. |
| Bismuto | <0,1% causa infragilimento anche in piccole quantità, è utilizzato per sostituire il piombo nelle leghe perché meno pericoloso per la salute, negli ottoni migliora la lavorabilità, |

Prima di trattare le leghe fortemente legate ed entrare nel merito della loro colabilità si introduce di seguito uno schema riassuntivo che illustrata (Figura 3.6) le maggiori proprietà fornite dai principali leganti delle leghe di rame comuni.



**Figura 3.6.** Proprietà fornite dai leganti alla lega di rame.

Gli elementi alliganti delle leghe di *rame fortemente legate* sono anche i principali elementi delle più conosciute ed utilizzate leghe nell’industria mondiale. Il rame infatti, ha una spiccata capacità di legarsi con determinati metalli che ne rafforzano le caratteristiche meccaniche e chimico-fisiche. I maggiori verranno di seguito descritti in maniera completa ed a seconda della loro importanza nello specifico contesto delle leghe di rame da pressofusione. Sicuramente tra i maggiormente conosciuti si possono già anticipare lo zinco, che con il rame forma la famiglia degli ottoni, la più numerosa ed utilizzata, lo stagno, che da origine ai bronzi ed il nickel, che forma il gruppo delle leghe denominate cupro-nickel, di particolare interesse per la loro resistenza alla corrosione.

* L’alluminio: usato nelle leghe di rame ne migliora la resistenza meccanica ed alla corrosione attraverso il rafforzamento della soluzione solida, pertanto è utilizzato nelle leghe fortemente legate con contenuti fino al 12% circa in peso. Quando l’alluminio viene aggiunto in piccole quantità, si ha un miglioramento della fluidità della fusione di alcune delle leghe di rame come l’ottone giallo e l’ottone al silicio.
* Il silicio: contenuto nelle leghe è comunemente usato nell’arte della colata come aumentatore di fluidità della fusione delle leghe. Vengono utilizzati contenuti in peso fino al 5%.
* Il Nickel: si trova nelle leghe di rame che necessitano di elevata resistenza alla corrosione. Le leghe di rame nickel sono comunemente utilizzate nel settore petrolifero, chimico, alimentare e nell’industria casearia. L’aggiunta del nickel nelle leghe di rame migliora la resistenza meccanica e la resistenza allo scorrimento viscoso, inoltre, si hanno giovamenti anche per la tenuta a pressione della colata quando il piombo viene usato in bronzi e leghe di ottone semi rosse.
* Il berillio: rafforza le leghe di rame per formazione di precipitati interdendritici. Questo elemento fornisce un aumento della resistenza meccanica e della duttilità, nel contempo mantiene buona conduttività termica ed elettrica. La buona conducibilità termica e resistenza a fatica consentono l’utilizzo della lega Rame-Berillio in stampi nei sistemi ad iniezione, per i quali sono richieste anche doti di resistenza a stress termici e durezze elevate. Si producono così stampi che possono riprodurre accuratamente dettagli complicati. Il buon livello di durezza a temperature sia moderate che elevate, garantisce la resistenza alla deformazione dell’utensile durante il processo, ciò le identifica come le migliori leghe per la produzione di conchiglie da pressofusione. Il prodotto della conducibilità elettrica per quella termica misura e fornisce la particolare attitudine alla lega di gestire il calore generato per effetto Joule in un sistema elettrico, inoltre, minimizza il calore generato mediante bassa resistività elettrica e lo distribuisce per convezione ed irraggiamento sfruttando l’alta conducibilità termica. La lega rame berillio viene utilizzata per applicazioni a temperature criogeniche alle quali rimane un buon conduttore sia elettrico che termico conservando anche una buona resistenza a snervamento. Hanno una buona combinazione fra la resistenza alla corrosione e le proprietà fisico-meccaniche. Sono immuni agli attacchi corrosivi in ambienti ricchi di cloro e zolfo, inoltre possono subire stress-corrosion cracking solo in presenza di ossigeno, ammoniaca e umidità. Resistenza a fatica e resilienza vengono sfruttate in molti tipi di interruttori, controlli termostatici e relè elettromagnetici. Altri dispositivi che sfruttano queste proprietà sono quelli atti ad individuare energie vibratorie che, quindi, devono avere alta sensibilità ai piccoli segnali. La bassa suscettibilità magnetica e resistenza alla corrosione sono adatte per componenti che sfruttano bassi campi magnetici (applicazioni petrolifere, biomediche, strumenti di navigazione).
* Il piombo: Elemento trovato comunemente in molte leghe di rame è insolubile, forma quindi una fase separata che solidifica per ultima, il fenomeno viene trovato a bordo grano e nelle aree interdendritiche. Questa caratteristica permette al piombo di migliorare la solidità della colata delle leghe di rame attraverso il riempimento dei pori che si formano durante la solidificazione, rendendo più facile la colata in pressione. Il piombo è aggiunto nei bronzi allo stagno per la produzione di cuscinetti (bronzine), o nella produzione di cuscinetti antifrizione, dove l’aggiunta del piombo funge da autolubrificante secco quando la lubrificazione è scarsa o inefficiente. Nel cuscinetto, il piombo agisce come un lubrificante solido, ed il rame, è il carico di sostegno. Come detto il piombo è praticamente insolubile nel massello di rame, e si solidifica come ultimo, quasi come se fosse puro ai confini del grano, ciò migliora anche la lavorabilità alle macchine utensili in quanto permette la rapida rottura del truciolo. Di contro, la sua presenza in lega, diminuisce la resistenza alla trazione e la duttilità.
* Lo stagno: assieme allo zinco è l’elemento di lega del rame di maggiore importanza. Miscelati, rame e stagno, in varie percentuali (Sn fino al 25-30%) formano il bronzo, pur potendo la lega contenere anche altri costituenti. Il colore varia dal rosso rame (Sn < del 5%), al giallo oro (Sn 5 - 10%), al giallo chiaro (Sn 10 - 25%) ed infine al bianco (Sn > del 25%). Una caratteristica fondamentale dei bronzi è la loro maggior durezza e resistenza rispetto al rame. Le caratteristiche meccaniche variano notevolmente in funzione del tenore di Sn e di altri componenti. Il bronzo si ottiene per fusione e successivo raffreddamento dei metalli costituenti (Cu, Sn, Zn, Pb), ed è una lega molto fusibile. In commercio, si trova sotto forma di pani, barre, profilati, nastri, fili, semilavorati ottenuti da lavorazione plastica, rottami. Nell'industria meccanica, si usano bronzi con tenore di Sn dal 6 al 16%. Normalmente, i bronzi a basso tenore di stagno (sino a 6- 8%) vengono classificati per impiego in lavorazioni plastiche (piegatura, imbutitura, trafilatura). I bronzi con tenore di stagno dall'8% al 20% vengono impiegati per lavorazioni di fusione (in getti) e sono quelli più utilizzati nella costruzione di corpi per valvole, rubinetti e corpi per ruote dentate. Un particolare tipo di bronzo con stagno dal 20% al 30% viene utilizzato per la costruzione di campane.
* Lo zinco: assieme allo stagno è l’elemento di lega del rame di maggiore importanza. Miscelati, rame e zinco, in varie percentuali (Zn fino a circa il 50%) formano l’ottone ma possono contenere anche altri metalli. Il colore degli ottoni comuni varia da un rosso rame (basso tenore di zinco), ad un giallo oro caldo (medio tenore di zinco), ad un colore giallo oro freddo (alto tenore di zinco). L’ottone contenente oltre il 67% di Cu si chiama tombacco (ottone rosso). A seconda della percentuale di zinco, fino ad un massimo del 48%, si distinguono ottoni α (con tenore di zinco fino al 33%) e ottoni αβ (con tenore di zinco da 33% a 48%). L’ottone possiede buone proprietà meccaniche ed un'ottima resistenza alla corrosione che variano notevolmente a seconda della composizione. Gli ottoni sono in parte induribili e possono presentare un comportamento simile agli acciai. La lavorabilità alle macchine utensili delle leghe binarie rame-zinco è buona, ma la tenacità provoca la formazione di trucioli molto lunghi. Aggiungendo del piombo, che, si disperde ai bordi dei grani, i trucioli diventano molto corti o addirittura polverosi e gli utensili subiscono un’usura e un riscaldamento minori, con conseguente miglioramento della qualità e della velocità della lavorazione. Gli ottoni al piombo sono denominati anche ottoni secchi.

**3.2.1. Colabilità e suoi parametri delle leghe di rame**

La colabilità è l’attitudine di un materiale a riempire completamente un contenitore di qualsiasi forma una volta allo stato liquido, tale termine tra le varie cose include la fluidità. Per determinare la fluidità di un metallo fuso viene condotto un test nel quale il fluido viene fatto scorrere lungo un canale a temperatura ambiente misurando la distanza che il flusso riesce a percorrere prima di solidificare e fermarsi. Per una lega essere considerata come colabile è relativamente facile ed è così anche per le leghe di rame che permettono la produzione di buone colate. Il rame puro non è adatto ad essere colato perché poco scorrevole e perché origina facilmente getti spugnosi motivo questo per il quale vengono utilizzate le leghe. Per quanto riguarda invece le leghe di rame, tutte possono essere fuse con tecniche di colata in sabbia, ma solo alcune di queste sono comunemente usate nella pressofusione. Fra i metalli che più comunemente si aggiungono in lega col rame vanno innanzitutto ricordati lo stagno e lo zinco che esercitano sul rame un effetto indurente. Si ottengono nel primo caso i bronzi, nel secondo gli ottoni. Mentre gli ottoni si impiegano per lo più laminati o in pezzi stampati, i bronzi vengono frequentemente fusi in getti le cui proprietà meccaniche se sono inferiori a quelle dei getti di acciaio, risultano superiori a quelle dei getti di ghisa, e presentano il grande vantaggio della considerevole resistenza all'azione degli agenti atmosferici. La pressofusione è principalmente utilizzata, in quanto adatta, per colare soprattutto differenti tipi di ottoni gialli e bronzi. Come detto tutte le differenti leghe di rame sono considerate colabili, tuttavia la colatura delle diverse leghe presenta distinzioni una dall’altra, ciò dipende dalle differenti composizioni. Molte delle differenze di composizione sono dovute alla ricerca di un miglioramento della colabilità delle leghe stesse. Per la designazione e suddivisione del rame e delle sue leghe da colata si fa riferimento all’Unified Numbering System (UNS) (Tabella 3.4 e Tabella 3.5). Di seguito vengono mostrati invece i parametri di colabilità (secondo la ASM) di alcune delle leghe di rame (Tabella 3.6).

**Tabella 3.4**. Leghe per lavorazioni a caldo secondo designazione UNS.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Denominazione UNS*** | ***Tipo di lega*** |
| C10100-C15760 | Rame (>99%) |
| C16200-C19600 | Leghe ad alto contenuto di rame (>96%) |
| C21000-C28000 | Ottoni (Cu-Zn) |
| C31200-C38500 | Ottoni di piombo (Cu-Zn-Pb) |
| C40400-C48600 | Ottoni di stagno (Cu-Zn-Sn-Pb) |
| C50100-C52400 | Bronzi al fosforo (Cu-Sn-P) |
| C53400-C54400 | Bronzi al fosforo e piombo (Cu-Sn-Pb-P) |
| C55180-C55284 | Rame al fosforo e leghe rame-argento al fosforo (Cu-P-Ag) |
| C60800-C64210 | Bronzi di alluminio e bronzi alluminio-silicei (Cu-Al-Ni-Fe-Si-Sn) |
| C64700-C66100 | Bronzi di silicio (Cu-Si-Sn) |
| C66400-C69900 | Altre leghe di rame e zinco |
| C70100-C72950 | Cupro-nickel (Cu-Ni-Fe) |
| C73500-C79800 | Alpacche (Cu-Ni-Zn) |

**Tabella 3.5**. Leghe da colata secondo designazione UNS.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Denominazione UNS*** | ***Tipo di lega*** |
| C80100-C81200 | Rame (>99%) |
| C81400-C82800 | Leghe ad alto contenuto di rame (>94%) |
| C83300-C84800 | Ottoni rossi e rossi al piombo (Cu-Zn-Sn-Pb, 75-89% Cu) |
| C85200-C85800 | Ottoni gialli e gialli al piombo (Cu-Zn-Sn-Pb, 57-74% Cu) |
| C86100-C86800 | Bronzi al manganese e bronzi al manganese piombo (Cu-Zn-Mn-Fe-Pb) |
| C87300-C87800 | Bronzi ed ottoni al silicio (Cu-Zn-Si) |
| C90200-C94500 | Bronzi allo stagno semplici e con piombo (Cu-Sn-Zn-Pb) |
| C94700-C94900 | Bronzi al nickel-stagno (Cu-Ni-Sn-Zn-Pb) |
| C95200-C95900 | Bronzi di alluminio (Cu-Ni-Fe) |
| C96200-C96800 | Cupro-nickel (Cu-Ni-Fe) |
| C97300-C97800 | Alpacche (Cu-Ni-Zn-Pb-Sn) |
| C98200-C98800 | Rame al piombo (Cu-Pb) |
| C99300-C99750 | Miscele di leghe |

**Tabella 3.6.** Parametri di colabilità (secondo ASM) di alcune delle leghe di rame, i range vanno da 1 a 8 con 1 miglior valore e 8 peggiore.

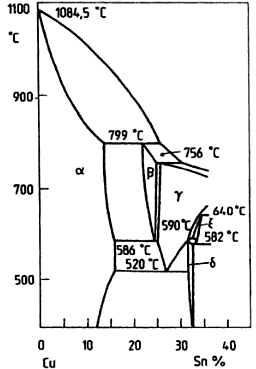
|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Denominazione UNS*** | ***Nome comune*** | ***Percentuale di ritiro %*** | ***Temperatura di liquidus °C approssimativa*** | ***Colabilità range*** | ***Fluidità range*** |
| C83600 | Ottone rosso al piombo | 5,7 | 1010 | 2 | 6 |
| C84400 | Ottone semirosso al piombo | 2 | 980 | 2 | 6 |
| C84800 | Ottone semirosso al piombo | 1,4 | 955 | 2 | 6 |
| C85400 | Ottone giallo al piombo | 1,5-1,8 | 940 | 4 | 3 |
| C85800 | Ottone giallo | 2 | 925 | 4 | 3 |
| C86300 | Bronzo al manganese | 2,3 | 920 | 5 | 2 |
| C86500 | Bronzo al manganese | 1,9 | 880 | 4 | 2 |
| C87200 | Bronzo al silicio | 1,8-2,0 | - | 5 | 3 |
| C87500 | Ottone al silicio | 1,9 | 915 | 4 | 1 |
| C90300 | Bronzo allo stagno | 1,5-1,8 | 980 | 3 | 6 |
| C92200 | Bronzo allo stagno piombo | 1,5 | 990 | 3 | 6 |
| C93700 | Bronzo al piombo fortemente legato | 2 | 930 | 2 | 6 |
| C94300 | Bronzo stagno piombo fortemente legato | 1,5 | 925 | 6 | 7 |
| C95300 | Bronzo all’alluminio | 1,6 | 1045 | 8 | 3 |
| C95800 | Bronzo all’alluminio | 1,6 | 1060 | 8 | 3 |
| C97600 | Rame nickel argento | 2 | 1145 | 8 | 7 |
| C97800 | Rame nickel argento | 1,6 | 1180 | 8 | 7 |

Come si nota non tutti gli elementi alliganti hanno lo stesso effetto sulla colabilità della lega come del resto sulle proprietà che essi apportano ad essa. Il processo della pressofusione, è stata una tecnica utilizzata per molti anni nella colata di leghe di rame ed è poi caduta in disuso per essere riscoperta negli ultimi tempi come tecnica di precisione e per fusioni nelle quali il pezzo richieda caratteristiche meccaniche migliorate. Va detto tuttavia che non tutte le leghe di rame sono colabili per pressofusione, in genere si usano bronzi ed alcuni tipi di ottone.

Occorre tener presente la distinzione relativa al comportamento in raffreddamento delle leghe di rame in quanto solidificano in un intervallo di temperatura più o meno ampio. In generale l'intervallo di solidificazione si definisce come l'intervallo di temperature compreso tra l'intersezione della composizione tra solidus e liquidus del diagramma di stato equivalente. Definendo come “liquidus” la temperatura alla quale il metallo inizia a solidificare e come “solidus” quella a cui il metallo è completamente solido, si descrivono nel corso di tutto il lavoro di tesi i diagrammi di stato nei quali si individua agevolmente l'intervallo di solidificazione di ogni lega.

**3.2.1.1. Colabilità del bronzo**

Le leghe rame stagno sono comunemente chiamate bronzi. Lo stagno migliora la colabilità aumentando la fluidità ed il campo di solidificazione della legha, solitamente vengono impiegati tenori di stagno dall'8% al 25% nelle lavorazioni di fusione. Raramente si utilizzano bronzi composti esclusivamente da Cu e Sn. Di seguito è riportato il diagramma di stato Cu – Sn (Figura 3.7).



**Figura 3.7.** Diagramma di stato Cu - Sn.

Del diagramma di stato Cu-Sn è possibile fare una breve analisi. Innanzitutto si nota un composto ben definito Cu-Sn e cinque soluzioni solide. Questa lega ha un intervallo di solidificazione di circa 110°C. La soluzione solida α è presente per tenori di Sn fino al 13.9% ed ha tra le caratteristiche meccaniche una buona malleabilità che permette la lavorazione plastica a freddo delle leghe costituite da questa unica fase. La fase α aumenta la sua durezza e diminuisce la sua plasticità all’aumentare del tenore di Sn. Con tenori di Sn superiori al 13.9% compare, operando in condizioni di equilibrio stabile, una nuova fase β, mentre con tenori maggiori del 26% si origina una terza fase γ che durante il raffreddamento della lega si trasforma a 520°C in un composto bimetallico a formula Cu4Sn, durissimo e fragile, chiamato fase δ. La lega contenente la fase δ è dura e fragile per cui nei bronzi contenenti Sn oltre il 13% è possibile effettuare un riscaldo oltre 587°C che trasformi tutta la fase δ in β e fissare a temperatura ambiente tale fase con una tempra in acqua ottenendo una struttura più duttile e malleabile.

Per le leghe del gruppo Cu-Sn, la fusione deve essere fatta velocemente ed in atmosfera leggermente ossidante. A causa del grande intervallo di solidificazione, il raffreddamento rapido o la creazione di un gradiente termico elevato, sono risultati metodi molto più efficaci rispetto all'uso dei soli alimentatori a materozza per la buona riuscita del risultato, pertanto, vengono sfruttati in accoppiamento lavorando ad una temperatura di colata più bassa in grado di consentire un riempimento dello stampo omogeneo cioè privo di zone a solidificazione mancante. In questo caso prima di iniziare la colata si esegue il processo di “scorificazione” per aggiunta di disossidante al fosforo da dosare con cura al fine di rimuovere l'ossigeno pur lasciandone una minima quantità allo scopo di aumentare la fluidità del metallo durante il processo. Per evitare le porosità interne o, in caso di lavorazione meccaniche, fenomeni di dispersione superficiale, nella lega finale il tenore di fosforo residuo deve essere compreso tra lo 0.01% e lo 0.02%.

Il grande impiego dei bronzi in fonderia è in larga parte dovuto dunque alle buone doti di colabilità (fluidità e scorrevolezza) della lega liquida che riempie bene tutti i dettagli delle forme. Per contro la lega ha un ampio intervallo di solidificazione che favorisce i fenomeni di liquazione, segregazioni e porosità da ritiro. Quest’ultimo inconveniente può essere superato aggiungendo elementi in lega, come il nichel, che restringono l’intervallo di solidificazione senza danneggiare le doti di colabilità.

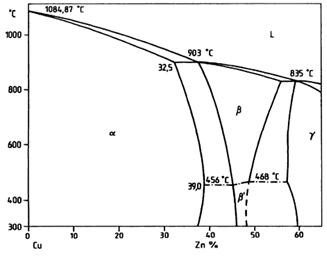
Fra gli elementi più comunemente aggiunti c’è lo *zinco*, che aumenta la fluidità, diminuisce le soffiature ed attenua le liquazioni del bronzo. L’aggiunta di Zn nelle leghe binarie Cu-Sn ha l’effetto di spostare la posizione della lega nel diagramma di stato Cu-Sn verso la posizione del Cu, per cui una lega Cu-Sn contenente la fase δ e per tenori di Zn particolarmente elevati, verrà spostata verso la fase α fino alla completa scomparsa della fase δ. In questo caso lo Zn ha l’effetto di migliorare la duttilità della lega fino ad arrivare alla possibilità di renderla forgiabile a freddo, per contro ne diminuisce la durezza e la resistenza all’usura. Ecco le composizioni di alcuni bronzi allo zinco: per monete e medaglie, rame 86-88%, stagno 4,2%; per ingranaggi, premistoppa ecc., rispettivamente, 87,5%, 10,50%, 2%; per rubinetterie di macchine a vapore, 88%, 8%, 4%; per segmenti di pistoni, 88%, 3%, 9%; bronzo "Fenton" antifrizione, 55,6%, 27,8%, 16,6%. Il *ferro*, il manganese ed il fosforo possono essere usati come disossidanti. Aumentano la resistenza della lega, ma, mentre il ferro ne riduce la duttilità il manganese la migliora. Altri elementi alliganti come il *silicio*, e tenori di stagno tra il 20 ed il 25% rendono la lega molto più fluida. Il *piombo* migliora la solidità della colata delle leghe di rame attraverso il riempimento dei pori che si formano durante la solidificazione, rendendo più facile la colata in pressione e migliorando anche la lavorabilità alle macchine utensili grazie alla sua insolubilità. Questo elemento non entra in lega col rame o con lo stagno ma tende, a causa del suo punto di fusione assai basso e della sua forte densità, a raccogliersi nella parte bassa del getto, tanto che si consiglia nella pratica, quando si debba fondere del bronzo con elevato tenore di piombo, di girare di 180° le staffe non appena colato per contrastare il movimento discendente del piombo stesso.

Da poco tempo è stata scoperta una nuova lega in cui tutto lo stagno sia stato sostituito da un indurente complesso, contenente in prevalenza silicio. Questo bronzo o metallo PMG sostituirebbe vantaggiosamente il bronzo cannone (lega Cu-Sn) perché più colabile, di proprietà meccaniche superiori specialmente a temperature elevate e di costo inferiore.

Il procedimento di fusione del bronzo inizia con la preparazione del bronzo meccanico tipico (90% Cu, 10% Sn), fondendo dapprima il rame e proteggendolo da un'ossidazione eccessiva con uno spesso strato di carbone di legna. Quando tutto il rame è fuso e convenientemente surriscaldato (circa 1200°C), si disossida completamente con fosforo, nel modo già indicato, o con altri agenti riduttori tra questi, da notare il boroflux a base di sottossido di boro e magnesio metallico, il rame-silicio al 10%, le miscele fondenti a base di prussiato giallo e sali alcalini. Avvenuta la disossidazione si aggiunge lo stagno, si rimescola rapidamente e si cola. La temperatura di colata ha molta importanza per la buona riuscita del getto: essa varia, naturalmente, a seconda delle dimensioni del getto stesso e può ritenersi ordinariamente compresa fra 1100° e 1200°C. Un bronzo colato a temperatura opportuna risulterà perfettamente compatto. La frattura di un getto o di una barretta di prova dovrà apparire a grana fine ed uniforme, di color giallognolo e contornata ai bordi da una zona sottile grigia o grigio-bluastra. Quando la temperatura di colata sia invece errata, nei getti si riscontreranno sempre zone più o meno estese di color bruno, rossiccio o anche verdastro, ed in corrispondenza di quelle chiazze il bronzo sarà sempre fragilissimo e poroso. Quando, anziché da metalli puri, si prepari il bronzo partendo da rottame, questo si fonderà per primo e quindi, disossidato il bagno, si faranno le aggiunte necessarie di rame o di stagno per portare il bronzo al titolo voluto. La presenza accidentale, nei bronzi di basso costo, di arsenico, bismuto, antimonio, zolfo, ecc., dannosissima da sempre, rende il metallo poco fluido, fragile e poroso, e va attribuita a qualità scadente delle materie prime impiegate. I bronzi presentano talvolta fenomeni di liquazione, che si manifestano specialmente quando la lega viene mantenuta allo stato fuso per un tempo piuttosto lungo. In questo caso si separa dalla massa fusa una lega ricca di stagno, ed il bronzo perde in tal modo la sua omogeneità. Le liquazioni sono favorite dal fosforo ed attenuate dallo zinco. Esse si combattono procurando accelerazioni del raffreddamento del getto appena colato.

**3.2.1.2. Colabilità dell’ottone**

Le leghe rame zinco sono comunemente chiamate ottoni e sono divise in molte differenti categorie a seconda della loro composizione. Lo zinco è l’elemento legante più utilizzato nelle leghe di rame per il suo basso costo e le ottime proprietà che presenta la lega solidificata. Aggiunte crescenti di zinco induriscono il rame sebbene in misura minore di quel che non faccia lo stagno nei bronzi a parità di proporzioni. Le proprietà meccaniche degli ottoni, resistenza ed allungamento, sono superiori a quelle dei bronzi, mentre assai più bassa è la durezza. Solitamente vengono usati per la costruzione di pezzi non molto sollecitati, specialmente a frizione, e che lavorano a bassa temperatura. In aggiunta allo zinco gli ottoni possono contenere stagno, piombo, ferro, alluminio, nickel, silicio e bismuto. Lo zinco è contenuto fino al 36% in peso e viene utilizzato per la produzione di leghe che hanno un singola fase strutturale chiamata ottone α (Figura 3.9). Se lo zinco presente all’interno della lega ha percentuali maggiori, la struttura della lega diventa ottone α –β(Figura 3.10). Quando in lega entrano esclusivamente due elementi si parla di ottoni binari, altrimenti, se entrano anche altri elementi di alligazione, si parla di ottoni speciali. Nell’utilizzo industriale entrano però in pratica tre grandi gruppi, il 70%Cu-30%Zn per lavorazioni meccaniche a freddo; il 67%Cu33%Zn per getti in genere; il 60%Cu-40%Zn o metallo Muntz per lavorazioni di deformazione plastica a caldo. Con l’aumentare del tenore di Zn aumenta la durezza e la resistenza della lega, per contro diminuisce la plasticità, la conduttività elettrica e termica. Di seguito è riportato il diagramma di stato Cu – Zn (Figura 3.8).



**Figura 3.8**. Diagramma di stato Cu - Zn.

Il diagramma di fase mostra le principali fasi che si possono formare. Questa tesi studia il comportamento delle leghe che sono localizzate tra il 35 e il 40% di contenuto di zinco. Come evidente dal diagramma, queste leghe hanno un intervallo di solidificazione di circa 50°C. La solidificazione comincia già ad alte temperature con la formazione di fase α. Dopo la solidificazione peritettica viene raggiunta la fase che si formerà insieme alla fase α. Con le leghe in questione la fase finale per l’ottone starà all’interno della fase α. La fase βritornerà ad essere fase α quando la temperatura della lega precipiterà velocemente verso la temperatura di transizione. Questa temperatura di transizione dipende dalla composizione della lega e può essere usata per determinarne la composizione. Il diagramma di stato rivela quindi la presenza nello stato solido di tre fasi distinte α, β, γ. La fase α è costituita da reticolo cristallino che conserva la struttura cubica a facce centrate del rame, nella quale alcuni atomi di rame sono stati sostituiti da altrettanti atomi di Zn. Questa fase conserva ancora una buona plasticità a freddo in quanto è duttile. La fase β è costituita da una soluzione solida di Zn in Cu nella quale però il reticolo cristallino del Cu si è trasformato da cubico a facce centrate in cubico a corpo centrato per permettere una maggior ricettività di atomi di Zn. Gli atomi contenenti la fase β sono quindi essenzialmente ottoni da deformazione plastica a caldo, questa fase non è duttile. La fase γ non presenta alcun interesse pratico per le non buone proprietà meccaniche che induce negli ottoni. Gli ottoni saranno quindi sempre costituiti da fase α o da fase α + β in quantità variabili. Le proprietà meccaniche dei due costituenti a temperatura ambiente sono opposte e complementari.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 3.9**. Micrografia di ottone α, Zn fino al 33%. | **Figura 3.10**. Micrografia di ottone α+β, Zn fino al 39% circa. |

È possibile fare un distinguo degli ottoni α, infatti, vengono definiti ottoni rossi se composti da basso tenore di zinco dal 5 al 20%, ed ottoni gialli se la percentuale di zinco presente nella lega va dal 20 al 33%.

Le leghe del gruppo Cu-Zn sono in genere colate “direzionalmente” grazie a canali di apporto ausiliari atti a migliorare il riempimento dello stampo nelle zone critiche come le variazioni di sezione, gli angoli o le forme particolari. Occorre prestare molta attenzione al possibile passaggio di idrogeno gassoso in soluzione durante la permanenza ad alta temperatura della lega e durante la colata, oltre che, all'eventuale evaporazione di alliganti eventualmente da reintrodurre nel materiale prima della solidificazione. Nel caso in cui si lavori con leghe Cu-Zn, quando si controlla la temperatura prima della colata, in aggiunta alla lega rame-fosforo, si deve prevedere un’aggiunta anche di zinco puro necessario a rimpiazzare quello che evapora durante la fusione ed il mantenimento a temperatura.

Tra gli elementi più comunemente aggiunti agli ottoni, con le specifiche proprietà che ne conferiscono, troviamo il *ferro* che aumenta la durezza e la resistenza dell’ottone affinandone il grano cristallino. Si aggiunge in quantità variabili dallo 0.5 al 2% sottoforma di leghe ferro-rame, ferro-zinco, in tenori superiori allo 0.5% precipita come fase separata che rende particolarmente corrodibile la lega. Il *manganese* agisce come il ferro affinando il grano cristallino, si aggiunge in tenori del 2÷3% ed ha una energica azione disossidante. L’*alluminio* aumenta la resistenza meccanica e la durezza, migliora la resistenza alla corrosione ma soprattutto rende la lega più fluida, si aggiunge in tenori fino al 3%. I migliori risultati di resistenza meccanica si ottengono con aggiunte contemporanee di Fe e Al. Il *silicio* col 5% ha effetto analogo all’alluminio ma ancora più accentuato. Lo *stagno* 1% aumenta la resistenza alla corrosione all’acqua di mare. Il *nichel* aumenta la tenacità e ne facilita la colabilità, entra in lega in tutte le percentuali ed aumenta la resistenza alla corrosione. Il *piombo,* nelle giuste percentuali, migliora le proprietà di colata delle leghe oltre che la tenuta a pressione. Non entra in lega con le leghe di ottone forma quindi una fase separata che solidifica per ultima, il fenomeno viene trovato a bordo grano e nelle aree interdendritiche. Questa caratteristica permette al piombo di migliorare la solidità della colata delle leghe di rame attraverso il riempimento dei pori che si formano durante la solidificazione, rendendo più facile la colata in pressione.

Nel procedimento di fusione dell'ottone, la preparazione è più facile di quella del bronzo. Nelle ordinarie fusioni al crogiolo, quando si prepari il metallo "di prima lega", si fonde inizialmente il rame coperto da uno spesso strato di carbonella, e lo si surriscalda a 1150°C. Indi, tolto il crogiolo dal forno, si fanno rapidamente le aggiunte di zinco che sarà stato, nel frattempo, preriscaldato, si rimescola bene e si cola a 1000°C circa. Non occorre fare disossidazione del rame con fosforo o altri riducenti, poiché lo zinco stesso agisce in tal senso. Se l'ottone si fabbrica utilizzando anche del rottame, si fonde dapprima il rame sotto il carbone, si aggiungono poi i rottami ed infine lo zinco per le correzioni necessarie.

**3.2.1.2.1. Ottoni da colata al piombo**

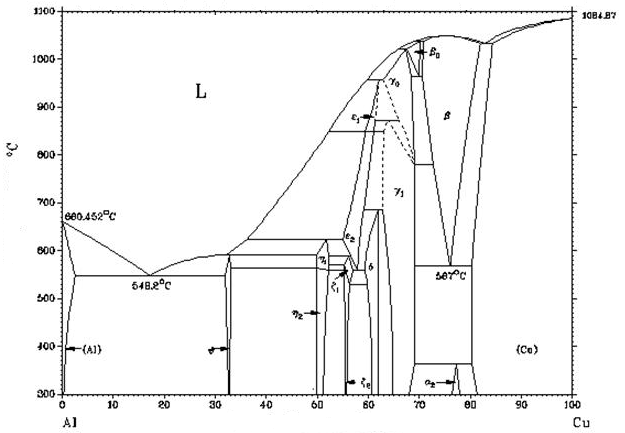
Il piombo è utilizzato in vari settori e gli ottoni al piombo rappresentano un materiale di grande consumo. Una buona qualità della lega Cu-Zn-Pb richiede una distribuzione omogenea e fine del piombo che è favorita da un raffreddamento, quindi da una solidificazione, molto veloce. Ciò si ottiene facilmente con il sistema di colata semicontinua o continua. Le materie prime con le quali si producono queste le leghe sono in genere rottami da riciclo occorre dunque, per ottenere una buona lega, effettuare cariche nei forni fusori controllate.

La pressofusione è principalmente utilizzata, in quanto adatta, per colare differenti tipi di ottoni gialli. Oggi si fanno strada gli ottoni a basso contenuto di piombo per la necessità di ridurre od eliminare completamente il piombo dalle leghe nei prodotti che vengono a contatto per esempio con l’acqua potabile. Sebbene le quantità di piombo usato nelle leghe è basso, c’è la preoccupazione che il piombo si possa dissolvere nell’acqua causando problemi di salute attraverso il suo accumulo nel corpo durante il corso di una vita. La scelta di abbassare i contenuti di piombo in questi prodotti ha origine in America, in Europa ed altri continenti non vi sono attualmente particolari restrizioni sul contenuto di piombo il quale è diventato comunque un argomento di discussione in molti paesi. Le leghe a basso contenuto di piombo hanno diverse proprietà se comparate alle leghe al piombo attualmente utilizzate. Le temperature di liquidus e solidus delle leghe a più basso contenuto di piombo sono maggiori di quelle con contenuto convenzionale. Queste spesso causano, nelle leghe a basso contenuto, anche la solidificazione prematura, già durante il ciclo di colata provocando problemi di riempimento e di qualità. A causa delle elevate temperature di colata e solidificazione, il controllo delle stesse diventa sempre più complicato seppur cruciale, infatti, la mancanza di piombo sembra renda difficoltosa la tenuta della pressione in quanto non vi è alcuna fase che riempirebbe i pori durante il processo di solidificazione. La lavorabilità delle leghe di ottone giallo a basso tenore di piombo è spesso peggiore di quella delle leghe con piombo, ciò è la causa della mancanza di inclusioni e di lubrificazione secca che la struttura con inclusioni di piombo può fornire.

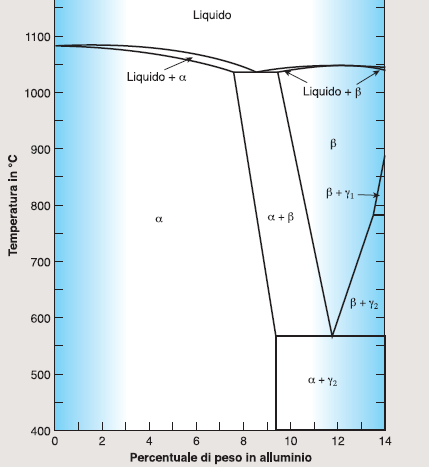
Ci sono molte leghe attualmente disponibili nell’industria dove il piombo negli ottoni è stato rimpiazzato da altri elementi leganti. Come precedentemente menzionato, il bismuto è stato utilizzato a tal proposito il piombo nella colata di leghe per motivi di salute ed ambientali. Il bismuto ha anch’esso alcune proprietà tossiche, ma sono meno significative infatti esso non si accumula nel corpo umano. Questo lo rende più sicuro per usi ed applicazioni idrauliche dove c’è la possibilità che qualcuno degli elementi leganti si dissolva nell’acqua con lunghi tempi di utilizzo. L’aggiunta di bismuto nelle leghe può causare infragilimento dovuto alla tendenza di accumularsi a bordo grano, questa tendenza può essere evitata se la concentrazione di zinco nella lega è sufficientemente alta.

**3.1.2.3. Colabilità dei cuprallumini**

Le leghe di rame in cui il principale elemento aggiunto è l’alluminio vengono generalmente chiamate bronzi all’alluminio. L’alluminio è presente con un tenore che varia dal 5 al 14% e molto spesso è accompagnato da ferro, silicio, nichel o manganese. Sono caratterizzate da eccellenti proprietà meccaniche e da una altrettanto eccellente resistenza alla corrosione. Quest’ultima è dovuta alla formazione superficiale di una patina protettiva ricca in ossido di alluminio che ha la capacità di generarsi in tempi molto rapidi, è sottile, molto solida e ben aderente alla lega sottostante. Per questo motivo i bronzi all’alluminio vengono impiegati in ambienti molto aggressivi come quello marino, sotto condizioni di stress meccanico che altri metalli o leghe comuni non sarebbero in grado di sopportare. Va segnalato inoltre che sono le leghe di rame con la migliore resistenza al tarnishing (perdita di lucentezza). Tali caratteristiche si ottengono variando opportunamente le percentuali degli elementi alliganti così da ottenere le specifiche proprietà per l’impiego a cui sarà sottoposto il materiale. L’uso di alcuni elementi, normalmente presenti anche in percentuali elevate nei normali bronzi, è da considerarsi totalmente dannoso nei bronzi all’alluminio in quanto precludono alcune interessanti lavorazioni di deformazione. La purezza delle composizioni degli alliganti o, quantomeno, la sicura esclusione di elementi dannosi, limita la possibilità di riciclo dei rottami e rappresenta, per il fonditore, una problematica per ottenere un materiale con le performance desiderate. I bronzi all'alluminio possiedono, in funzione della loro composizione chimica, elevate caratteristiche meccaniche, buona lavorabilità alle macchine utensili, buona saldabilità, e valori di densità minima fra tutti i bronzi. La Proprietà fisica di maggior interesse è la densità. La presenza dell’alluminio (densità 2,7 kg/dm3) alleggerisce molto la lega: un CuAl8 ha una densità di 7,8kg/dm^3 mentre un CuAl10Fe5Ni5 ha una densità di 7,5kg/dm^3: sono sensibilmente più leggeri del rame (8,94) e dello stesso ordine di grandezza degli acciai. Molto apprezzate sono anche altre caratteristiche, tra cui la resistenza alla corrosione per fatica, la durezza, la resistenza meccanica e quella all’usura. Di seguito è riportato il diagramma di stato Cu - Al completo (Figura 3.11) e quello in dettaglio con percentuali di Al fino al 14% (Figura 3.12).



**Figura 3.11.** Diagramma di stato Cu - Al completo.



**Figura 3.12.** Diagramma di stato Cu – Al con percentuale di Al fino al 14%.

Dal diagramma di stato rame alluminio notiamo immediatamente il ristrettissimo intervallo solidus liquidus, dal quale ricaviamo che la lega fusa solidifica omogeneamente, quasi alla maniera di un metallo puro. Le leghe binarie rame alluminio fino all’8% circa sono costituite dalla sola fase α; al di sopra di questo tenore compare la fase β. Ad essere precisi, la fase β si forma solo quando il raffreddamento della lega è veloce. Sotto i 565°C compare la fase γ, termodinamicamente più stabile ma indesiderata per la sua bassa resistenza alla corrosione. Quindi i bronzi con questa struttura cristallina non trovano applicazioni pratiche nei getti o nei semilavorati. La fase γ si evita raffreddando velocemente oppure aggiungendo nichel o ferro. I CuAl con struttura α - β hanno una maggiore resistenza alla cavitazione e alla corrosione-erosione rispetto a quelli α. Se la velocità di raffreddamento è più veloce di quella dell’equilibrio stabile, come accade ad esempio nei getti colati in conchiglia, la struttura è più omogenea con conseguenti migliori caratteristiche meccaniche. Vanno evitati raffreddamenti lenti di questa lega durante la solidificazione dei getti, a meno che gli stessi non siano da sottoporre successivamente a trattamento termico.

I bronzi all’alluminio possono essere sommariamente divisi in quattro grandi famiglie:

* Contenuti minori dell’8% di alluminio, aventi una struttura cristallina α (cubica a facce centrate, la stessa del rame): mantengono una buona duttilità e sono adatti per lavorazioni a freddo.
* Contenenti di alluminio dall’8 all’11% con struttura α - β, spesso contengono nichel e ferro e migliorano la resistenza meccanica. La comparsa della fase beta (cubica a corpo centrato) aumenta la durezza, quindi è indicata per le lavorazioni a caldo e fusioni;
* Per tenori di Al compresi tra il 9 e il 16% la struttura può essere mono o bifasica a seconda della temperatura alla quale viene considerata la lega. Inoltre a temperature relativamente basse compare la fase γ2 (cubica a facce centrate).
* Contenuti di silicio (fino al 2%) aumentano la durezza e la lavorabilità all’utensile. Hanno una bassa permeabilità magnetica.
* Contenuti di manganese, sebbene in piccole percentuali, vantano eccellenti proprietà di fusione e saldabilità. Sviluppati soprattutto come materiale per le eliche, sono stati ormai rimpiazzati da quelli al nichel.

Materiali leganti aggiunti a questa lega hanno diversi effetti. Il *ferro* ha potere affinante sulla struttura della lega. Viene aggiunto in tenori che vanno dal 2.5 al 6% e nelle leghe più pregiate viene accompagnato da tenori di nickel variabili dal 3 al 5.5%. Il manganese è sempre presente in piccoli tenori (0.1÷0.5%) perché viene aggiunto come disossidante nella fabbricazione della lega. In tenori superiori esplica una funzione correttiva ed in certe leghe può raggiungere concentrazioni fino al 12% associato con Ni e Fe. Il *nickel* aumenta la solubilità del Fe per cui viene sempre aggiunto quando il tenore del Fe supera il 3% (solubilità massima) altrimenti si formano dei punti preferenziali di corrosione. Il Ni aumenta la resistenza alla corrosione in acqua marina ed il limite di snervamento. Il *piombo* può essere introdotto per facilitare la lavorazione meccanica, non deve però superare tenori dello 0.5% altrimenti può avere effetti nocivi sulla corrodibilità

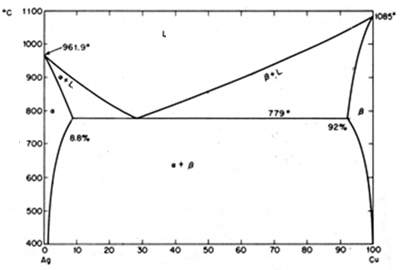
I cuprallumini vengono normalmente prodotti sotto forma di getti, fucinati e stampati in relazione alla forma geometria e specifico impiego finali. Il cupralluminio a bassa durezza è adatto alla costruzione di stampi di dimensioni limitate e di modesto impegno, consente una facile lavorabilità alle macchine utensili mantenendo apprezzabili caratteristiche di scorrevolezza e soddisfacente durata. Questa è prevalentemente utilizzata per stampi per imbutitura lamiere di limitato spessore, modeste dimensioni e ridotto uso. Il cupralluminio ha elevata durezza, generalmente è utilizzato per la costruzione di stampi impegnativi per elevate produzioni. Nonostante l'elevata durezza è lavorabile alle macchine utensili con sufficiente facilità purché vengano rispettati alcuni fondamentali parametri determinati dalla fragilità. Lega prevalentemente utilizzata da costruttori di stampi di imbutitura acciaio inox. I cuprallumini di maggiore durezza contengono al loro interno, percentuali dal 2,0 al 2,6% di cobalto. Il cupralluminio con elevati valori di plasticità, di allungamento e medi valori di durezza, hanno buona resistenza alla corrosione e sono adatti per impieghi in impianti chimici, per componenti per motoristica in genere come bielle, leve, bilancieri e forcelle per cambi di velocità. Si producono inoltre molti particolari per macchine idrauliche come giranti e corpi pompa, sedi e steli valvole, valvole e parti di turbine, ralle reggispinta e anelli di basamento, cuscinetti e bronzine sollecitate, madreviti, ingranaggi e ruote elicoidali, piastre di scorrimento nell'industria meccanica anche esposta in ambiente marino.

La lega rame alluminio dal punto di vista fusorio ha un comportamento assai simile a quello dei metalli puri. Possiede cioè un intervallo di fusione assai ristretto. Se questo aspetto è positivo in quanto non si verificano le dannose liquazioni che si hanno invece coi bronzi comuni, è negativo dal punto di vista del ritiro. La buona riuscita delle tecniche di colata/solidificazione è favorita dal ristretto intervallo solidus-liquidus della lega, che rende più omogeneo e compatto il pezzo ottenuto. Sono necessari comunque accorgimenti nella progettazione dello stampo e nel processo di solidificazione per evitare la formazione di difetti interni: per esempio, bisogna impedire che la scoria di ossido di alluminio, che si forma istantaneamente quando il metallo liquido entra a contatto con l’aria, resti intrappolata nel pezzo durante la colata, o che si formino cavità da ritiro a seguito di raffreddamenti non ben eseguiti. Dopo la solidificazione di molte leghe α - β, può essere necessario effettuare trattamenti termici per intervenire sulla microstruttura della lega e conferire una migliore resistenza alla corrosione. Con i bronzi all’alluminio si possono ottenere dei getti compositi, in cui la nostra lega viene solidificata intorno ad un altro componente metallico, per esempio un acciaio. In questo modo l’anima interna di acciaio conferisce robustezza al CuAl esterno, il quale provvede a dare al prodotto finale la caratteristica desiderata (antiscintilla, resistenza alla corrosione, all’usura ecc.).

Il processodi *fusione* *dei cuprallumini* viene effettuato in diverse maniere. Il rame può essere aggiunto sotto forma di catodi o lingotti, l’alluminio come lingotti o leghe madri. Altri elementi in percentuali minori come ferro e nichel sono aggiunti come graniglia, chiodi o sfridi, ma anche come leghe madri che si dissolvono più velocemente. Il liquido ottenuto può essere versato direttamente nello stampo o solidificato in lingotti, da fondersi successivamente. La ri-fusione di questi lingotti sebbene più dispendiosa, permette un migliore controllo nella fusione della lega. La fusione deve essere eseguita il più velocemente possibile, sotto un atmosfera leggermente ossidante, con l’accortezza di evitare surriscaldamenti che porterebbero alla presa di gas (pick-up). Quando il metallo liquido entra a contatto con l’aria si forma istantaneamente una scoria solida di ossido di alluminio, che non deve rimanere intrappolata nel pezzo durante la colata. Questa scoria protegge la lega liquida, che pertanto non ha bisogno di galleggianti protettivi, almeno nelle operazioni di fusione di dimensione contenuta. Si noti che non sono necessari disossidanti, l’alluminio ha già una altissima affinità per l’ossigeno e quindi la lega contiene già in sé il disossidante necessario. La disossidazione diventa invece necessaria quando al rame si aggiunge il manganese prima dell’alluminio. La presenza della scoria, in un certo senso benefica poiché funge da copertura del bagno di fusione, diventa problematica nel momento della colata, poiché può restare intrappolata nel pezzo solido portando ad un peggioramento delle caratteristiche meccaniche e della lavorabilità. Per questo è necessario ridurre al minimo la turbolenza ed i rimescolamenti della lega fusa. Le proprietà meccaniche dipendono molto dalle tecniche di colata e dai tempi di raffreddamento. Infatti un raffreddamento relativamente veloce, come nel caso di colata continua, centrifuga o pressofusione rafforza le proprietà meccaniche. Dal momento che lo spessore di un getto influenza il raffreddamento, i progettisti devono tenere conto che aumentando lo spessore diminuiscono in generale le proprietà meccaniche come lo snervamento, il carico di rottura, la durezza.

**3.1.2.4. Colabilità della lega rame argento**

Può essere suddiviso in rame a basso contenuto di Ag (0.02 ÷ 0.12%) e rame ad alto contenuto di Ag (0.12 ÷ 0.25%). Il rame a basso contenuto di Ag può ancora essere suddiviso in rame con ossidulo e rame senza ossidulo. Il rame all’argento pur conservando ancora elevate conduttività elettrica, essendo l’argento uno dei metalli che influisce meno su di essa, ha il vantaggio rispetto al rame puro di avere un punto di ricristallizzazione più elevato di questo. Infatti se il rame ricristallizza già a 175°C il rame all’argento non inizia il fenomeno fino a 300°C, per cui è particolarmente adatto per quelle applicazioni nella quali anche dopo la brasatura dolce il rame debba conservare elevata resistenza meccanica ( es. di radiatori per automobili, collettori di dinamo ecc.). Il tipo di rame all’argento senza ossidulo evita gli inconvenienti della fragilità per saldature in ambiente di idrogeno. Di seguito il diagramma di stato Cu-Ag (Figura 3.13).

****

**Figura 3.13.** Diagramma di stato Cu . Ag.

**4. PROGETTARE E SIMULARE PER PRESSOFUSIONE A BASSA PRESSIONE**

La colata, processo dal quale si sono sviluppati nel corso degli anni tutti i vari metodi di pressofusione, è uno dei più vecchi sistemi di produzione ma anche uno dei meno compresi. In buona sostanza i principi base sono semplici, ma se visti più nel dettaglio rischiano di non esserlo a causa delle numerosissime variabili in gioco da tenere sotto controllo. Certamente oggi lo sviluppo e l’evoluzione di elettronica ed informatica ci vengono in aiuto in maniera determinante, in quanto le potenze di calcolo elevate dei computer hanno avuto negli ultimi vent’anni sviluppi impensabili, migliorando la precisione ed accorciando i tempi di calcolo impiegati per realizzare le simulazioni. La simulazione è un potente mezzo che ci viene in aiuto per valutare i casi reali quotidiani anche con elevato grado di complessità, riducendo enormemente tempi e costi. Il potenziamento della precisione della simulazione grazie all’evoluzione dell’informatica e ad un personale qualificato ed esperto in materia, è ultimamente cresciuto significativamente, tant’è che la si affida alla conoscenza dei parametri della simulazione. Se i dati di programmazione iniziali sono incorretti, i risultati saranno anch’essi inesatti. La realtà è pressoché impossibile da riprodurre nella sua completezza, ne risulta scontato che per quanta accuratezza si impieghi nell’acquisizione e nell’immissione dei dati, i parametri della simulazione non saranno mai assolutamente esatti, è molto importante per questo prenderli il più precisamente vicini ai valori corretti. Quanto più i valori sono vicini a quelli reali, tanto più la simulazione darà una corretta e precisa rappresentazione del mondo reale. George E.P. Box ha dichiarato che: ”all models are wrong, some are useful” “tutti i modelli sono sbagliati, alcuni sono utili”. L’importanza della simulazione nella colata in conchiglia a bassa pressione, è intervenuta in aiuto in maniera fondamentale agli sforzi fatti dalle aziende per aumentare l'efficienza e la qualità della loro produzione. Il corretto uso della simulazione della colata può ridurre significativamente i tempi di progetto e di processo attraverso significativi risparmi, essa, sostituisce infatti costosi e lunghi tempi di test pratici di colata. La progettazione è una fase antecedente al processo, ma va ricordato che la simulazione può anche essere posta in parallelo alle fasi di colata vere e proprie, così da ottimizzare in maniera diretta caratteristiche e proprietà e massimizzare i rendimenti.

Per sviluppare un processo ottimizzato occorre conoscere al meglio le proprietà delle leghe che si andranno a colare, in quanto occorre prestare la massime attenzione al materiale da utilizzare per produrre la conchiglia. I principali tipi di leghe di rame che in genere possiedono elevata conduttività richiedono oltre che una loro scelta ponderata, un trattamento specifico. La fusione dei bronzi e degli ottoni pone problemi particolari, il rame fuso, infatti, sprigiona sia ossigeno che idrogeno e, nella fase di solidificazione, questi due elementi possono combinarsi formando vapore acqueo responsabile della porosità del getto. In assenza di ossigeno, anche il solo idrogeno può provocare la porosità gassosa. Le leghe contenenti alluminio formano pellicole di ossido che possono dare luogo a problemi nei getti. Con alcune altre leghe, le tracce di alluminio possono causare difetti e richiedere la rimozione dell‘alluminio residuo. Per ovviare a questi inconvenienti, sono state messe a punto speciali tecniche di fusione e trattamento del metallo: flussaggio, degasaggio e disossidazione. Di fronte alle crescenti esigenze qualitative dei clienti, la tecnologia di fonderia deve essere quindi in grado di mantenere il passo. Investire nelle attività di ricerca e sviluppo di soluzioni innovative per risolvere i problemi di oggi e di domani, diventa fondamentale.

**4.1. Progettazione della conchiglia**

Prima di procedere con la simulazione vera e propria per mezzo di software studiati appositamente per questo tipo di processo occorre fare alcune considerazioni sullo stampo o conchiglia. Essa è un elemento fondamentale del sistema da esaminare in quanto deve possedere determinate caratteristiche non sottovalutabili e nel caso in cui debba svolgere un azione di analisi attiva del processo, essa, viene studiata, preparata ed attrezzata allo specifico scopo. Già questa può essere considerata una fase della simulazione della colata in quanto si inizia con la definizione della geometria. Oggi le geometrie per i processi di simulazione sono ragionevolmente semplici da definire, come i dati geometrici iniziali della colata che molto spesso sono disponibili grazie al fatto che la maggior parte delle colate è progettata e disegnata con l’aiuto di programmi CAD. Questi solitamente possono fornire poi ai programmi di simulazione l’esatta geometria.

La progettazione di una conchiglia da pressofusione è un’operazione che necessita di un’esperienza considerevole. Essa richiede al progettista una profonda ed accurata conoscenza delle fasi relative al ciclo di produzione, ma soprattutto, si devono rispettare le definizioni geometriche del pezzo affinché lo stampo possa essere realizzato nel modo desiderato. Solo attraverso una precisa conoscenza del processo di stampaggio è possibile costruire uno stampo ottimizzato, in grado cioè di rispondere adeguatamente alle esigenze qualitative ed economiche del ciclo di produzione. Il processo di pressofusione ha le sue caratteristiche ed anche di queste si deve tener conto durante la progettazione di stampi destinati alla realizzazione di componenti pressofusi.

Poiché la pressofusione è ancora relativamente giovane vi sono ancora ampi margini di miglioramento nella progettazione degli stampi ed è anche in tal senso che gli sforzi della tesi si sono orientati. I settori a cui si rivolge la pressofusione di leghe di rame va dall’automobilistico, all’impiantistico, al navale senza trascurare settori di componentistica per l’arredo. Da questi elementi si denota che l’esperienza non è un elemento trascurabile e che si sviluppa nel corso di anni di lavoro, solo così si possono risolvere nel modo migliore le problematiche di produzione. È proprio per risolvere queste ultime che la progettazione dello stampo deve partire da una corretta impostazione del pezzo da eseguire, le cui geometrie teoriche, che normalmente sono definite dal committente, devono essere verificate riviste e modificate. Tra il progetto geometrico e l’officina, occorre essere in grado di interporre fasi intermedie come la prototipazione del pezzo e l’analisi FEM, per verificare carichi di rottura e calcolare i canali di colata, supportata dalla profonda conoscenza dei parametri fisici che intervengono nei processi di pressofusione. È quindi utile avvalersi di software 3D per lo sviluppo virtuale di componenti e stampi. Tutto l’insieme fornisce precisione e rapidità progettuale, ma è anche una metodologia che consente di analizzare meglio il pezzo che deve essere realizzato riducendo i tempi per la progettazione dello stampo in ogni suo dettaglio strutturale. Per ottimizzare uno stampo è necessario che il componente non presenti criticità geometriche e, pertanto, la prima operazione che normalmente si compie è svolgere quella che viene definita ingegnerizzazione del pezzo, fase nella quale vengono messi a punto raccordi spessori ed angoli di sformo, con l’eliminazione di sottosquadri laddove ciò sia possibile. Tutte queste operazioni sono supportate dal software di modellazione 3D recentemente adottato, in affiancamento ad altri software, per le attività di progettazione del componente e dello stampo. Attraverso le funzioni di modellazione del software si è in grado di ottimizzare anche le geometrie dove richiesto. Il modello 3D può anche essere utilizzato per l’analisi tramite FEM. Inoltre è possibile definire e valutare i canali di colata, la velocità del materiale, le sezioni di apertura, il tipo di pressa da impiegare ed altro ancora.

Operativamente una conchiglia da pressofusione deve avere una durata intorno ai 30.000 cicli per ogni particolare prodotto che nel caso delle leghe di rame solitamente ha peso tra 3 e 5kg. Il progetto della conchiglia deve privilegiare spessori uniformi, geometrie semplici per la facilità di fabbricazione ma anche nervature e spessori che garantiscano la necessaria resistenza meccanica. Elemento da non dimenticare sono i sovrametalli tipici che dipendono direttamente dal materiale da colare. Di seguito sono riportati quelli per le leghe di rame (Tabella 4.1).

**Tabella 4.1.** Valori indicativi dei sovrametalli di lavorazione e delle tolleranze realizzabili su getti di leghe di rame col procedimento di fusione sotto pressione.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***Dimensioni nominali (mm)*** | ***Sovrametalli di lavorazione (mm)*** | ***Tolleranze (mm)*** |
| < 25 | 0,5 | +/- 0,07 - 0,17 |
| 25 - 50 | 0,5 - 0,7 | +/- 0,11 - 0,22 |
| 50 - 100 | 0,6 - 1 | +/- 0,15 - 0,32 |
| 100 - 200 | 0,8 - 1,5 | +/- 0,22 - 0,52 |
| 200 - 300 | 1,2 - 2 | +/- 0,35 - 0,72 |

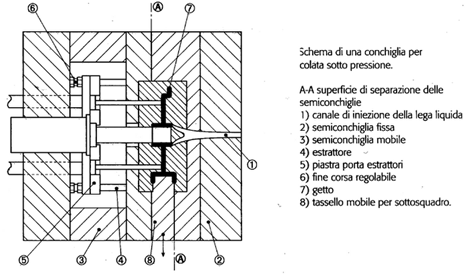
È utile per lo sviluppo presente e futuro della tecnica di pressofusione prevedere anche spazi sufficienti per il posizionamento di strumentazione atta ad acquisire informazioni. Ogni stampo, dovrebbe prevedere un controllo della temperatura di colata tramite pirometro ad immersione ed un controllo della temperatura dello stampo in cui si cola la lega per mezzo di termocoppie. Il posizionamento dell’attrezzatura all’interno dello stampo va valutata appositamente. Occorre scegliere i punti di misurazioni della temperatura tali e sufficienti da essere strategici ed il più possibili utili sper posizione, consapevolmente al fatto che possono essere danneggiati. Soluzione migliore è quella di posizionare la strumentazione sul retro delle piastre della conchiglia aggiungendo una cavità che possa essere sigillata da una piastra. Le sedi delle termocoppie ed eventuali loro fili non devono impedire il regolare ciclo di lavorazione e si dovrebbero muovere con la conchiglia in tutte le diverse fasi del ciclo di colata. Lo scopo principale del posizionamento dei sensori è di fornire sufficienti dati termici da differenti zone della conchiglia come canale di ingresso e pezzo fuso. I rilevatori dei dati infine hanno bisogno di essere protetti dal calore e dall’umidità, devono inoltre essere separati dalla conchiglia ed isolati. Il luogo dei misuratori va scelto quindi vicino alla conchiglia, ciò anche per permettere di avere fili e collegamenti più corti possibili.

**4.1.1. La conchiglia**

La conchiglia è realizzata in due valve con materiale metallico avente buona lavorabilità alle macchine utensili, elevata resistenza all’usura ed agli shock termici, limitata dilatazione termica e buona conducibilità termica. Gli angoli di sformo, importantissimi sono standard circa tre gradi come per tutte le leghe da fusione. Fondamentale inoltre la lubrificazione della conchiglia talvolta si esegue una verniciatura con rivestimenti particolari. Queste due soluzioni permettono di controllare il calore, lo scorrimento della lega, il distacco del pezzo solidificato, ottenere buona finitura superficiale ed aumentare la durata della conchiglia. La scelta del rivestimento-lubrificante dipende dal tipo di forma utilizzato. Rivestimenti a base d‘acqua o di alcool sono indicati per le forme e le anime in sabbia. I prodotti a base acquosa sono utilizzati con le forme e le anime generalmente essiccati in forno. I prodotti a base di alcool sono studiati per le forme e le anime che non richiedono l‘essiccazione. Per le forme permanenti i rivestimenti sono miscele di materiali refrattari isolanti e lubrificanti con leganti a base di silicati e sono espressamente formulati per soddisfare svariati requisiti di prestazioni e produttività. Quelli indicati per la colata in conchiglia a bassa pressione delle leghe di rame sono stati studiati in particolare per:

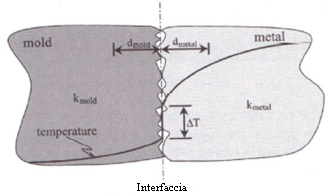
* garantire un buon controllo dell‘isolamento;
* facilitare il distacco del getto dallo stampo;
* favorire il riempimento delle sezioni sottili;
* assicurare una buona finitura dei getti;
* proteggere la superficie dello stampo a vantaggio della sua durata.

Disponibili sotto forma di liquido concentrato o di pasta, i rivestimenti per stampi permanenti si diluiscono facilmente in acqua per ottenere la consistenza richiesta dalle singole fonderie. Infine per agevolare l’estrazione del pezzo dalla conchiglia vi sono generalmente estrattori automatici. Di seguito la sezione di una conchiglia da pressofusione (Figura 4.1).



**Figura 4.1.** Sezione di una conchiglia per pressofusione completa.

Un elemento richiamato numerose volte nella trattazione della progettazione della conchiglia da pressofusione è il trasferimento del calore. Esso è legato al *coefficiente di scambio termico* proprio dei materiali, e nel caso della pressofusione, di quello dovuto al contatto tra le superfici della lega fusa e dello stampo. Il trasporto del calore durante il processo di colata e di raffreddamento è molto importante e dipende da diversi fattori, molti già citati. Spesso si usano delle simulazioni al calcolatore che attraverso metodi FEM analizzano proprio lo scambio del calore. Un banale immediato esempio della praticità del FEM è il suo utilizzo nel caso in cui si vogliano ottenere delle sezioni per colata sottili, in queste particolari aree, il trasporto di calore sarà molto rapido e la solidificazione del metallo sarà più veloce. Occorre per questo aumentare la velocità del flusso, con conseguente aumento della turbolenza e grazie alla simulazione FEM è possibile trovare il giusto compromesso. Il coefficiente di scambio termico attraverso le diverse superfici è tra i parametri fisici più importanti per la simulazione della colata in conchiglia permanente, esso determina la velocità di raffreddamento della colata, e se il coefficiente non è corretto, l’intera simulazione risulterà errata. Il coefficiente di scambio termico determina la velocità con il quale il calore si trasferisce tra le interfacce di conchiglia e metallo fuso ed è funzione della temperatura o del tempo. La difficoltà di determinare il corretto coefficiente di scambio termico deriva dal fatto che esso non è costante ma dipende dalle due interfacce. L’interfaccia del metallo della conchiglia molto comunemente ha il suo valore massimo quando il metallo colato è in forma liquida ed il valore scende in alcune zone durante il raffreddamento. Le cause della sua variazione possano essere diverse, una è la formazione di uno spazio d’aria isolante che si crea tra la conchiglia ed il volume del metallo della colata durante la solidificazione. Questo strato d’isolamento d’aria influenza negativamente la conduzione del calore tra le interfacce. Ci sono altri coefficienti di scambio termico da considerare oltre quello all’interfaccia tra conchiglia e metallo fuso nella pressofusione a bassa pressione, ma al fine dello studio pratico sono meno influenti. Di seguito viene illustrato una superficie d’interfaccia tra conchiglia e metallo fuso con un possibile andamento del coefficiente di scambio termico (Figura 4.2).



**Figura 4.2**. Andamento del coefficiente di scambio termico nell’interfaccia tra conchiglia e metallo fuso.

**4.1.2. Materiali per la conchiglia**

La vasta maggioranza dei componenti di pressofusione a bassa pressione è prodotta in alluminio ed i più comuni materiali da conchiglia sono gli acciai per utensili. Mentre l’acciaio può essere il miglior materiale per le colate di alluminio, le colate delle leghe di rame hanno temperature di fusione troppo elevate per le conchiglie in acciaio che si consumerebbero troppo velocemente. Le conchiglie in acciaio al carbonio sono adatte per le colate di leghe di rame solo quando i volumi di colata annuali sono abbastanza bassi. Approssimativamente la durata stimata delle conchiglie in acciaio al carbonio è soltanto circa 5000 colate a seconda della macchina per colata. La ragione principale per la limitata vita delle conchiglie a base di acciai al carbonio nelle colate di leghe di rame è la loro bassa conduttività termica, ciò provoca elevate differenze di temperatura all’interno della conchiglia, causandone lacerazioni. Le conchiglie a base di leghe di rame sono di gran lunga più adatte per le colate di leghe di rame in quanto durano molto più a lungo. I più comuni materiali per conchiglia utilizzati nelle colata di leghe di rame sono a base di rame al berillio, che solitamente fornisce una vita media di 50000 colate. In aggiunta le conchiglie a base di rame possono essere rilavorate diverse volte, allungando la vita alla conchiglia con minimi costi aggiunti. Le conchiglie in rame producono anche migliore qualità di colata. L’influenza del materiale della conchiglia potrebbe tuttavia non essere un fattore determinante nella qualità della colata quanto lo è una buona progettazione della colata stessa.

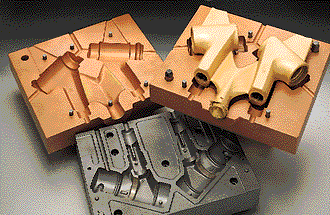
Tipicamente le leghe più utilizzate per la produzione di conchiglie di leghe di rame sono le leghe rame-cromo-zirconio, sono fortemente legate e la loro durezza, conduttività termica ed elettrica ha elevati livelli. Questa serie di proprietà rende la lega un materiale ideale per la produzione di stampi destinati alla pressofusione a bassa pressione, utensili che richiedono elevata resistenza ed eccellente conduttività termica ed elettrica. Il cromo è aggiunto nella lega per migliorare la durezza mentre riduce conduttività termica ed elettrica solo leggermente. Lo zirconio è aggiunto alla lega per fornire durezza attraverso i precipitati che si formano in solidificazione.

Le migliori leghe per la produzione di conchiglie da pressofusione sono tuttavia le leghe rame-berillio. La loro buona conducibilità termica e resistenza a fatica ne consente l’utilizzo per stampi in sistemi ad iniezione ai quali sono richieste doti di resistenza a stress termici e durezze elevate. Si producono così stampi che possono riprodurre accuratamente dettagli complicati. Da studi, sperimentazioni e test pratici di pressofusione, si è arrivati a scoprire che queste possiedono, rispetto alle leghe rame-cromo-zirconio, maggiore conduttività termica ed elettrica, ma hanno più bassa resistenza e durezza. Il miglioramento della conduttività termica può anche essere visto come uno svantaggio del materiale se usato come materiale per la conchiglia, infatti, se il materiale ha elevata conduttività termica, rimuove il calore dal metallo fuso rapidamente, facendo solidificare la colata più velocemente e causando difficoltà di riempimento della conchiglia. Questo può essere ovviato con la pressofusione, la quale consente bassi scambi di calore tra fuso e conchiglia. L’aumento della conduttività termica di questi materiali inoltre può anche causare problemi di shock termico, ciò ha l’effetto di produrre elementi fragili con conseguenti fratture nelle colate soprattutto di ottone. La ragione di questo comportamento deriva da gradienti di temperatura elevati nella colata durante la solidificazione. Le leghe di rame berillio appartengono alle leghe fortemente legate con presenza di elementi leganti sino al 3% del contenuto. Possono essere prodotte con diversi metodi, tra i più utilizzati per gli stampi le lavorazioni a caldo. Nel complesso, l’aggiunta di berillio nelle leghe di rame, ha una grande influenza sulle proprietà finali. Quando legato con il rame, promuove precipitati con significativa durezza, e mantiene a buoni livelli la conduttività termica. Le leghe di rame berillio sono utilizzate come materiali per le conchiglie che forniscono nelle colate di leghe a base di rame un aumento della resistenza. Un ulteriore utile proprietà fornita alla lega a vantaggio della colata è la riduzione di conducibilità termica della lega, ciò aiuta il riempimento corretto della conchiglia durante la colata. I prodotti delle leghe di berillio lavorati per colata in stampi, hanno elevatissima qualità anche superficiale in quanto sfruttano la buona fluidità che consente di ottenere geometrie anche complesse. Migliore qualità di finitura superficiale oltre che di colata, permette di ridurre i costi delle produzioni di prodotti di consumo in cui le superfici del getto sono lucidate e rivestite elettricamente con cromo (cromatura). Nonostante le proprietà ottime, le leghe di rame berillio in questi ultimi anni, soprattutto in Europa, hanno visto diminuire il loro utilizzo a causa della pericolosità durante le lavorazioni che provocano l’emissione di gas e fumi, che, se respirati, sono causa infatti di gravi malattie dell’apparato respiratorio causando problemi polmonari anche cronici. Un altro possibile rischio di malattia provocato dall’inalazione di berillio è la natura cancerogena del berillio, il quale può originare cancro al polmone. Tra le lavorazioni considerate rischiose oltre a macinatura, taglio abrasivo, levigatura, lavorazioni mediante metodi elettrochimici, trattamenti termici ad alta temperatura e saldatura ci sono anche fusione e colata. Il limite di sicurezza è fissato in due microgrammi per metro cubo di aria. Le protezioni per i lavoratori, per evitare la sensibilizzazione da questo elemento, possono essere effettuate limitando l’esposizione a questo elemento. Ciò può essere fatto con l’installazione di adatti sistemi di ventilazione così che le concentrazioni aerotrasportate siano sufficientemente basse da eliminare ogni dannoso effetto sui lavoratori.

**4.1.2.1. Le leghe rame nickel berilio**

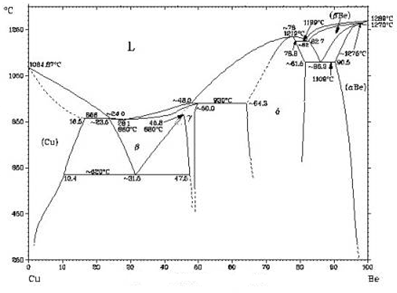
Tra le leghe più importanti va ricordata la lega CuNiBe che con aggiunta di cobalto acquisisce le caratteristiche principali favorevoli al processo di pressofusione. Le proprietà ed applicazioni delle leghe CuNiBe sono:

* La bassa suscettibilità magnetica e resistenza alla corrosione sono adatte a componenti che sfruttano bassi campi magnetici (applicazioni petrolifere, biomediche, strumenti di navigazione).
* Resistenza a fatica e resilienza vengono sfruttate in molti tipi di interruttori, controlli termostatici e relè elettromagnetici. Altri dispositivi che sfruttano queste proprietà sono quelli atti ad individuare energie vibratorie che quindi devono avere alta sensibilità ai piccoli segnali.
* Le leghe CuNiBe hanno una buona combinazione fra resistenza alla corrosione e proprietà fisico-meccaniche. Sono immuni agli attacchi corrosivi in ambienti ricchi di cloro e zolfo, inoltre possono subire Stress-corrosion cracking solo in presenza di ossigeno, ammoniaca e umidità. Sfruttando le proprietà di queste leghe possono essere prodotti utensili da lavoro manuale con particolari caratteristiche alcune delle quali, la non produzione di scintille durante usi violenti. Il fatto che non si magnetizzano, ne caratterizzano l’uso in particolari ambienti od in presenza di atmosfere contaminate (esempio, manutenzione in presenza di gas infiammabili). Queste leghe sono però molto sensibili all’Acetilene che a contatto con il Cu, può reagire formando un Acetilide esplosivo. In questo tipo di ambiente si dovrà aver cura di usare utensili con un tenore di Cu minore del 50% (leghe di Monel).
* La buona conducibilità termica e resistenza a fatica consentono l’utilizzo del CuBe per stampi in sistemi ad iniezione per i quali sono richieste anche doti di resistenza a stress termici e durezze elevate. Si producono così stampi che possono riprodurre accuratamente dettagli complicati (Figura 4.3).
* La lega CuNiBe viene utilizzata per applicazioni a temperature criogeniche alle quali rimane un buon conduttore sia elettrico che termico, conservando anche una buona resistenza a snervamento.



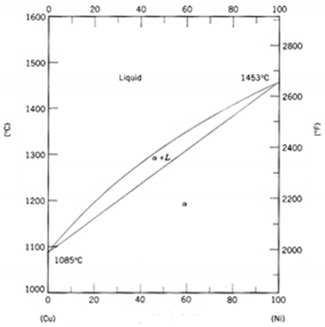
**Figura 4.3.** Stampi per sistemi di stampaggio ad iniezione realizzati in lega CuNiBe.

Analizzando il diagramma di stato (Figura 4.4) si nota che la solubilità del Be nel Cu decresce con la temperatura, quindi queste leghe sono induribili per precipitazione attraverso solution annealing e successivo age hardening.



**Figura 4.4.** Diagramma di stato Cu - Be.

Elemento di questa lega, il nickel, aggiunto al rame, da luogo ad una famiglia di leghe destinate ad applicazioni speciali. Le leghe di rame nickel sono comunemente utilizzate nel settore petrolifero, chimico, alimentare e nell’industria casearia. L’aggiunta del nickel nelle leghe di rame migliora la resistenza meccanica, in particolare la resistenza all’erosione, e la resistenza allo scorrimento viscoso, inoltre, si hanno giovamenti anche per la tenuta a pressione della colata quando il piombo viene usato in bronzi e leghe di ottone semi rosse. Presenta ottima resistenza alla corrosione in ambienti marini (si usano in impianti di dissalazione e condensatori marini), e vengono usate anche nella monetazione (la parte “bianca” delle monete da 1 e 2 euro è costituta da un cupronickel 75-25). Spesso il nickel viene accompagnato da altri elementi, per migliorare alcune proprietà della lega: il ferro aumenta la resistenza alla corrosione e la resistenza meccanica; il manganese viene usato per disossidare e desolforare, inoltre migliora la lavorabilità; lo stagno aumenta l’elasticità. Il [cromo](http://it.wikipedia.org/wiki/Cromo) può sostituire parzialmente il ferro, aumentando ulteriormente le caratteristiche meccaniche; il [niobio](http://it.wikipedia.org/wiki/Niobio) aumenta la durezza nei getti, di cui migliora anche la saldabilità. Il diagramma di fase rame-nichel (Figura 4.5) è molto semplice: la fase solida presenta una struttura cristallina α in tutto il range di composizioni.



**Figura 4.5.** Diagramma di stato Cu - Ni.

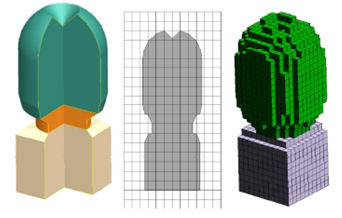
**4.2. Progettazione del canale di colata**

Per ottimizzare la produzione di un getto, secondo l'approccio convenzionale, si studia una prima versione di colata sulla base dell'esperienza. Il getto realizzato verrà sottoposto ai controlli di qualità e lo stampo verrà modificato sistematicamente fino all'eliminazione dei problemi. Questo iter viene ripetuto finché non si giunge ad un risultato soddisfacente. Oggi si possono valutare centinaia di diverse configurazioni di canali di colata in una notte, per mezzo dell'ottimizzazione automatica. Il computer elabora tutte le variabili, simula il processo e trova automaticamente la configurazione ottimale. Per esempio con la ottimizzazione del canale di colata s'intende che una prima versione della geometria di colata é progettata sulla base dell'esperienza, dopodiché il getto viene esaminato e, nel caso si sia verificato un problema, la geometria viene modificata (ancora empiricamente). Questo processo viene ripetuto fino a quando la qualità del getto e/o il rendimento del processo non sia ritenuto accettabile.

La progettazione del condotto di accesso allo stampo è fatta in modo tale da avere stabili condizioni di riempimento così che le simulazioni abbiano una buona precisione. La geometria del condotto di accesso alla conchiglia è progettata allo scopo che il metallo fuso riempia le cavità lentamente e con velocità relativa corretta. Il flusso va orientato verso la conchiglia utile, quella che contiene il particolare vero e proprio da produrre per mezzo di diversi attacchi sul fondo della colata. Questi attacchi o ingressi dovrebbero aiutare ad indirizzare e direzionare il metallo fuso in modo tale che durante il precorso il flusso sia laminare sino alla cavità principale. Con il progetto dei canali di accesso si cerca anche di eliminare le rapide variazioni di velocità del flusso durante la fase di riempimento della conchiglia fattore questo critico.

**4.3. Simulazione delle fasi della colata con software 3D**

La principale fase della simulazione, o quella che è considerata tale, viene effettuata per mezzo di calcolatori in grado di definire la struttura completa di quella che sarà poi nel concreto la colata. La simulazione del processo di colata in conchiglia a bassa pressione per mezzo di appositi software è basata sul metodo a volumi finiti, che è comparabile con la tecnica agli elementi finiti FEM. La simulazione inizia con la definizione della geometria della colata progettata e disegnata con l’aiuto di programmi CAD, questi solitamente forniscono ai programmi di simulazione l’adatta formulazione geometrica attraverso un formato riadattabile. La geometria a questo punto viene suddivisa in un numero di elementi appropriati che dipende dal software di simulazione. Sono possibili diversi tipi di forme (cubiche, piramidali) e dimensioni a seconda del metodo utilizzato. Nei diversi metodi matematici, i componenti sono valutati e divisi in un finito numero di elementi ma variabile a seconda del metodo. Il principio di simulazione della colata nonostante ciò lavora allo stesso modo ed il sistema base della costruzione della geometria della mesh è molto simile (Figura 4.6).



**Figura 4.6.** Esempio della meshatura di una geometria attraverso metodo a volumi finiti.

Durante gli ultimi anni, grazie al miglioramento delle potenzialità dei calcolatori, il numero di volumi finiti utilizzati dal software nella simulazione è cresciuto esponenzialmente. Maggior numero di elementi ha la geometria della mesh, maggiore sarà la precisione della simulazione, ma più lunghi saranno i tempi del processo di simulazione. È evidente che non ha alcun senso in esecuzione di simulazione utilizzare troppi elementi se i tempi di calcolo diventano insopportabilmente lunghi. Questo significa che l’utilizzo del software e dell’hardware insieme, determinano la precisione necessaria nella simulazione.

Quando la simulazione è stata importata con successo nel software, il progettistaAlpha

ililil deve definire i volumi specifici della geometria, il processo necessario ed impostare i valori sperimentali dei materiali da utilizzare. Nei dati dei materiali inseriti sono incluse le proprietà fisiche degli stessi, che permettono di individuare il comportamento dei volumi definiti nella simulazione, ed il coefficiente di scambio termico di ogni interfaccia del processo da studiare. Tra i dati dei materiali che è necessario definire, come detto, ci sono le condizioni di processo per la simulazione che includono le seguenti proprietà fisiche:

* temperature di fusione e di solidificazione;
* calore latente di fusione
* meccanismo di solidificazione;
* calore specifico in funzione della temperatura;
* conduttività termica in funzione della temperatura;
* densità in funzione della temperatura;
* stato di solidificazione in funzione della temperatura.

L’affidabilità delle simulazioni dipende dalla precisione dei dati preliminari, è dunque importante che i valori utilizzati nei modelli di simulazioni siano corretti. Spesso questo significa che alcuni dei parametri necessitano di essere determinati o verificati. I programmi di simulazione forniscono un database delle proprietà di diversi materiali e leghe, tuttavia includono soltanto i materiali più comunemente utilizzati. Queste proprietà sono importantissime perché utilizzate dai software per l’elaborazione del processo di riempimento della conchiglia. Quando si simula il riempimento degli stampi, viscosità e tensione superficiale della colata di leghe fuse dovrebbero essere note in funzione della temperatura. Se non ci sono dati iniziali disponibili per viscosità e tensione superficiale, il software può fornire, per poi utilizzare, un’approssimazione dei valori in funzione della temperatura.

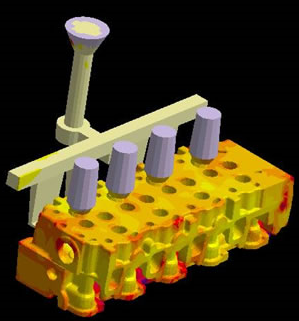
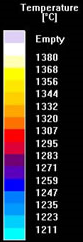
Una simulazione di un processo di pressofusione può essere divisa al suo interno in tre principali fasi in modo da permettere di simulare diversi fattori e poter realizzare considerazioni finali su quello che è il quadro completo del processo.

Riempimento, solidificazione e sollecitazioni sono i tre principali campi per poter avere una simulazione completa. Riempimento e solidificazione sono le due categorie di simulazione di gran lunga più comuni. La categoria delle sollecitazioni comprende la simulazione di tensioni (stress) e deformazioni (strain). Questa viene fatta con molta più cautela e solamente per richieste specifiche in quanto i moduli di simulazione per i programmi sono costosi e richiedono molta potenza al calcolatore così come elevate competenze nella creazione della simulazione e nell'interpretazione dei risultati da parte degli addetti.

**4.3.1. Il riempimento**

Il riempimento: in questa fase viene simulato il riempimento della conchiglia. Qui si tiene conto della conservazione del momento della quantità di moto, della conservazione della massa e della conservazione dell’energia. Le proprietà dei materiali dipendenti dalle temperature elevate di fusione, causano variazioni di continuità del riempimento che grava sul tempo di calcolo aumentandolo. Il riempimento dello stampo è un livello vitale nella produzione di una buona colata se non è ottimale, problemi di qualità possono essere causati da prematura solidificazione con relativi problemi di intrappolamenti d’aria, per citarne uno. Nelle simulazioni di colta accurate, la fase di riempimento è importante per il risultato finale. Essa fornisce una successiva simulazione della solidificazione con le corrette distribuzioni delle temperature della colata in conchiglia. Se il riempimento della conchiglia non viene simulato, occorre adottare per la seguente simulazione della solidificazione, una conchiglia effettivamente riempita ma con la necessità di usare una distribuzione del calore omogenea per la colata, che è distante da quella reale. I dati principali forniti da questa specifica simulazione utilizzati al termine delle diverse analisi per migliorare il processo nel suo insieme sono:

* aria intrappolata;
* pressione di riempimento;
* distribuzione delle temperature (Figura 4.7);
* velocità del flusso;
* tempo di riempimento;
* modulo di raffreddamento.

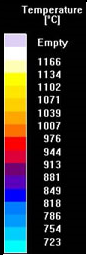
 

**Figura 4.7**. Distribuzione delle temperatura durante una simulazione di riempimento di una testata cilindri.

**4.3.2. La solidificazione**

La solidificazione: è la simulazione più comune in quanto semplice e veloce sia da lanciare che da risolvere. Lanciando questa elaborazione, senza informazioni iniziali provenienti dalla simulazione del riempimento, molto spesso si ottiene una discreta approssimazione delle zone di colata con maggiori problemi, dando anticipatamente valori di progetto sulla loro progettazione. Tuttavia in questo caso, i risultati della solidificazione possono essere consideratamente differenti se comparati con la realtà. Utilizzare i dati delle distribuzioni di calore ottenute nella fase di elaborazione del riempimento, permette alla simulazione di solidificazione di migliorare notevolmente ed essere similare al caso reale. Essa inizia dopo che una quantità sufficiente di calore è stata tolta dal metallo fuso, ciò può accadere dopo o anche durante il riempimento dello stampo. Simulare il fenomeno della solidificazione significa spesso trovare la soluzione dell'equazione della conservazione dell’energia. La conservazione di quantità di moto e la conservazione della massa non vanno comunque dimenticate in quanto per esempio, la convezione può spostare le aree fuse o solidificate all'interno del getto. I dati principali forniti da questa simulazione vengono poi analizzati assieme a quelli delle altre simulazioni per avere il quadro completo del processo e sono:

* distribuzione delle temperatura (Figura 4.8);
* fronte di solidificazione;
* frazione solida e liquida;
* porosità e sua tendenza di formazione;
* possibili gas disciolti;
* omogeneità della struttura dei grani;
* alimentazione.

**Figura 4.8**. Distribuzione delle temperature durante una simulazione di solidificazione di un albero motore.

**4.3.3. Le sollecitazioni**

La simulazione delle sollecitazioni ha lo scopo di valutare eventuali tensioni e deformazioni sia del metallo da lavorare sia della conchiglia utilizzata per formarlo. Questa simulazione viene effettuata dopo il lancio delle simulazioni di riempimento e solidificazione del caso da elaborare eseguendo comunque in parallelo l’analisi termica e meccanica su conchiglia e particolare prodotto. Lo scopo principale di questa operazione è dunque valutare le proprietà meccaniche delle colate ed i rischi di distorsione della conchiglia. Oltre a ciò, i fattori specifici principali che vengono trattati da questa particolare simulazione sono:

* solidificazione omogenea della lega fusa;
* contrazione lineare termica;
* problematiche correlate al coefficiente di scambio termico tra le interfacce;
* plasticità e fluidità in relazione alla variazione delle temperature;
* pressione idrostatica;
* formazione di eventuali cricche.

La sequenza di lancio delle varie simulazioni descritte è molto importante perché se non eseguita nel corretto ordine si rischia di ottenere dati non corrispondenti alla realtà, inoltre se le simulazioni dovessero essere lanciate simultaneamente, caso molto più difficile, si rischierebbe di sovraccaricare la modellazione al calcolatore inutilmente ed in maniera controproducente. I dati cui è possibile ricavare da questi elaborati sono svariati. I software utilizzati sono in grado di analizzare tutte la possibili fasi del processo raccogliendo poi le informazioni e fornendole in modo tale che il risultato nel suo complesso sia stilato in un unico modello riassuntivo. I dati verranno poi utilizzati dai tecnici al fine di intervenire apportando i miglioramenti necessari. Prima che i risultati delle simulazioni possano essere analizzati, tuttavia, devono essere posti in una formula tale per cui risulti facile interpretarli, in quanto la sola simulazione non è altro che una sequenza di valori elencata dal calcolatore. Molto spesso i risultati simulati vengono analizzati più volte in modo tale da poter essere compresi anche da personale non propriamente tecnico. La soluzione più pratica ed immediata per fare queste operazioni è per mezzo dello stesso software utilizzato nella simulazione, questo supporto infatti è in grado di visualizzare il risultato sotto forma di geometria 3D.

L’obiettivo principale di questa tesi è di fornire una traccia allo scopo di poter in futuro migliorare i risultati di possibili simulazioni della pressofusione a bassa pressione di leghe di rame. Il sistema migliore sarebbe quello dell’analisi sul campo, cioè come già detto, oltre al supporto del software avere la possibilità di costruire una conchiglia attrezzata con la strumentazione necessaria e rilevare i dati reali del processo. Prima del progetto, su una conchiglia di questo tipo, alcuni elementi vanno valutati e scelti. Una nozione infatti su cui vale la pena soffermarsi è il condotto di accesso allo stampo. Avere la possibilità inoltre, di analizzare differenti geometrie di colata, fornisce alla progettazione, una soluzione più adatta al processo. Fare ciò richiede lavoro e tempo, oltre che costi di impiego di una macchina da pressofusione che altrimenti potrebbe essere dedicata alla produzione. La riduzione delle problematiche, che avvicina la proposta di poter effettuare in maniera pratica queste operazioni e facilitarne lo studio, è data dalla scelta di utilizzo di forme e geometrie semplici, come piastre, che ovviamente richiedono minori costi. Le dimensioni della piastra devono essere scelte tra un ristretto numero di modelli già calcolati precedentemente, secondo i metodi tradizionali, come anche le restrizioni delle dimensioni della conchiglia specifiche per l’apposita macchina di colata. Le geometrie piatte sono da preferire per le prime simulazioni di colata in conchiglia a bassa pressione perché risultano più facili da produrre e da simulare anche per il calcolatore già nella fase iniziale di costruzione della mesh.

**5. SIMULAZIONE DEI PARAMETRI FISICI**

**5.1. Il coefficiente di scambio termico**

Le strutture solidificate delle leghe dipendono dal loro processo di solidificazione le cui caratteristiche principali sono il calo della temperatura della massa fusa ed il rilascio del calore latente. Il trasferimento del calore durante il processo di solidificazione, come già ripetuto più volte, è il problema fondamentale nella teoria dello studio della solidificazione. I ricercatori lavorando sulla simulazione numerica del processo di solidificazione hanno individuato nel coefficiente di scambio termico interfacciale la dipendenza chiave dal range di temperature. La modellazione matematica dei processi di solidificazione del metallo ha fatto un enorme passo avanti nelle ultime decadi grazie all’avvento dei computer. I fenomeni di base quali la nucleazione, i movimenti dei liquidi e dei solidi vengono costantemente presi in considerazione nei modelli di studio ed i risultati ottenuti hanno raggiunto valori sempre più coerenti con la realtà. Utilizzando l’algoritmo inverso del coefficiente di scambio termico e quello del metodo di stima non lineare ed incrociando poi i valori calcolati, è possibile determinare il coefficiente di scambio termico nell’interfaccia metallo fuso - parete della conchiglia durante il processo di colata.

**5.1.1. Creazione di modelli di scambio termico**

Considerando il rilascio del calore latente, la formula applicabile hai modelli 3D del trasferimento del calore è la seguente:

(1)

Dove ρ è la densità della lega [kg/m3], C è la capacità termica specifica [J/kgK], λ è la conduttività termica [W/mK], Q è la generazione di energia interna per unità di volume [J/m3].

L’espressione differenziale finita legata al trasferimento del calore dunque è:

(2)

Con: (3)

Dove Δt è il tempo [s], V è l’unità di volume [], h(i,j) è il coefficiente di scambio termico interfacciale tra la zona i e la zona j [W/K], L(i,j) ω(i,j) S(i,j) sono la distanza [m], resistenza termica W/K, e l’area di trasferimento del calore [] rispettivamente tra la zona i e la zona j.

Dopo l'organizzazione della formula di cui sopra, può essere ottenuta l’equazione (4). Essa viene utilizzata per un tipo di calcolo interattivo che tiene conto delle condizioni al contorno iniziali di temperatura negli intervalli i al t + nΔt (con n numero intero positivo):

(4)

**5.1.2. Algoritmo inverso e metodo di stima non lineare del coefficiente di scambio termico interfacciale equivalente**

L’algoritmo inverso viene utilizzato per trovare le informazioni mancanti come proprietà termo fisiche o coefficiente di scambio termico interfacciale. Al fine di trovare queste specifiche caratteristiche, sono necessarie alcuni dati supplementari. In generale questi comprendono le temperature, registrate durante i getti in uno o più punti, e quindi in altri termini, la curva di temperatura completa ottenuta durante l’esperimento. Lo scopo principale è di trovare il coefficiente di scambio termico interfacciale tra getto e conchiglia, durante la colata per mezzo dell’algoritmo inverso. Le procedure attuali comprendono in primo luogo la misura dell’evoluzione delle curve di temperature in alcuni punti del getto o della conchiglia, e la successiva comparazione dei valori calcolati dal modello teorico con quelli di un esperimento reale. Attraverso la continua variazione del valore del coefficiente di scambio termico durante il processo di calcolo, l'errore tra i dati calcolati e quelli sperimentali può essere ridotto.

Il problema è quello di stimare la funzione del valore del coefficiente si scambio termico interfacciale in quanto è una variabile che cambia con il tempo. Essenzialmente, la funzione di stima ha un piccolo difetto in quanto anche una fluttuazione molto lieve di ingresso può portare a una grandi differenze in uscita. Il metodo di stima richiede una stabilizzazione o regolazione che assicuri un risultato utile. Il coefficiente di scambio termico è un parametro influenzato da molti elementi che includono: modalità di contatto interfacciale, condizioni fisiche interfacciali, condizioni chimiche interfacciali, condizioni termiche interfacciali, ed altri, tra quelli elencati, la modalità di contatto gioca il ruolo fondamentale.

Si definisce ora il coefficiente di scambio termico interfacciale equivalente come . Esso è una funzione che varia con il tempo e può essere risolta attraverso il metodo di stima non lineare ed un metodo numerico. La soluzione attraverso l’utilizzo del metodo di stima non lineare prevede di trovare il minimo della seguente funzione:

(5)

Dove Ti,j(m) e Ti,j() sono rispettivamente le temperatura sperimentali misurate e le temperature calcolate nel punto i all’istante j.

(6)

(7)

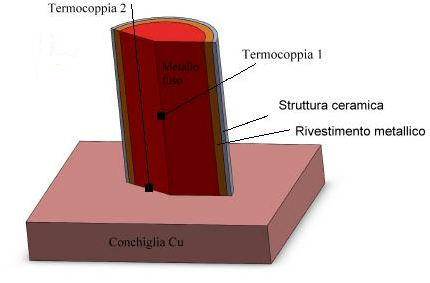
Dove l è il tempo dell’iterazione. Dal metodo di stima non lineare si può calcolare il cambiamento del coefficiente di scambio termico interfacciale equivalente nel tempo. Quando il rapporto della variazione di (in un intervallo di tempo) con il coefficiente scambio termico interfacciale (nell'intervallo di tempo precedente) è inferiore ad un determinato valore, il coefficiente di scambio termico equivalente è a questo punto il risultato cercato. È possibile determinarne quindi la sua variazione dall’espressione.

(8)

Sviluppando l’espansione di Taylor dall’equazione (8) si ricerca il minimo di attraverso il metodo interattivo. Si comincia con la stima di (l), per l=0, aumentando i tempi di interazione sino a Δ(l)/(l)<δ (con δ un valore finito piccolo), si determina così l’ che soddisfa i requisiti ed il processo di calcolo che si può quindi spostare al tempo successivo. Attraverso questa iterazione può essere ottenuto in qualsiasi momento.

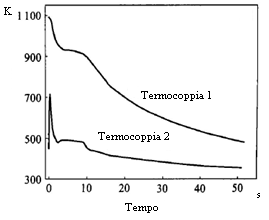
**5.1.3. Misura della temperatura durante il processo di solidificazione**

Si descrive innanzitutto un esempio, semplice anche da realizzare nella realtà, che illustri schematicamente il sistema sperimentale di funzionamento per l’acquisizione dei dati quali le temperature (Figura 5.1). si consideri quindi un getto campione di forma cilindrica ed altezza variabile. A questo sistema vanno applicate delle termocoppie in zone strategiche per una più possibile realistica fase di studio. Una è posizionata sull’asse, ed un'altra in corrispondenza dell’interfaccia tra getto e parete della conchiglia.

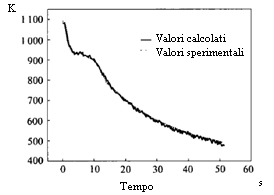


**Figura 5.1.** Stampo di calore del metallo interfaccia trasferimento setup sperimentale.

Si fornisce un esempio dell’andamento che ci si aspetta di trovare durante uno di questi esperimenti (Figura 5.2). La temperatura misurata dalla termocoppia 1 posta sull’asse del campione ha tipicamente un rapido crollo nella sua fase liquida sino a raggiungere un primo punto di minimo, a seguito sorge una fase considerata stabile che si mantiene per qualche secondo e dopo di essa si ha la graduale dolce riduzione fino alla fine della solidificazione. La termocoppia 2 misura un andamento simile ma con valori di temperatura più bassi e caratterizzata da un picco iniziale a dimostrazione del rapido aumento durante la colata. A seguito delle misurazioni sul campo è possibile confrontare i valori delle temperature calcolate sperimentalmente e di quelle misurate nelle relative posizioni (Figura 5.3).



**Figura 5.2.** Andamento tempo-temperatura misurato da due termocoppie in fase di prima solidificazione.



**Figura 5.3**. Andamento tra le temperature calcolate e quelle misurate nelle relative posizioni.

**5.1.4. Calcolo del coefficiente di scambio termico interfacciale**

Durante il processo di calcolo teorico, è necessaria l’analisi del calore latente. In generale, si utilizza il metodo di ri-acquisizione delle temperature per trattare il termine legato al calore latente del metallo puro nell’equazione (1).

**5.1.4.1 Condizioni al contorno**

Prima del calcolo, occorre definire ed illustrare i metodi di considerazione delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno (Figura 5.4).

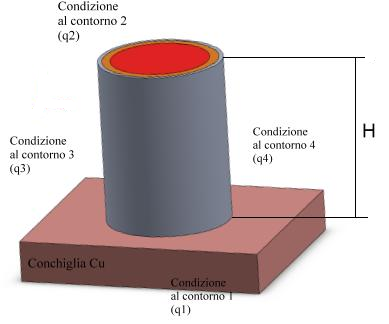
Le condizioni iniziali sono: Ti(t=0)=Tp. Con Tp temperatura di colata che è il valore iniziale misurato dalla termocoppia 1.

La condizione al contorno 1 considera il calore scambiato: = (- (i)).

La condizione al contorno 2 considera il calore irradiato (perso): = εг (-).

Le pareti laterali sono isolate e si considera scambio di calore nullo: ==0.

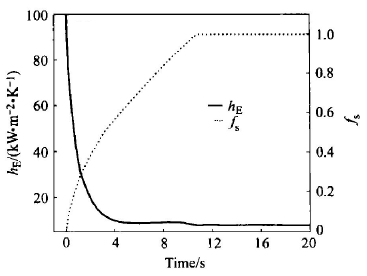
In queste equazioni, è il coefficiente di scambio termico interfacciale equivalente, (i) è la temperatura all’interfaccia getto-conchiglia e che è il valore misurato dalla termocoppia 2, Ta è la temperatura dell’aria nelle vicinanze della sommità del getto e T1 e Tn sono le temperature negli intervalli 1 ed n lungo l’altezza del campione (1 alla base, n ad Hmax), г è la costante di Stefen Boltzman (5,67\*10^-8 W\*m^-2\*K^-4). Risulta da ciò evidente che il trasferimento di calore è un problema dimensionale.



**Figura 5.4.** Schematizzazione del sistema di definizione delle condizioni al contorno.

**5.1.4.2. Discussione dei risultati calcolati**

Il calcolo è un processo ripetutamente regolabile ed include principalmente due moduli, uno è il campo di temperature in gioco, l’altro è per il calcolo del coefficiente di scambio termico equivalente. Il rapporto solido (con = l’(t)/H, dove l’ è l’altezza della parte solidificata, H è l’altezza totale del campione, ed =1 esprime la fine del processo di solidificazione) è usato per descrivere il processo di solidificazione. Di seguito è mostrato il calcolo del coefficiente di scambio termico equivalente secondo le temperature misurate illustrate in figura 5.2 (Figura 5.5). Il coefficiente di scambio termico interfacciale ha due tendenze di variazione distinte durante la solidificazione, la prima è una ripida caduta seguita da un mantenimento quasi costante. Quando il metallo liquido è versato sulla superficie dello stampo di rame, il coefficiente di scambio termico raggiunge il suo massimo perché il contatto è di tipo liquido solido. Con la variazione dell’interfaccia di contatto da liquido solida a solida, il coefficiente di scambio termico scende bruscamente verso il basso per il suo minimo dove è circa 0,35. Una ragione per la caduta di questo coefficiente potrebbe essere la presenza di uno strato di film di gas che si forma saltuariamente. A seguito con l’aumentare del tempo e della quantità di parte solida si riduce ulteriormente.



**Figura 5.5.** Andamento del coefficiente di scambio termico equivalente in funzione della fase solida presente.

Si può concludere il discorso della valutazione del coefficiente di scambio termico considerando che con l’utilizzo dell’algoritmo inverso del trasferimento del calore ed il metodo della stima non lineare, interpolando inoltre dei valori calcolati con quelli misurati, la determinazione del coefficiente di scambio termico interfacciale tra getto e conchiglia è risolta facilmente. Nel complesso si può dire inoltre che il coefficiente di scambio termico è un parametro influenzato da molti fattori tra cui le modalità di contatto interfacciali, condizioni interfacciali fisiche e chimiche, temperature, le dimensioni di getto e conchiglia, ecc. tra questi le dimensioni e le modalità di contatto giocano il ruolo fondamentale. A ciò non va dimenticata la rugosità alta della conchiglia che causa l’aumento del valore del coefficiente. Lo stesso accade per colate di piccole dimensioni.

**5.2. La viscosità**

Anche definita come attrito interno, è uno dei parametri base dei liquidi. Esistono due tipi di viscosità, viscosità dinamica (Pa\*s) e viscosità cinematica (/s). La viscosità cinematica è il rapporto della viscosità dinamica con la densità alla stessa temperatura. Nel caso di metalli liquidi e leghe, principalmente a causa delle difficoltà sperimentali ad alte temperature, i dati di riferimento relativi alla viscosità sono rari come lo sono quelli di tensione superficiale e densità. Nonostante i pochi dati vi è molta letteratura in merito, la viscosità dei metalli liquidi, infatti, viene studiata sia sperimentalmente che teoricamente da molti anni. Riesaminare alcuni dei dati disponibili su questa proprietà delle leghe liquide, recentemente, è emersa la relazione tra viscosità e formazioni vetrose nelle leghe e ciò ha assunto notevole interesse. La formazione di vetro è promotrice di rapidi aumenti di viscosità nel sotto raffreddamento e tale effetto, con composizioni particolari, assieme agli effetti termodinamici, può spiegare la variazione di formazione di vetro nelle leghe. È utile avere una grande raccolta di riferimenti e dati sui trasporti atomici nei metalli liquidi cosa che sino a poco tempo fa era, come già detto, stilata sottoforma di trattazioni incomplete. Occorre fare attenzione e verificare innanzitutto le correlazioni empiriche sulla viscosità di elementi puri liquidi, ed estenderli poi ai casi di composti intermetallici ed eutettici. Si discutono inoltre le formule disponibili che tentano di descrivere la viscosità in funzione di composizione e di temperatura, con particolare attenzione alle formazioni vetrose.

**5.2.1. Viscosità al punto di fusione**

La viscosità dei liquidi puri ha correlazioni con il punto di fusione degli elementi e varia periodicamente con il numero atomico come avviene per temperatura di fusione ed energia superficiale, ed in maniera opposta al volume molare. Una delle formule più importanti e che ha avuto maggiori riscontri a livelli pratici è quella di Andrade. Esso assume l’uguaglianza del calore specifico nei punti di fusione e suggerisce per essi simili vibrazioni atomiche. Andrade suppone che la frequenza di vibrazione caratteristica del liquido sarebbe, al punto di fusione Tm, uguale a quella del solido, si deriva quindi un’espressione per il taglio della viscosità η. Da considerare che il momento viene trasferito da uno strato di fluido ad un altro con velocità differente e non per trasferimento di atomi come nei gas, ma dal contatto degli atomi su strati limitrofi a causa dello spostamento dalle loro posizioni medie per vibrazione. In particolare, la relazione trovata per i metalli puri liquidi (9) fornisce una relazione inversa tra la viscosità η e la diffusibilità atomica.

(9)

Dove η è la viscosità, Tm il punto di fusione, V il volume molare, A il peso atomico e Ca la costante dei metalli puri. Applicando l'equazione (9) con valori medi di peso atomico A e volume molare V, si possono produrre stime della viscosità del liquido alla temperatura To cioè tra quella di liquidus e di solidus.

Un’altra equazione molto utilizzata è quella di Stokes-Einstein (10) che relaziona la diffusività atomica e la viscosità nei metalli liquidi.

(10)

Dove η è la viscosità, D la diffusività atomica, a la distanza caratteristica e k una costante.

**5.2.2. Dipendenza della viscosità dalla temperatura**

Un metodo per il calcolo della viscosità dipendente dalla temperatura di un liquido è attraverso una correlazione di stati corrispondenti, tale correlazione è stata sviluppata per i metalli fusi puri. Nonostante ciò, si dimostra che la relazione temperatura-viscosità (con le quantità opportunamente ridotte usando distanza e parametri energetici caratteristici come il potenziale interatomico di coppia) per metalli puri cade su una curva universale che si può quindi anche utilizzare in casi con trattazione di metalli non puri. Si introduce in questo caso soltanto una considerazione generale che valuta la viscosità pre-esponenziale approssimativamente costante per elementi, composti ed eutettici e vale 0,4 mPa\*s.

**5.2.3. Dipendenza della viscosità dalla composizione**

Gli studi sulla viscosità delle leghe sono arrivati alla conclusione che se c’è completa miscibilità tra stati solido e liquido, la viscosità degli elementi si può approssimare con quella calcolata attraverso la media ponderata di quella dei due elementi. È possibile che i sistemi con completa miscibilità negli stati solidi e liquidi possono, a differenza di sistemi eutettici e di sistemi con formazione di composti, consentono alcune interpolazioni della viscosità nel punto di fusione.

La dipendenza della viscosità dalla composizione in sistemi più complessi è molto difficile da descrivere quantitativamente. Tentativi si possono fare calcolando il coefficiente di viscosità da interdiffusione utilizzando la relazione Stokes-Einstein. Essa prevede una deviazione negativa della viscosità dall’interpolazione lineare della viscosità per sistemi aventi un calore positivo di variazione di entalpia nella miscela liquida. La differenza di regolazione è infatti trovata per alcuni sistemi semplici con positivo, ma questo effetto si trova ad avere anche per alcuni sistemi un negativo. Per sistemi aventi fortemente negativa questa equazione prevede un aumento di viscosità che può sembrare essere in accordo con l’elevata viscosità presente nella formazione di composti. Tuttavia dall'equazione non è possibile prevedere le viscosità più basse previste per composizioni eutettiche, essa dà solo una variazione parabolica della viscosità in funzione della composizione e prevede inoltre che la viscosità massima sarà alla composizione equiatomica. In sistemi con un calore fortemente positivo di miscelazione, che portano a lacune liquide miscibili, può essere più ragionevole aspettarsi un regolazione della viscosità con la composizione, come composto solido. Un effetto simile può essere responsabile per la viscosità massima che si ha appena sopra le lacune liquide miscibili nei sistemi.

**5.2.3.1. Lega Cu-Zn**

Di seguito si trovano misurazioni di viscosità per leghe di rame zinco, ottoni con percentuale in peso di zinco del 5% e del 10%. Nelle leghe in esame sono presenti in minima parte anche altri elementi leganti.

Le misurazioni della viscosità vengono eseguite con un viscosimetro attraverso il fenomeno di smorzamento delle vibrazioni rotazionali in un crogiolo, provocate durante il riempimento dello stesso con il metallo fuso. La viscosità viene poi calcolata, in questi casi specifici di studio e simulazione, attraverso la formula:

(11)

Dove: - υ: coefficiente di viscosità cinetica;

* K: momento d’inerzia del sistema in movimento;
* m: massa campione;
* r: raggio interno del crogiolo;
* δ: decremento logaritmico dello smorzamento della vibrazione del sistema con il campione;
* : decremento logaritmico dello smorzamento della vibrazione del sistema vuoto;
* τ: periodo della vibrazione del sistema con il campione;
* : periodo della vibrazione del sistema vuoto;
* γ: quantità adimensionale;

Di seguito verranno elencati i valori di viscosità di alcune leghe di rame zinco al 5 e 10% (Tabella 5.1) con relativa composizione di elementi alliganti e saranno descritti mediante l’applicazione delle più comuni equazioni per il calcolo della viscosità di Arrhenius:

(12)

(13)

Dove A, B, C, D sono costanti e T è la temperatura.

**Tabella 5.1.** Valori di viscosità di alcune leghe di rame zinco al 5 e 10% con relativa composizione di elementi alliganti.

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Numero*** | ***Cu %peso*** | ***Zn %peso*** | ***Sb %peso*** | ***Se %peso*** | ***S***  ***%peso*** |  |  |
| 1 | 95 | 5 | - | - | - |  |  |
| 2 | 94,9 | 5 | 0,1 | - | - |  |  |
| 3 | 94,6 | 5 | 0,4 | - | - |  |  |
| 4 | 94,9 | 5 | - | 0,1 | - |  |  |
| 5 | 94,6 | 5 | - | 0,4 | - |  |  |
| 6 | 94,9 | 5 | - | - | 0,1 |  |  |
| 7 | 94,6 | 5 | - | - | 0,4 |  |  |
| 8 | 90,0 | 10 | - | - | - |  |  |
| 9 | 89,9 | 10 | 0,1 | - | - |  |  |
| 10 | 89,6 | 10 | 0,4 | - | - |  |  |
| 11 | 89,9 | 10 | - | 0,1 | - |  |  |
| 12 | 89,6 | 10 | - | 0,4 | - |  |  |
| 13 | 89,9 | 10 | - | - | 0,1 |  |  |
| 14 | 89,4 | 10 | - | - | 0,4 |  |  |

Le misurazioni della densità per le varie leghe vengono eseguite per valori di temperatura campioni. Da tali misurazioni risulterà esserci per tutte le leghe in esame una viscosità che decrescerà con l’aumentare delle temperature. Inoltre si riscontra che l’aggiunta di zinco selenio e antimonio decrementa la viscosità mentre lo zolfo ha l’effetto di farla aumentare. Questa crescita è quindi associata alla formazione di solfuri i quali hanno la stessa influenza delle inclusioni solide nel metallo liquido.

**5.3.** **Modelli di cinetica termodinamica per la simulazione della solidificazione nelle leghe binarie di rame e calcolo delle proprietà termo fisiche**

Negli ultimi 40 anni, molti modelli sono stati sviluppati per cercare di predire la redistribuzione del soluto e la formazione della microstruttura durante la solidificazione dendritica e tutt’ora, per le leghe di rame, non esistono modellazioni complete a riguardo. Recentemente sono stati sviluppati i primi modelli della cinetica termodinamica di solidificazione per le leghe di rame più comuni, questi sono orientati al calcolo delle frazioni e delle composizioni liquide e solide delle fasi cubiche a faccia centrata ad ogni temperatura durante la solidificazione. Essi calcolano nel contempo anche le proprietà termo fisiche dei materiali, quali: entalpia, calore specifico, conduttività termica, densità e viscosità liquida che possono essere utilizzate come valori iniziali per i modelli di trasferimento del calore nei modelli dei processi di colata delle leghe di rame. Di seguito si illustreranno brevemente le strategie di calcolo ed i risultati per alcuni modelli focalizzando l’attenzione sulle leghe di ottone e bronzo.

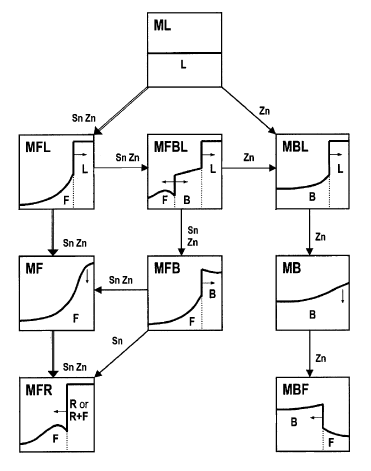
**5.3.1. Descrizione del modello teorici per leghe di rame**

Le proprietà dei materiali utilizzati sono state simulate con l’uso di CAS-model (modello di solidificazione per le leghe di rame, “Copper Alloy Solidification Model”) sviluppato alla Alto University School of Engineering durante gli anni 2002-2008. Il CAS-model è basato su IDS-model (Interdentritic Solidification Steel) che è stato sviluppato dal 1984. A confronto con IDS-model, il CAS-model è più complesso per il fatto che la solidificazione delle leghe di rame è più complessa di quella degli acciai.

Nel modello sono comprese alcune semplificazioni:

* struttura dendritica esagonale e regolare;
* non ci sono scambi di soluto tra i volumi di elementi circostanti;
* c’è completa ed uniforme distribuzione nella fase liquida;
* equilibrio termodinamico ad eguale distanza dalle interfacce di fase;
* non c’è sottoraffreddamento prima della formazione di una nuova fase;
* la diffusione cinetica non è influenzata dai cambiamenti di volume tra le fasi.

I calcoli nei modelli sono stati fatti nell’intorno dei bordi delle strutture dendritiche. Il calcolo degli specifici moduli è stato sviluppato considerando le traiettorie delle varie solidificazioni di diversi elementi, essi (Figura 5.6), illustrano il profilo di concentrazione di soluto nei volumi in ognuno di essi.



**Figura 5.6**. Mostra il diagramma di flusso del CAS-model dei moduli di calcolo di differenti regioni di fase, dove: ML = metallo liquido, F o CFC = struttura cubica a facce centrate, B o CCC = struttura cubica a corpo centrato, C = composti, G = fase gamma, H = coefficiente di trasmissione del calore.

Si può seguire il processo dei moduli calcolati per le leghe di bronzo. Lo stato liquido scendendo sino alla temperatura di liquidus è fornito dal modulo ML, dopo questo la solidificazione F è simulata con il modulo MFL. Se dal modulo MFL non c’è formazione di B si ha passaggio diretto al modulo MF nel quale non vi è più fase liquida. Se la fase B viene formata attraverso una trasformazione paritetica la simulazione passa dal modulo MFL al modulo MFBL che permane sino alla scomparsa completa della fase liquida. A seguito la simulazione passa al modulo MFB da cui poi scomparendo la fase B si trasforma in modulo MF. Per concludere si arriva al modulo MFR attraverso entrambi i casi.

Per le leghe di ottone il percorso può prevedere che dal modulo ML, cioè stato liquido completo, si passi al modulo MFL, come per i bronzi, nel caso in cui la fase primaria sia F, e nel caso in cui dalla fase liquida si sviluppi una struttura B si arriva invece al modulo MBL. In quest’ultimo caso la simulazione, a completa scomparsa della fase liquida, conduce al modulo MB e di seguito al modulo MBF quando la fase F sarà anch’essa formata.

Le equazioni utilizzate dalla simulazione sono divise in equazioni che hanno a che fare con l’equilibrio termodinamico delle fasi ed altre che hanno a che fare con la diffusione del soluto nella fase solida. I calcoli in ogni modulo vengono fatti a livelli definiti per decremento della frazione liquida () nei moduli MFL, MFBL e MBL e per decremento della temperatura (ΔT) negli altri moduli. Nel caso del , la divisione dei livelli viene fatta in =0.0023 per 1≤j≤7; = (144-j)\*0,0001 per 8≤j≤139; e =0,005 per j=140; ciò per avere un’accurata descrizione delle interfacce liquide e solide nei volumi.

**5.3.2. Strategie di calcolo e descrizione dei modelli**

Le equazioni di equilibrio termodinamico e diffusione del soluto sono rivolte ad analizzare i moduli illustrati precedentemente (Figura 5.6) che trattano nello specifico la lega Cu-Sn, di cui, in seguito, vi è una descrizione più accurata.

*Modulo ML regione liquida*. La solidificazione di una lega inizia alla temperatura di liquidus Tliq. Nella maggior parte delle leghe di rame la prima formazione di fase solida ha conformazione F o B. In entrambi i casi la composizione di liquido è uguale a quella nominale. Se TF>TB, la formazione di fase primaria è F e Tliq=TF. Viceversa se la formazione primaria è B si avrà Tliq=TB. Nel modello simulato In questo modulo, la simulazione delle temperature decresce sino a Tliq e le proprietà termo fisiche dei materiali vengono calcolate ad intervalli di temperatura definiti dalla relazione Ti=T-ΔT. La simulazione procede a step fino a che oltre alla fase liquida compaiono i principi di formazione F, arrivando ad avere un modulo MFL.

*Modulo MFL regione F+L*. Il modulo viene simulato attraverso un riduzione di frazione liquida secondo la relazione . Ad ogni intervallo vengono calcolati equilibrio termodinamico e diffusione del soluto, inoltre, a seguito, per ognuno di essi vengono calcolate le proprietà termo fisiche. Tutto ciò permette di calcolare il profilo di concentrazione per ogni livello di temperatura deciso e viene calcolato fino a che =0 (la frazione liquida è uguale a zero). La simulazione procede a step fino a che non compaiono formazioni di fase B arrivando ad avere un modulo MFBL. Nel caso in cui si abbia completa scomparsa di fase liquida senza formazione di fase B si passa direttamente al modulo MF.

*Modulo MFBL regione F+B+L.* Questo modulo, come il precedente, viene simulato attraverso un riduzione di frazione liquida secondo la relazione con l’aggiunta della valutazione di frazione F e B secondo le relazioni e . Di seguito a ciò, ad ogni intervallo vengono calcolati equilibrio termodinamico e diffusione del soluto, in parallelo al calcolo delle proprietà termo fisiche. La simulazione procede a step fino a che non scompare completamente la fase liquida arrivando in questo caso al modulo MFB.

*Modulo MFB regione F+B*. Il modulo presenta un’elaborazione di calcolo a livelli di temperatura decrescenti secondo la relazione Ti=T-ΔT. Ad ognuno di questi step vengono valutati anche le variazioni di formazione delle fasi secondo le relazioni e . Ad ogni intervallo vengono calcolati equilibrio termodinamico e diffusione del soluto, inoltre, di seguito, per ognuno di essi vengono calcolate le proprietà termo fisiche. Tutte queste analisi vengo ripetute ad ogni livello sino a che =0 o T<Tδ. La simulazione procede a step fino a che non scompare completamente la fase F arrivando al modulo MF.

*Modulo MF regione F.* Il modulo è soggetto a calcoli per livelli di temperatura decrescenti secondo la relazione Ti=T-ΔT. Ad ogni intervallo vengono calcolati equilibrio termodinamico e diffusione del soluto, inoltre, a seguito, per ognuno di essi vengono calcolate le proprietà termo fisiche. La simulazione procede a step fino a che compare la fase detta, a questo punto si potrà passare all’analisi del modulo MFR, se non vi è la comparsa di tale fase, la simulazione continuerà decrementando la temperatura sino a 25°C.

*Modulo MFR regione F+ R e F+eutectoid F +R.* Il modulo presenta un elaborazione di calcolo a livelli di temperatura decrescenti secondo la relazione Ti=T-ΔT. Ad ognuno di questi step vengono valutate le formazioni di fase δ ed anche le variazioni di formazione delle fasi secondo le relazioni e . Ad ogni intervallo vengono calcolati equilibrio termodinamico e diffusione del soluto, inoltre, a seguito, per ognuno di essi vengono calcolate le proprietà termo fisiche. Tutte queste analisi vengo ripetute ad ogni livello sino a che T=25°C, a questo punto la simulazione si conclude.

**5.3.3. Calcolo delle proprietà termo fisiche**

Conoscendo una proprietà termo fisica dei materiali per una singola fase, e conoscendo la composizione della fase stessa in funzione della temperatura, c’è la possibilità di calcolare le proprietà per le leghe di rame scelte partendo dallo stato liquido e scendendo sino a temperatura ambiente. Le più importanti proprietà termo fisiche dei materiali, sono entalpia (che comprende anche calore specifico e calore latente dei cambiamenti di fase), conduttività termica, densità e viscosità, quest’ultima già analizzata in precedenza.

**5.3.3.1. Entalpia**

In accordo con la termodinamica classica, l’entalpia molare [J/mol] e la capacità termica molare [J/Kmol] possono essere espresse secondo le equazioni (14) e (15).

(14)

(15)

Dove G è l’energia molare di Gibbs [J/mol] del sistema. Per una fase mista contenente liquido, F, B, l’energia molare di Gibbs può essere data dalla seguente relazione:

(16)

Dove f è la frazione della fase e G è l’energia molare di Gibbs. Entrambi i parametri vengono ottenuti dalle modellazioni CAS. A questo punto conoscendo H e Cp dalle equazioni precedenti, è possibile calcolare il calore latente di solidificazione dalla relazione:

(17)

Dove Tliq e Tsol sono le temperature di liquidus e solidus delle leghe. Nei calcoli del trasferimento del calore, utilizzando le quattro equazioni sopra descritte è possibile calcolare entalpia, capacità termica e calore latente per le leghe a base di rame desiderate.

**5.3.3.2. Conduttività termica**

Conoscendo la frazione liquida dal sistema di simulazione CAS2 la conduttività termica del materiale viene calcolata come:

(18)

Dove i k rappresentano la conduttività termica rispettivamente delle fasi liquide e solide della lega, ed A è un parametro a valore costante che descrive gli effetti della convezione sulla conduttività termica del liquido (con A=1 non c’è alcun effetto dovuto alla convezione).

**5.3.3.3. Densità**

Dalla conoscenza delle frazioni L, di quelle F e di quelle B nelle fasi, dalle simulazioni CAS, la densità delle leghe può essere calcolata attraverso la seguente relazione:

(19)

Dove gli f ed le sono rispettivamente le frazioni e le densità delle fasi L, F e B. L’equazione appena descritta può essere utilizzata per calcolare la contrazione che avviene tra due diverse temperature T1 e T2, per esempio:

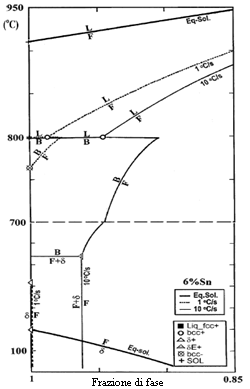
(20)

Impostando T1= Tliq e T2=Tsol, si ha la contrazione in tutta la zona molle (per lo più compensata dall’alimentazione del liquido) ed impostando T1=Tzst e T2=Tsol, si ha la contrazione senza alimentazione di liquido nella zona molle. In queste equazioni ed in quelle di calcolo, la densità è espressa in (kg/m^3) e la temperatura in °C.

**5.3.4. Risultati di calcolo**

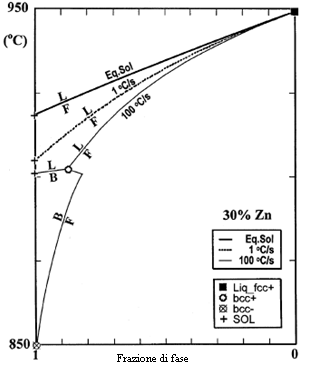
**5.3.4.1. Movimento d’interfaccia di fase durante il raffreddamento**

È possibile a questo punto riportare qualche risultato calcolato con programma CAS2 per le leghe Cu-Zn e Cu-Sn. In particolare è possibile effettuare una trattazione in primis sulla velocità di raffreddamento e corrispondente solidificazione per la lega Cu-6%Sn (Figura 5.7). In accordo con l’equilibrio alla solidificazione, la solidificazione termina a 910°C con una struttura F pura. La fase δ, inizia a 198°C e permane sino a temperatura ambiente, risultando presente nella struttura finale per un 10,6%. A velocità di raffreddamento di 1°C/s e di 10°C/s, la fase B inizia a formarsi a 799°C attraverso una trasformazione paritetica. A causa dell’efficiente diffusione cinetica, nella fase B, la fase liquida scompare presto, ed in maniera più rapida avvicinandosi alla fase finale di solidificazione. Alla velocità di 1°C/s la temperatura di liquidus è di 799°C ed a 10°C/s è di 798°C. Scendendo sotto la temperatura di liquidus, se non c’è la fase B+L essa lascia il posto alla fase B con contenuti elevati quanto quelli della F+B, il flusso del soluto nella fase B cambia rapidamente la sua direzione. Con la velocità di raffreddamento di 1°C/s la fase B scompare a 764°C. A causa della regione con segregazione interdendritica, la fase δ inizia a comparire anche ad elevate temperature, 416°C ma a causa delle povera diffusione cinetica a basse temperature la sua presenza rimane bassa. Alla velocità di raffreddamento di 10°C/s, il contenuto di B scendendo al di sotto della temperatura di solidus, è talmente alto che non può cambiare struttura. A basse temperature, quando la diffusione cinetica è lenta, le variazioni di interfaccia F+B sono lente. A 540°C, la fase B scompare. A temperatura ambiente, i contenuti delle strutture finali conterranno circa il 4% di struttura F+δ ed il 2,5% di fase δ.



**Figura 5.7**. Calcolo del movimento d’interfaccia di fase durante la solidificazione di una lega Cu-6%Sn per velocità di raffreddamento di 1°C/s e di 10°C/s.

Di seguito (Figura 5.8) è mostrato l’effetto della velocità di raffreddamento sul movimento d’interfaccia di fase durante la solidificazione di una lega Cu-30%Zn per velocità di 1°C/s e di 100°C/s. In accordo con l’equilibrio alla solidificazione la solidificazione avviene a 918°C sotto forma di struttura F completa, senza passare attraverso formazioni di B. Con la velocità di 1°C/s, la solidificazione avviene a 905°C e con la stessa struttura F pura. Con velocità di 100°C/s, c’è formazione di fase B già a 902°C, a causa della forte diffusione cinetica nella fase B, la fase liquida scompare presto ed a circa 901°C. al di sotto della temperatura di solidus, l’interfaccia F+B, si sposta rapidamente dalla fase F verso la B. A 849°C la fase B scompare.



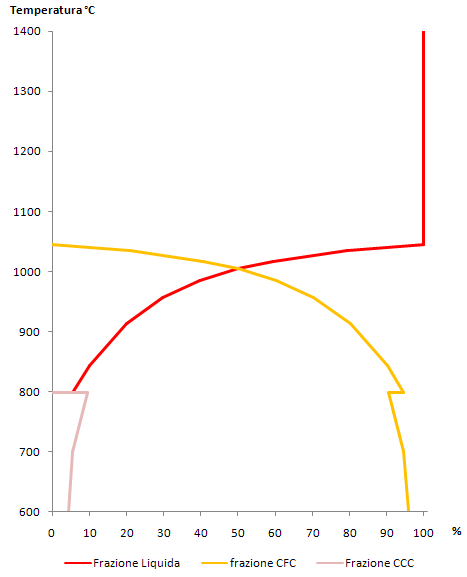
**Figura 5.8**. Calcolo del movimento d’interfaccia di fase durante la solidificazione di una lega Cu-30%Zn per velocità di raffreddamento di 1°C/s e di 100°C/s.

**5.3.4.2. Entalpia, densità e frazioni di fase**

Di seguito i grafici (Figure da 5.9 a 5.13) mostrano le frazioni di fase, entalpia e densità calcolate per rame puro e per leghe di rame Cu-6%Sn e Cu-30%Zn, entrambe per valori di velocità di raffreddamento di 10 °C/s e per temperature che partono da 1400°C per arrivare sino a 600°C. Degno di nota è il range di temperatura diversa e la localizzazione della zona molle per ciascun caso che provoca una discontinuità differente nelle proprietà del materiale. Conseguentemente le simulazioni dei modelli di trasferimento del calore nelle colate sono fortemente dipendenti da questi valori.

I grafici seguenti (Figure 5.9, 5.10 e 5.11) sono rivolti all’analisi della lega Cu-6%Sn. Nello specifico il primo riguardante l’entalpia (Figura 5.9), denota una riduzione graduale della proprietà sino alla temperatura di solidificazione del rame 1083°C. Dopo questa temperatura il calo risulta molto più dolce ed arriva così a temperature nell’intorno degli 800°C dove per un periodo rimane costante per poi riprendere a calare in modo più rapido. La densità (Figura 5.10) ha singolare variazione inversa rispetto a quella dell’entalpia. Analizzando invece le frazioni di fase (Figura 5.11) si osserva una rilavante variazione di fase che rapidamente si evolve al di sotto dei 1050°C portando dopo la scomparsa di quella liquida, ad una frazione cubica a facce centrate CFC che permane poi in maggior quantità sino ai 600°C. La fase CCC cubica a corpo centrato compare soltanto sotto gli 800°C senza superare mai il 10% della struttura totale.

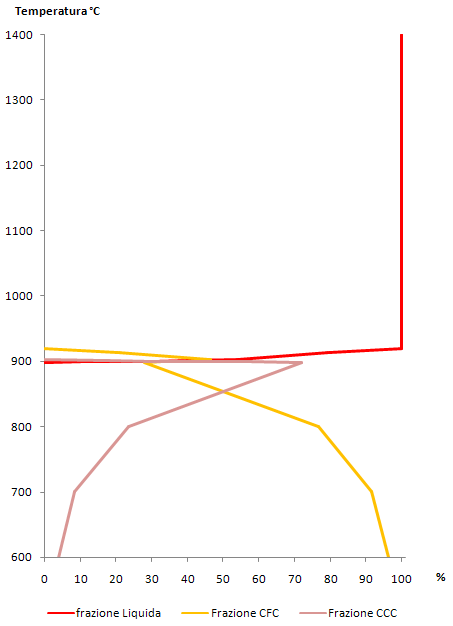
|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.9** .Valori di entalpia in relazione alla temperatura di raffreddamento della lega Cu-6%Sn sottoposta a velocità di raffreddamento di 10°C/s. | **Figura 5.10.** Valori di densità in relazione alla temperatura di raffreddamento della lega Cu-6%Sn sottoposta a velocità di raffreddamento di 10°C/s. |



**Figura 5.11.** Valori di frazioni di fase in relazione alla temperatura di raffreddamento della lega Cu-6%Sn sottoposta a velocità di raffreddamento di 10°C/s.

I grafici di seguito riportati (Figure 5.12, 5.13 e 5.14) sono rivolti all’analisi della lega Cu-35%Zn. Nello specifico il primo, riguardante l’entalpia (Figura 5.12), denota una riduzione graduale della proprietà sino alla temperatura di solidificazione del rame 1083°C. Dopo questa temperatura il calo risulta molto più dolce sino a temperature nell’intorno dei 900°C dal quale inizia a ridursi in modo più rapido. Per quanto riguarda la densità (Figura 5.13) si evince un singolare andamento inverso rispetto a quella dell’entalpia. Analizzando invece le frazioni di fase (Figura 5.14) si osserva una rilavante variazione di fase che rapidamente si evolve al di sotto dei 1050°C portando alla comparsa della frazione cubica a facce centrate CFC e di seguito a quella CCC cubica a corpo centrato. Le tre frazioni coesistono sino circa ai 900°C dopodiché la frazione liquida scompare a scapito di quelle CFC e CCC che si alternano per arrivare ai 600°C con percentuali CFC intorno al 96% della struttura e CCC al 4% circa.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.12.** Valori di entalpia in relazione alla temperatura di raffreddamento della lega Cu-35%Zn sottoposta a velocità di raffreddamento di 10°C/s. | **Figura 5.13.** Valori di densità in relazione alla temperatura di raffreddamento della lega Cu-35%zn sottoposta a velocità di raffreddamento di 10°C/s. |



**Figura 5.14.** Valori di frazioni di fase in relazione alla temperatura di raffreddamento della lega Cu-6%Sn sottoposta a velocità di raffreddamento di 10°C/s.

I grafici sottostanti (Figure 5.15 e 5.16) rappresentano variazione di entalpia e densità per il rame puro durante il processo di solidificazione. Gli andamenti sono tipici di un metallo puro ed il tratto costante di entrambe le proprietà si verifica in corrispondenza della temperatura di fusione del rame 1083°C. A tale temperatura inoltre va ricordato che la struttura passa da liquido a CFC per poi mantenersi tale sino a completo raffreddamento.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.15**. Valori di entalpia in relazione alla temperatura di raffreddamento del rame puro sottoposto a velocità di raffreddamento di 10°C/s. | **Figura 5.16**. Valori di entalpia in relazione alla temperatura di raffreddamento del rame puro sottoposto a velocità di raffreddamento di 10°C/s. |

**5.3.4.3. Effetti della velocità di raffreddamento sui diagrammi di stato**

Di seguito (Figure 5.17 e 5.18) si illustrano gli effetti della velocità di raffreddamento su un possibile diagramma di fase Cu-Sn per frazioni di fase non F (δ ed F-δ) sino a temperatura ambiente. Dal primo grafico (Figura 5.17) si nota che l’aumento della velocità di raffreddamento espande le due fasi. Per esempio per avere una struttura finale priva di formazioni eutettoidiche alla velocità di 10°C/s la percentuale di Sn deve essere inferiore al 4%. Dal secondo grafico (Figura 5.18), si evince che la velocità di raffreddamento aumenta con il contenuto di F+δ nella struttura finale. In una solidificazione reale, la formazione di singola fase δ è talmente lenta che non è possibile distinguerla dalla figura. Nel caso di equilibri della solidificazione la formazione di fase non F porta a sola fase δ ed in quantità considerevole.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.17.** Effetti della velocità di raffreddamento su un possibile diagramma di fase Cu-Sn per frazioni di fase non CFC. | **Figura 5.18.** Effetti della velocità di raffreddamento sulla formazioni di frazioni di fase non CFC. |

Le figure (Figure 5.19 e 5.20) mostrano gli effetti della velocità di raffreddamento su un possibile diagramma di fase Cu-Zn per frazioni di fase non F (B) sino a temperatura ambiente. Dal primo grafico (Figura 5.19) l’elevata velocità di raffreddamento crea l’espansione delle regioni con strutture F+L ed F+B. La cinetica di diffusione della fase B è così buona che la solidificazione della fase B o l’inizio della formazione di fase F da quella B è quasi racchiusa con la velocità di equilibrio della solidificazione. Il secondo grafico (Figura 5.20) mostra che l’aumento del contenuto di Zn aumenta il contenuto di CCC nella struttura finale, ma l’effetto della velocità di raffreddamento su questo non è forte.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.19.** Effetti della velocità di raffreddamento su un possibile diagramma di fase Cu-Zn per frazioni di fase non CFC. | **Figura 5.20.** Effetti della velocità di raffreddamento sulla formazioni di frazioni di fase CCC. |

**5.3.4.4 Valutazioni delle proprietà**

Un modello sulla termodinamica della cinetica di solidificazione è stato qui illustrato per leghe binarie di rame ottone e bronzo, ma potrebbero essere allo stesso modo presentate per altre leghe comuni di rame ed altri. Il modello simula le trasformazioni F🡪L, B🡪L, F🡪B, F🡪composti e F+L🡪B e le relative ridistribuzioni del soluto a seconda della composizione della lega, della velocità di raffreddamento e della struttura dendritica. La simulazione è basata su equazioni termodinamiche chimico potenziali, equazioni di determinazione dell’equilibrio termodinamico dell’interfaccia di fase, equazioni di bilancio dei materiali soluti relativamente al movimento delle interfacce di fase ed alle leggi della diffusione di Fick simulando la diffusione del soluto nelle fasi F e nelle fasi B. I calcoli vengono eseguiti ad intervalli definiti ed in zone definite nelle strutture dendritiche. In aggiunta, formule specifiche hanno permesso il calcolo delle proprietà termo fisiche dei materiali, quali: entalpia, calore specifico, conduttività termica e densità dallo stato liquido raffreddando via via sino a temperatura ambiente. Questi calcoli forniscono proprietà importanti e valori fondamentali sul trasferimento del calore nella colata delle leghe di rame.

Nella lega Cu-6%Sn l’aumento della velocità di raffreddamento causa segregazioni interdendritiche che saranno legate appunto alla solidificazione. Al di sotto della temperatura di solidus, se il raffreddamento è lento la fase B scompare rapidamente dalla struttura, ma a basse velocità ciò non accade, tuttavia vi è la formazione della fase δ. Questo può essere causato dalle basse cinetiche di diffusività per l’equilibrio di solidificazione.

Per le leghe Cu-30%Zn il percorso di solidificazione è molto simile al precedente ma ha effetti di raffreddamento meno drammatici per la cinetica di diffusione migliore di queste leghe.

I valori termofisici che sono stati calcolati mostrano la forte dipendenza dall’elemento legante e non dalla differenza di temperatura. I calcoli sono stati effettuati e ricavati in merito a differenti leghe per determinare la massima composizione al di sotto della quale le formazioni di fasi secondarie possono essere evitate. Con elevate velocità di raffreddamento, questa composizione massima diventa molto piccola. Gli esempi fatti sin ora mostrano l’effetto significativo del raffreddamento sulla struttura di solidificazione delle leghe di rame. Il passo successivo è quello di simulare la distribuzione delle tensioni residue nei materiali colati. Il parametro principale in questo caso sarà il controllo della formazione di fasi sfavorevoli e tensioni a seconda della variazione dei parametri come velocità di colata e raffreddamento.

**5.3.4.5. Simulazione di solidificazione della lega Cu-Zn**

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.21**. Cu95-Zn5 ( wt%), simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. | **Figura 5.22.**Cu90-Zn10 (wt%), simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. |
| **Figura 5.23**. Cu80-Zn20 (wt%), simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. | **Figura 5.24**.Cu70-Zn30 (wt%), simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. |
| **Figura 5.25**. Cu60-Zn40 ( wt%) simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. | **Figura 5.26.**Cu50-Zn50 (wt%), simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. |

I grafici sopra (Figure da 5.21 a 5.26) illustrano attraverso una simulazione, per mezzo di software Pandat, l’andamento crescente della frazione solida in una lega binaria di ottone Cu-Zn. Nello specifico vengono elaborati diversi modelli che mostrano la variazione di fase solida durante il processo di solidificazione per una lega con graduale aumento della percentuale in peso di zinco. In sostanza si può affermare che all’aumentare della presenza di zinco nella lega binaria a base di rame la fase solida compare a temperature più basse e tutto il processo di solidificazione in generale si sviluppa a temperature minori. Si ricorda che la temperatura di fusione del rame è di 1083°C e quella dello zinco è 419°C. Di seguito la simulazione viene ampliata (Figure da 5.27 a 5.29) con l’aggiunta di un terzo elemento, lo stagno (temperatura di fusione 232°C). Il risultato, ragionevolmente, è una sensibile riduzione della temperatura di completa solidificazione in funzione dell’aumentare dell’elemento in lega.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.27.** Cu50-Zn40-Sn-10 (wt%), simulazione solidificazione (secondo scheil), Pandat. | **Figura 5.28**. Cu40-Zn40-Sn20 (wt%), simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. |
| **Figura 5.29.** Cu45-Zn10- Sn45 (wt%), simulazione solidificazione (secondo Scheil), Pandat. |  |

**5.3.4.6. Confronto tra simulazioni ed analisi di un caso reale**

Si illustra brevemente in questa parte della tesi lo studio di un caso reale attraverso il confronto di dati già disponibili e quelli ottenuti da una simulazione per mezzo di software Pandat. Analizzando la coerenza dei valori calcolati con metodi diversi si va di seguito a valutare la possibilità di intervento su un particolare in lega di bronzo Cu-12Sn prodotto per pressofusione a bassa pressione.

**5.3.4.6.1 Valutazione dell’attendibilità della simulazione con software Pandat**

Prima di analizzare il problema reale prodotto con lega Cu-12Sn, si fa un confronto di simulazione tra un elaborato stilato per mezzo di software Pandat e una simulazione già esistente per la lega Cu-6Sn. L’informazione è ottenuta dall’atricolo ‘’Thermodynamic-kinetic model for the simulation of solidification in binary copper alloys and calculation of thermophysical properties’’ di J. Miettinen (Tabella 5.2).

Tabella 5.2 Confronto tra dati J.Miettinen e dati Pandat per lega Cu-6Sn.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Dati J. Miettinen** | | |  | **Dati Pandat** | | |
| **T °C** | **fl** | **fs** |  | **T °C** | **fl** | **fs** |
|  |  |  |  |  |  |  |
| 1044,2 | 1 | 0 |  | 1038,76 | 1 | 0 |
| 1033,7 | 0,791 | 0,209 |  | 1032,46 | 0,785536 | 0,214464 |
| 1016,9 | 0,593 | 0,407 |  | 1016,46 | 0,587064 | 0,412936 |
| 1004,6 | 0,499 | 0,501 |  | 1003,66 | 0,482587 | 0,517413 |
| 985,1 | 0,396 | 0,604 |  | 984,46 | 0,373134 | 0,626866 |
| 956,9 | 0,297 | 0,0703 |  | 955,66 | 0,265474 | 0,734526 |
| 913,8 | 0,199 | 0,801 |  | 914,06 | 0,167266 | 0,832734 |
| 843,2 | 0,099 | 0,901 |  | 843,66 | 0,065499 | 0,934501 |
| 798,9 | 0,054 | 0,946 |  | 798,86 | 0,019537 | 0,980463 |
| 797,6 | 0 | 1 |  | 797,26 | 0,018062 | 0,981938 |
| 700 | 0 | 1 |  | 699.064 | 8,27E-06 | 0,999992 |
| 600 | 0 | 1 |  | 600.164 | 1,6E-08 | 0,999999 |

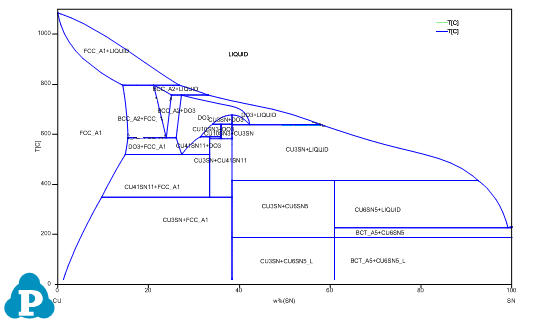
Dal confronto se ne deduce che i valori delle frazioni di fase ottenuti da J. Miettinen e quelli simulati con Pandat discostano in maniera poco significativa. Per completare la simulazione il con il software, si è lanciato un modello di calcolo per determinare l’andamento della frazione solida della lega binaria di bronzo Cu-Sn e di seguito viene riportato il grafico (Figura5.30) ottenuto attraverso tale simulazione del processo.



**Figura 5.30.** Cu-6Sn (wt%), simulazione solidificazione, Pandat.

**5.3.4.6.2. Simulazione problema reale oggetto di studio**

Valutata la bontà dei dati ottenuti con una simulazione, possiamo procedere con l'analisi del caso reale in esame. Si vuole ottenere uno studio di massima riguardante diagramma di fase e frazioni liquido-solido della lega Cu-12Sn (Figura 5.31). Lo studio si propone di seguire l’andamento della solidificazione anche attraverso le trasformazioni delle frazioni di fase per poter eventualmente stabilire delle connessioni con la formazione di cricche sul pezzo finito.



**Figura 5.31.** Diagramma di fase e frazioni liquido-solido della lega Cu-12Sn, Pandat.

Il grafico evidenzia che seguendo la retta di solidificazione relativa alla lega in esame le varie fasi assumono l’andamento descritto. Partendo da una fase completamente liquida al diminuire della temperatura si passa attraverso la fase FCC+Liquido (FCC= struttura cubica a facce centrate) per arrivare poi a completa solidificazione.

**5.3.4.6.3. Analisi visiva del problema reale**

Vengono di seguito riportate le immagini relative alla simulazione di riempimento e solidificazione del particolare prodotto (Figure da 5.32 a 5.35).

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 5.32.** Fase di riempimento, 3s circa. | **Figura 5.33.** Fase di riempimento, 7s circa. |
| **Figura 5.34.** Fase di solidificazione, 20s circa. | **Figura 5.35.** Fase di solidificazione, 40s circa. |

Relazionando i valori di massima ottenuti con i parametri osservati nelle figure illustrative (Figure da 5.32 a 5. 35) a disposizione si può giungere ad una serie di ipotesi circa la natura delle cricche osservate sul pezzo effettivamente prodotto e realmente visionato.

Dall'analisi visiva si nota la presenza di cricche in corrispondenza degli attacchi del canale di colata e del serbatoio di metallo liquido (materozza). La formazione di cricche è determinata dalle spinte idrauliche e dal carico ciclico termico al quale è soggetto il sistema nel suo complesso. Per quanto riguarda il carico ciclico termico, esso è causa della propagazione delle cricche superficiali che si determinano in funzione delle oscillazioni da uno stato di compressione ad uno stato di contrazione.

Effettuando delle valutazioni qualitative si può giungere alla conclusione che l'origine di tali difetti non sia causata nello specifico dall’errato tempo di riempimento ma dal tempo e dalla modalità di solidificazione.

**5.3.4.6.4. Soluzioni proposte**

I mezzi a disposizione non permettono di elaborare delle soluzioni immediate per risolve nella sua complessità il problema affrontato, tuttavia è possibile indicare delle linee guida. Se ne possono individuare sostanzialmente due.

La prima è orientata ad un controllo delle temperature per mezzo di un sistema di raffreddamento ad acqua, interno alla conchiglia. Questa soluzione dal punto di vista economico risulta difficilmente sostenibile in quanto richiede uno studio di progettazione approfondito e un impiego ingente di risorse.

La seconda individua la possibilità di installare una materozza con più capacità e che interessi una maggiore area superficiale al fine di permettere una uniforme/graduale distribuzione del calore fornita dal metallo liquido d'apporto all'interno del pezzo, questa soluzione va ad intervenire sulla cricca formatasi appunto nelle vicinanze del serbatoio di metallo liquido. Per quanto concerne la cricca in corrispondenza del canale d'ingresso, si potrebbe individuare una diversa collocazione dello stesso. Per quest'ultima soluzione ci si potrebbe affidare alla praticità di una consulenza di un operatore esperto prima di procedere con eventuali simulazioni.

**6. ANALISI PER L’OTTIMIZZAZIONE DELLA SIMULAZIONE**

Le verifiche ed i miglioramenti dei risultati delle simulazioni sono maggiori quanto maggiore è la conoscenza di tutti i parametri che intervengono in maniera significativa nel processo di colata in conchiglia a bassa pressione oltre che di tutte la caratteristiche fisiche, chimiche e meccaniche dei materiali da utilizzare. Per migliorare l’accuratezza delle simulazioni occorre tener conto di tutti questi elementi in quanto ognuno ha influenza sugli esiti. Al fine di migliorare la precisione e la correttezza, questi parametri, devono esser verificati, così da rappresentare al meglio la realtà. Spesso, come detto, i valori forniti dal software di simulazione sono solo approssimazioni o rappresentazione di modelli di differenti materiali o processi. In generale i parametri di processo sono diversi in ogni fonderia, e pertanto è di vitale importanza verificarli per ognuno di essi. Ci sono alcune diverse categorie di valori che dovrebbero essere verificati, in quanto possano anche essere, in molti casi, migliorati. I parametri sono separabili in dati da immettere o dati iniziali e dati elaborati durante le diverse fasi di simulazione.

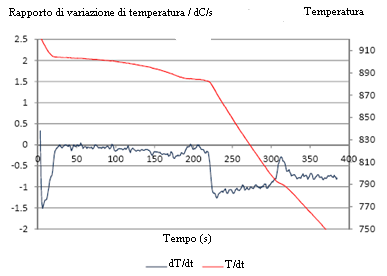
**6.1. Metodi di valutazione per l’ottimizzazione della scelta dei materiali**

È molto importante per le simulazioni avere una fornitura corretta delle proprietà fondamentali dei materiali da inserire nel software di simulazione. Alcuni dei materiali utilizzati nei processi di simulazione non sono già presenti nel database del software, per questo le informazioni ed i modelli per alcuni di questi sono approssimazioni, alcune ricavate da dati di altri metalli o leghe simili. La mancanza di valori ufficiali, impedisce di aggiornare il database descrivendo correttamente i materiali mancanti con la dovuta precisione. Il livello di accuratezza richiesto per i dati iniziali è dipendente dalla necessità di ottenere una simulazione realistica dalla quale, oltre che utilizzarla direttamente nella produzione, si possano anche avere ulteriori sviluppi con studi futuri. Leghe da colata ed i materiali da conchiglia sono i materiali le cui proprietà hanno maggiore impatto sui processi di pressofusione a bassa pressione.

**6.1.1. Ottimizzazione nella scelta delle proprietà delle leghe di rame da pressofusine**

Le proprietà delle leghe da fonderia influenzano notevolmente i risultati delle simulazioni, ed è importante avere corretti dati di partenza su questi materiali. Le leghe da fonderia e le loro proprietà necessitano di essere descritte per un ampia gamma di temperature, da quella ambiente fino a quella in cui si presenta lo stato liquido. Reali misurazioni delle proprietà sono tuttavia difficoltose oltre che costose da effettuare, per questo motivo i dati delle leghe da fonderia sono stati aggiornati soltanto attraverso l’uso di modelli teorici per la simulazione e sono state poi verificate attraverso misurazioni termiche o simulazioni. I dati mancanti vengono scelti ed introdotti, valutando caso per caso dati di materiali molto simili e modificando direttamente il database così che le simulazioni per le composizioni necessarie possano essere lanciate. I dati termodinamici, la diffusione, ed i dati sulle formazioni dendritiche possono essere calcolati quando la composizione e la velocità di raffreddamento sono conosciute ed inserite nel database. La verifica delle proprietà simulate attraverso analisi teoriche dei risultati dei modelli per le leghe da fonderia vengono effettuate durante la simulazione. Nelle prime fasi sperimentali, si valuta soltanto lo scostamento tra processo reale e simulato, in quanto con il proseguo degli studi i modelli risulteranno essere sempre più realistici. Lo scopo principale delle analisi termiche è di verificare le temperature di liquidus e solidus per una specifica lista di leghe scelte. Queste temperature sono determinate attraverso le analisi termiche e devono essere ragionevolmente nei limiti reali, soltanto quando non discostano troppo dalla realtà, nei valori simulati, i dati della simulazione possono essere considerati corretti ed idonei all’uso. Le composizioni delle leghe in esame vanno analizzate prima delle simulazioni e prima che i risultati siano attendibili per assicurare che la composizione rientri nelle specifiche.

Le misurazioni di accertamento del caso vengono effettuate con sistemi dotati di termocoppie in modo da ottenere i valori specifici delle curve di raffreddamento. Occorre per ogni campione di diversa lega effettuare più misurazioni per garantire l’affidabilità dei risultati. I sistemi di misura devono esser posizionati comunque vicino alle zone di lavoro attive, vicino alle macchine da pressofusione così che il metallo possa facilmente essere anche versato nei dispositivi per le misurazione manuali. Dopo che il metallo è stato versato nel dispositivo di misurazione, viene lasciato raffreddare sufficientemente così che le trasformazioni di fase di interesse possano esser rilevate quindi rappresentate nelle curve di raffreddamento. Le trasformazioni delle diverse fasi nel materiale possono essere viste in un analisi termica come cambiamenti di zone di raffreddamento. Le temperature di trasformazione di fase di interesse nei materiali da fonderia sono quelle di liquidus e solidus. Come risulta in (Figura 6\_1), le leghe di rame hanno la caratteristica di raffreddarsi rapidamente dalla temperatura di liquidus, dopo questo la velocità di raffreddamento e la temperatura si stabilizzano. Ciò è causato dal calore latente rilasciato dalla solidificazione del materiale. L’aumento della velocità di raffreddamento aumenta ancora dopo che il materiale è completamente solidificato.



**Figura 6\_1**. Analisi termica di solidificazione tipica per una lega di rame da fonderia.

**6.1.2. Ottimizzazione nella scelta delle proprietà dei materiali da conchiglia**

Il crescere della precisione dei risultati delle simulazioni è conseguenza dei miglioramenti e dei progressi sulla conoscenza dei materiali. Nello specifico i materiali della conchiglia hanno una grande influenza sulla solidificazione del fuso e pertanto vanno conosciuti. Parametri più precisi hanno, negli ultimi anni, permesso lo sviluppo di differenti materiali che spesso sono stati testati direttamente in modo da stabilire quale tipo di impatto avessero nel processo di colata. Tra quelli testati e più utilizzati ci sono le leghe rame cromo zirconio e la più comunemente usata lega di rame berillio. Diverse proprietà sui materiali da conchiglia possono essere misurate così che le descrizioni per ognuno di essi, portate nei software di simulazione, possano essere più complete possibile. La diffusibilità termica, la densità ed il calore specifico dei materiali sono i principali parametri da analizzare in funzione della temperatura, tipicamente per range che vanno da quella ambiente sino ad arrivare a 600°C, cioè la temperatura di utilizzo delle conchiglie ed oltre alla quale solitamente lo stampo non arriva durante il processo di colata in pressofusione a bassa pressione. Questi valori vengono anche utilizzati nei calcoli di conduttività termica dei materiali da stampo. Altri parametri rilevanti di cui tener conto sono capacità termica specifica, densità e diffusività termica. La capacità termica specifica ha significativa influenza sui risultati della simulazione della pressofusione a bassa pressione, essa infatti determina quanto la conchiglia si riscalderà durante i cicli di colata e quanto calore potrà smaltire o scambiare. La capacità termica specifica viene misurata per mezzo di calorimetri differenziali a scansione. La densità dei materiali per conchiglia è molto importante in quanto descrive i materiali da utilizzare nei programmi di simulazione per pressofusione. La densità viene inoltre usata per calcolare altre proprietà dei materiali come, la conduttività termica e si misura attraverso l’uso di dilatometro, strumento che misura l’allungamento termico lineare dei campioni in funzione dell’aumento della temperatura. I dati acquisiti vengono poi utilizzati per calcolare la densità dei provini in funzione della temperatura, cioè di quando la lunghezza ed il peso dei provini aumenta. Altro importante dato da ottenere prima dell’uso dei materiali da conchiglia nella colata per pressofusione a bassa pressione è la diffusività termica. Misurata con attrezzature laser, la diffusività termica consente di ottenere i valori di conduttività all’interno dei richiesti range di temperatura per i diversi materiali. Nelle misurazioni attraverso la diffusione di raggio laser, i provini sono soggetti a precisi impulsi e la temperatura nella parte posteriore viene misurata con un sensore a raggi infrarossi il quale individua quanto calore si trasferisce sull’opposto lato del privino stesso. Monitorando continuamente, la diffusività termica, può essere calcolata dai cambiamenti di temperatura in funzione del tempo. Tutti i rilevamenti delle proprietà appena descritte ma anche di molte altre vanno effettuati possibilmente per i range di temperatura effettivamente raggiunti dagli stampi. Ciò è necessario per descrivere al meglio i materiali nel software di simulazione e quindi permettere una modellazione realistica.

**6.1.3. Ottimizzazione nella scelta delle proprietà dei materiali per le anime**

I materiali per le anime, tipicamente di origine sabbiosa coprono un ruolo di nicchia nello studio di una corretta simulazione di pressofusione a bassa pressione. Essi infatti trasferiscono soltanto piccole quantità di calore dalla colata se comparati al materiale della conchiglia. La loro influenza sui risultati è quindi così piccola che modelli accurati di anime in sabbia non sono cruciali come quelli dei materiali della conchiglia. Le sabbie vengono confrontate tra loro in modo da determinare le differenze principali, come ad esempio la loro conduttività termica, allo scopo di stabilire l’eventuale necessità per maggiori accurate misurazioni sui materiali delle anime. Se ne dedurrà che i test di confronto sui materiali delle anime Alphaè sufficiente effettuarli su piccoli campioni. Diverse composizioni di anime possono essere testate per stabilire se ci sono significative differenze tra i materiali delle anime, ma si scoprirà che la cosa non ha rilevanza valida a comprenderne il tempo, i costi, quindi gli investimenti per ricerche sperimentali.

Le anime sono agglomerati di terre o sabbie mescolate, vengono formate con uno stampo in negativo detto *cassa d’anima*. La formatura dell'anima può essere a caldo (*Shell-Molding*) oppure a freddo (*Isocure*, *Isoset*) mediante resine leganti mescolate alla sabbia. Ovviamente la scelta della formatura è funzione dei costi differenti e delle diverse caratteristiche meccaniche della stessa anima. Deve presentare determinate caratteristiche meccaniche in modo da facilitarne l'estrazione, impedire eventuali difetti nel pezzo ed eventuali cedimenti dell'anima stessa. La sabbia per la preparazione di questi particolari deve rispondere più particolarmente ai seguenti requisiti:

* avere porosità sufficiente;
* resistere al calore senza provocare screpolature nell'anima;
* permettere che l'anima, dopo il raffreddamento del getto, possa facilmente rompersi ed essere estratta;
* permettere che l'anima non si deformi.

Per soddisfare contemporaneamente tutte queste condizioni, si usa adoperare sabbia che contenga poca argilla, se ne ottiene la coesione poi con agglomeranti speciali. Per la confezione delle anime si può usare anche sabbia grassa che si rende più magra con aggiunta di silice. La porosità è ottenuta mescolandovi sostanze organiche (per esempio paglia tritata). Le buone terre da fonderia per il bronzo e per l'ottone devono essere essenzialmente dotate di grande finezza compatibile con la massima porosità. La refrattarietà potrà per altro essere minore delle terre per ghisa ed acciaio. Una buona mescolanza per forme a secco è la seguente: terra vecchia 50%, terra gialla forte 50%. Quest'ultima contiene: silice 76-80%, allumina e ossido ferrico 19-15%, calce 1-1,5%, ossido di magnesio 0,5%. La sua perdita al fuoco è del 2%. Per rendere più ariosa la miscela si diminuisce la terra nuova o si aggiunge una quantità di terra assai magra (contenente 3,5-5% d'allumina). Le anime di sabbia sono naturalmente le più ariose, esse sono però fragili per cui, in determinate circostanze, la sabbia siliciosa può essere vantaggiosamente sostituita con miscela di sabbia e terra. Nella scelta degli agglomeranti si eviteranno in generale quelli resinosi o bituminosi. Buone mescolanze per anime complicate e fragili sono: sabbia (al 95% di silice) 92%; farina di semi di lino 4%; olio di lino 4%. Per anime più semplici invece si possono utilizzare: terra vecchia 2 parti; terra nuova 1,5; sabbia di lago o di fiume 1; segatura 0,75.

**6.2. Ottimizzazione della sperimentazione pratica**

L’attrezzatura di misurazione, reale, sul campo, deve comprendere i vari strumenti descritti nei paragrafi e capitoli precedenti, va però tenuto in considerazione che occorre eliminare distribuzioni irregolari di calore e le termocoppie vanno poste in luoghi sicuri che non creino, con i loro collegamenti, scompensi od irregolarità al normale svolgersi delle attività lavorative. Eventuali computer portatili e ricevitori vanno posti in luoghi sicuri. In aggiunta, tutto ciò che è possibile va isolato, onde evitare contatti con elevate temperature, umidità e schizzi di materiale rovente. L’isolamento va posto in modo che comunque gli strumenti siano attivi verso la superficie di misurazione per un miglior contatto e riduzione di fattori esterni che ne possano influenzare la misura. L’analisi di misurazione va eseguita nella maniera più completa, quindi, non trascurando lati scomodi o nascosti. Per esempio può essere utile una termocoppia sul fondo del provino per garantire che al piastra calda fornisca una temperatura stabile. La velocità alla quale il calore arriva alla cima del provino dipende dalla conduttività termica del provino. Le misurazioni vanno effettuate riscaldando ad una stabile temperatura, quando viene raggiunta, i ricevitori sono impostati per registrare le misurazioni del sistema. È possibile iniziare i test con eventuali materiali d’anima diversi, leghe e quant’altro necessiti di controllo. Durante le misurazioni la scarsa precisione di qualsiasi strumento rende il controllo della temperatura difficoltoso, ciò causa qualche variazione dei risultati, tuttavia va fatta ove possibile una comparazione dei risultati ottenuti sperimentalmente con i dati reali e certificati a disposizione, questo per avere anche un metodo di paragone e dell’affidabilità dell’attrezzatura, della strumentazione, nonché di tutta la simulazione successiva. Non è necessario esagerare con le misurazioni, un numero minimo, ma controllato e preciso, fornisce già una stima sufficientemente buona sulla conduttività e sulle proprietà dei diversi materiali eventualmente in esame. Importante sarà la rapidità delle misurazioni atta a non considerare disturbi che possono sopraggiungere nel normale corso dei processi.

Dai risultati misurati si possono valutare diversi comportamenti delle caratteristiche per ogni materiale analizzato. È conveniente far poi riferimento ad una grandezza media per ognuno, come può essere velocità di calcolata e curve tempo-temperatura, misurate sulle superfici dei campioni, anche interpolandole tra loro. Si potrà quindi estrapolare in un grafico una velocità media di riscaldamento per tutti i differenti tipi di materiali per anime, come del resto per ogni altro tipo di materiale utilizzato nel processo. Risulterà evidente però, che non ci saranno significative differenze in merito alla conduttività termica dei materiali sabbiosi per le anime, le differenze saranno talmente piccole che non avranno decisivi effetti nel trasferimento di calore durante i cicli di colata. Un confronto di misurazioni con i provini dei materiali sarebbe molto utile da eseguire per mostrare per capire quanto bassa la conduttività termica sia nei materiali sabbiosi. Le misurazioni sui materiali delle anime non rileverebbero tuttavia alcuna grande differenza nella conduttività termica. È possibile che a più alte temperature la differenza sia maggiore, ma ciò, non è di interesse per la tecnica in esame. Le temperature durante il processo di colata possono arrivare anche a salire fino a 1000°C per questo le proprietà dei materiali sabbiosi delle anime a queste temperature possono essere del tutto diverse una dall’altra e si possono verificare parecchie reazioni che potrebbero avere grandi influenze sui risultati di colata. Da non sottovalutare i leganti interni che, a temperature maggiori, bruceranno rilasciando varie quantità di gas nelle cavità della conchiglia e nel metallo fuso. La conduttività termica dei materiali sabbiosi non causa significanti differenze. Anime da sabbie differenti hanno dimostrato nella realtà avere significative differenze nella pratica. Una delle possibili spiegazioni di questo è che i differenti leganti reagiscono diversamente alle alte temperature, emettendo diverse quantità di gas. Le pressioni dei gas emessi dalle anime ad elevate temperature, possono avere grandi effetti sull’alimentazione della fusione, laddove sorgono problemi di alimentazione. Con le versioni più recenti dei software di simulazione sono incluse maggiori possibilità di simulazione e migliori risultati sui comportamenti oltre che delle leghe anche di sabbie e dei materiali per anime. Inoltre anche gas rilasciati e zone maggiormente suscettibili al fenomeno saranno elementi compresi nelle più recenti versioni, ciò avrà effetti migliorativi sulla precisione delle simulazioni specialmente in questo processo. Va detto che con le nuove versioni che con le versioni dei software attuali più evolute non è possibile simulare il comportamento dei materiali per anime con precisione sufficientemente soddisfacente.

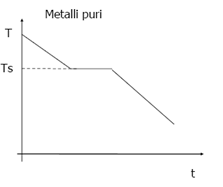
**6.3. Ottimizzazione della fase di solidificazione**

La fase di solidificazione del metallo fuso all’interno della conchiglia avviene sotto il processo di sviluppo dei fenomeni termodinamici e cinetici base della solidificazione. Si è già detto che i coefficienti di scambio termico non sono costanti nelle diverse interfacce tra conchiglia e metallo in quanto dipendono dalle singole variazioni che si sviluppano anche nell’intorno delle stesse interfacce. Gli elementi tipici della solidificazione dei metalli e leghe sono:

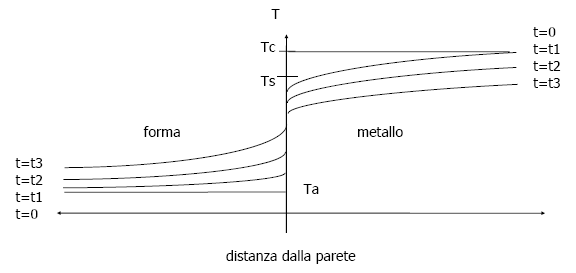
* Nucleazione: è uno dei meccanismi, assieme all’accrescimento, attraverso cui avviene la cristallizzazione ovvero il passaggio dallo stato liquido a quello solido. Nello specifico in questa fase, il numero dei cristalli presenti aumenta.
* Accrescimento: è il fenomeno che assieme alla nucleazione permette la cristallizzazione. In questa fase si ha l’aumento delle dimensioni dei cristalli.
* Scambi termici, questi sono dipendenti dalle proprietà dei materiali e dal coefficiente di scambio termico delle interfacce in gioco nel processo.
* Variazioni di volume, sono tipiche di ogni materiale si ricorda quella del rame di circa il 4% in un processo di fusione.
* Sottrazione di calore attraverso le pareti.

Tutti i fattori appena elencati intervengono nel processo di solidificazione caratterizzandola. Per quanto riguarda inoltre nucleazione ed accrescimento c’è da rilevare un'altra questione importante, quella delle velocità con cui si sviluppano, in quanto fortemente collegata alla cristallizzazione. Se la velocità di nucleazione è molto elevata rispetto a quella di accrescimento, il solido presenterà una struttura più vicina allo stato amorfo, mentre se le velocità sono squilibrate verso l’accrescimento, il solido avrà una struttura più simile a quella di un solido monocristallino.

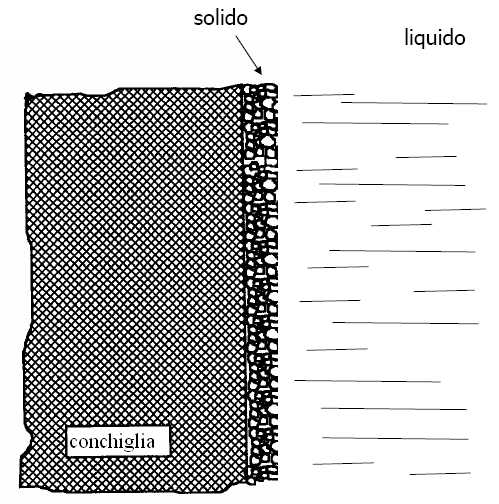
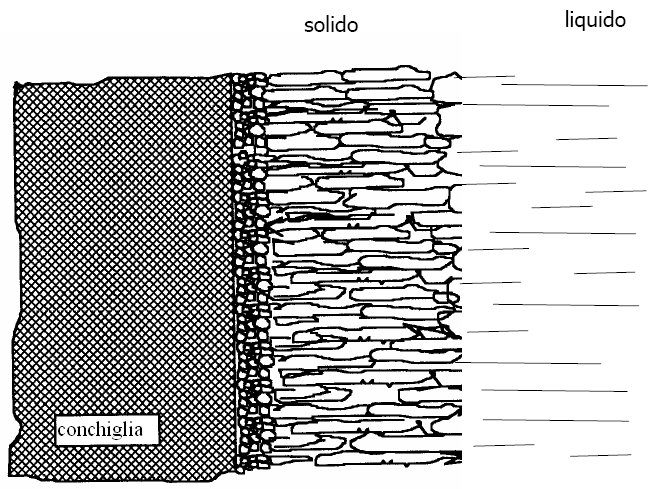
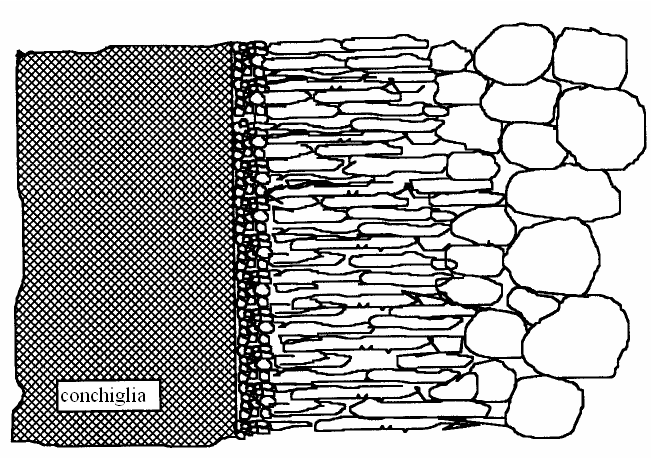
La solidificazione di un metallo puro avviene in modo completamente diverso rispetto quella di una lega, ciò perché essa è composta da più elementi ognuno dei quali ha differenti temperature di fusione. Il fronte di solidificazione per i metalli puri è infatti uniforme (Figura 6.2). Per le leghe esiste un range di solidificazione (Tis - Tfs) in cui esistono liquido e solido in equilibrio. Nel proseguo della tesi vengono rappresentati brevemente alcuni andamenti cinetici e termodinamici che caratterizzano i processi di solidificazione dei metalli puri e delle leghe; sono rappresentati inoltre i processi di formatura della struttura cristallina durante detto processo di solidificazione. Importante non dimenticare che questi fenomeni influenzano il coefficiente di scambio termico interfacciale, in quanto legato alla variazione della temperatura in funzione di tempo e distanza dalla parete (Figura 6.3).



**Figura 6.2**. Caso ideale. Andamento tempo temperatura nel processo di solidificazione di un metallo puro.



**Figura 6.3**. Caso reale. Andamento tempo temperatura nel processo di solidificazione di metalli in funzione della distanza dalla parete.

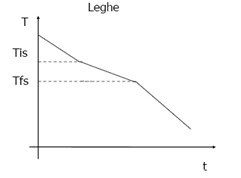
  

**Figura 6.4** **Figura 6.5** **Figura 6.6**

Le tre figure soprastanti visualizzano la struttura di cristallizzazione di un metallo puro durante tre diverse fasi di solidificazione:

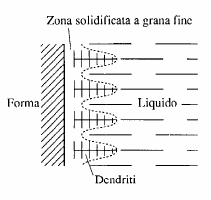
* Figura 6.4. t = t1: alta differenza di temperatura tra conchiglia e metallo fuso caratterizza un grosso sottoraffreddamento e la formazione di molti grani piccoli. Questa struttura fornisce buone caratteristiche meccaniche, crosta dura che può dare problemi nelle lavorazioni meccaniche successive.
* Figura 6.5. t = t2: la solidificazione interessa una zona maggiore di metallo fuso ed aumenta in valore assoluto la concentrazione di volume. Questa fase comprende anche distacco dalla conchiglia del metallo con possibile presenza di aria interposta che riduce la conduttività, quindi rallentamento della velocità di raffreddamento con direzioni preferenziali di sottrazione del calore e conseguente formazione di grani allungati.
* Figura 6.6. t = t3: minori differenze di temperatura, minor conducibilità senza particolari direzioni di sottrazioni del calore. Creazione di grani grossi.

Nella solidificazione delle leghe c’è la presenza, oltre che del metallo base, di uno o più materiali alliganti, ognuno dei quali avrà temperatura di solidificazione differente. Esiste quindi un range di solidificazione Tis - Tfs in cui esistono liquido e solido in equilibrio, questo range può essere stretto <50°C o ampio >50°C, in tale zona si formano dendriti. È di seguito mostrato un caso reale dell’andamento tempo - temperatura durante la solidificazione di una lega (Figura 6.7), da esso si nota la caratteristica principale, di triplice variazione della pendenza, apportata dalla lega alla solidificazione del materiale. Avendo cioè differenti temperature di inizio e fine solidificazione si avrà la contemporanea presenza di metallo fuso e solido nel getto prima della completa solidificazione.

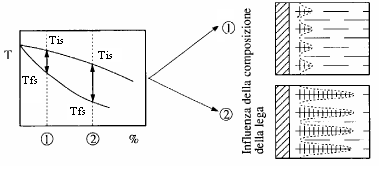


**Figura 6.7**. Caso ideale. Andamento tempo temperatura nel processo di solidificazione di una lega.

La solidificazione delle leghe risulta molto più complicata di quella di un metallo puro, in quanto le diverse temperature di solidificazione dei componenti causano formazioni dendritiche a causa delle direzioni preferenziali di asportazione del calore, della velocità di raffreddamento (Figura 6.8) ed anche dalle percentuali di elementi alliganti (Figura 6\_9). Questo andamento particolare di raffreddamento e della solidificazione cui sono soggette per loro natura le leghe, è causa di numerosi problemi oltre che di concentrazione dei basso fondenti nel cuore del particolare prodotto. Va ricordato cha la tecnica di colata in conchiglia per pressofusione a bassa pressione riduce gran parte dei problemi omogeneizzando le strutture cristalline del metallo durante la sua solidificazione che viene mantenuta a pressione costante.



**Figura 6.8**. Struttura di cristallizzazione dendritica di una lega durante la solidificazione.



**Figura 6.8**. Processo di formazioni dendritiche di solidificazione di leghe a seconda delle percentuali di elementi alliganti.

Importanza rilevante nel processo è anche la velocità di solidificazione in quanto da essa dipende la formazione di dendriti. In base a questa velocità si hanno diverse strutture cristalline e da esse dipendono le proprietà finali del prodotto. Per esempio con velocità normali non si da tempo alla composizione del getto di omogeneizzarsi, lasciando negli spazi interdendritici concentrazione differente; rompendo le strutture dendritiche si aumenta l’omogeneizzazione. Le velocità di solidificazione e la formazione intercristallina sono mostrate di seguito (Tabella 6.1). Strutture più fini forniscono in particolare maggiore resistenza meccanica e duttilità, minore microporosità (vuoti da ritiro interdendritico), una diminuzione di tendenza a criccatura e rottura del pezzo.

**Tabella 6.1**. Classificazione delle velocità di solidificazione e relativa struttura.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Basse velocità di raffreddamento | (10^2 K/s circa) | Dendriti grosse con ampi spazi tra i rami delle stesse |
| Alte velocità di raffreddamento | (10^4 K/s circa) | Strutture fini |
| Altissime velocità di raffreddamento | (10^6 – 10^8 K/s circa) | Tendenza di formazione di leghe amorfe |

**6.3.1. I difetti**

La non omogeneità del materiale di composizione di una lega, è causa di numerose problematiche durante i processi di solidificazione e raffreddamento. Tra questi troviamo porosità interdendritica, disomogeneità, anisotropia ed inneschi di fratture, per conseguenza talune volte si è costretti ad intervenire con trattamenti termici di ricottura post processo, trattamento termico tipico per le leghe di rame. La classificazione dei difetti di solidificazione può essere fatta in base alla sua origine od al tipo di difetto. Di seguito sono riportate le varie classificazioni dei difetti, in base all’origine (Tabella 6.2) ed in base al tipo di difetto (Tabella 6.3) in relazione agli elementi influenzanti ed i possibili rimedi.

**Tabella 6.2.** Classificazione in base all’origine del difetto di solidificazione.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***Classificazione in base all’origine*** | ***Parametri fondamentali che li influenzano*** | ***Prevenzioni e rimedi*** |
| - reazioni tra metallo fuso e conchiglia durante la colata  - gas disciolti od intrappolati  - contrazione del volume al passaggio solido liquido  - ritiro dopo la solidificazione  - segregazione | - temperatura di colata  - velocità di colata | - modifiche del disegno  - modifiche del processo  - eliminazione errori accidentali durante la fabbricazione  - riparazione del getto |

**Tabella 6.3**. Classificazione in base al tipo di difetto di solidificazione.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***Classificazione in base al tipo*** | ***Parametri fondamentali che li influenzano o diagnosi*** | ***Prevenzioni e rimedi*** |
| - incompleto riempimento | - canali di colata troppo lontani dalla zona | - tipicamente la pressofusione elimina questo tipo di problema  - aumentare la temperatura di colata per aumentare la fluidità  - aumentare la pressione |
| - ripresa di fusione | - arresto temporaneo del riempimento  - incontro di flussi provenienti da zone diverse | - aumentare le vie di riempimento  - aumentare la temperatura di colata |
| - incrinature (tensioni a trazione) | - tensioni che si formano durante il ritiro  - ispezione visiva | - materiali idonei della conchiglia  - riparazione del pezzo mediante saldatura |
| - soffiature e porosità | - gas disciolti od intrappolati  - reazioni metallo fuso/conchiglia  - dissoluzione del metallo liquido  - esame radiografico | - tipicamente la pressofusione elimina questo tipo di problema  - riduzione della velocità di colata  - limitare la temperatura di surriscaldamento ed il tempo di permanenza allo stato fuso  - non utilizzare materiali inquinanti ‘oli o altro’  - scelta del materiale per le anime |
| - inclusioni non metalliche | - reazione dei gas  - azione erosiva | - riduzione della velocità di colata  - aumento della temperatura di colata |
| - difetti superficiali | - porosità  - escrescenze  - ossidazioni | - minore temperatura di colata  - scelta del materiale per le anime |
| - variazioni di spessore | - spostamento delle anime | - ridurre le pressioni  - riduzione della velocità di colata  - aumentare la temperatura di colata |

La classificazione delle problematiche che si possono presentare durante la solidificazione è di gran lunga più complessa di quanto descritta. Risulta doveroso farne un breve accenno per poter comprendere le difficili valutazioni che vanno fatte in fase progettuale. Una simulazione completa è in grado di ridurre se non eliminare gran parte di queste problematiche. I software di simulazione, come si vedrà, sono in grado di ottimizzare il processo segnalando la possibilità dell’insorgere di questi difetti per poterli correggere prima di procedere con il reale processo di colata in conchiglia a bassa pressione.

Spesso nella pratica è possibile dotare la conchiglia di un sistema di raffreddamento controllato per poter migliorare il processo di pressofusione eliminando anche alcuni difetti come le porosità. Esse per esempio possono essere ridotte per mezzo di sorgenti ‘fredde’ (dita fredde) che aumentano la velocità di raffreddamento in alcune zone critiche riducendo la porosità.

Per evitare formazione di bolle ed altri difetti, il flusso all’interno della conchiglia dovrebbe rimanere laminare, cioè senza turbolenze. La tendenza a formare turbolenze è data dal numero di Reynolds: Re = / ; con D = diametro del canale, η = viscosità del fluido. Re < 2000 flusso laminare. Nei sistemi di accesso del flusso si lavora tra 2000 e 20000 Re, a tali valori si ha un misto di flusso laminare e turbolento. Per minimizzare le turbolenze bisogna evitare il più possibile curve ed ostacoli, nonché scorie del flusso.

Importante posizione copre dunque la fluidità del flusso che dipende da:

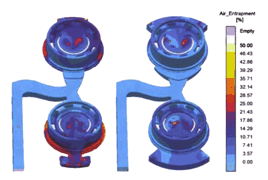
* viscosità (diminuisce con la temperatura);
* tensione superficiale (alta tensione superficiale riduce la fluidità);
* inclusioni non fuse;
* caratteristiche di solidificazione (ampio range di solidificazione implica minore fluidità);
* velocità di immissione del fluido (bassa velocità significa bassa fluidità);
* grado di surriscaldamento sopra la temperatura di fusione
* materiale dello stampo (conduttività termica) e rugosità dello stampo, influenzano sia il flusso del calore che lo scorrimento del fluido.

**6.3.2. Minimizzazione della porosità da gas**

Durante tutto il processo di riempimento dello stampo, la lega colata dovrebbe riempire completamente i rami e gli attacchi di colata evitando che l'aria rimanga intrappolata nel getto. Le bolle d’aria intrappolate nella lega, infatti, dovrebbero uscire più velocemente possibile attraverso dei pozzetti. Evitare la porosità da gas è uno dei compiti primari della buona progettazione in pressocolata perché spesso problemi di bolle d'aria si riscontrano in zone critiche. È innegabile che la progettazione della geometria degli attacchi di colata e dei pozzetti, ha un impatto enorme sulla quantità e sul percorso dell'aria che rimane intrappolata nel getto. L'obiettivo dell'ottimizzazione automatica è quello di eliminare il rischio delle porosità da gas. A tale scopo si ottimizzano le geometrie degli attacchi di colata e dei pozzetti. Approfittando della simmetria che caratterizza la maggior parte delle colate di pressofusione, vengono mantenuti fissi la geometria del getto e del ramo principale di colata, mentre vengono modellati in modo parametrico gli attacchi di colata ed i pozzetti (Figura 6.9). Per ogni versione, la simulazione mostra la distribuzione dell'aria nella cavità alla fine del riempimento (Figura 6.10). Lo scopo dell'ottimizzazione è quello di mantenere l'aria intrappolata nell'area critica dell'anello al livello minimo possibile. Per fare ciò vengono simulate anche centinaia di versioni ottenendo ogni volta un miglioramento graduale della situazione. Con l'ottimizzazione automatica è possibile mantenere le zone più critiche esenti da bolle d’aria, assicurando un'elevata qualità del getto.



**Figura 6\_9.** Tre differenti configurazioni della geometria degli attacchi di colata e dei pozzetti.



**Figura 6\_10.** Distribuzione dell'aria intrappolata nel getto dopo il riempimento, prima dell'ottimizzazione (sinistra) e dopo l'ottimizzazione (destra).

**6.3.3. Minimizzazione dalla formazione di ossidi**

La formazione di ossidi è dovuta al contatto del metallo fuso con l’aria all’interno della conchiglia. L’ossigeno contenuto nell’aria reagisce con la colata provocando formazioni di materiali duri all’interno del getto e disturbando l’uniformità strutturale finale del prodotto della colata. La praticità della simulazione è data dalla possibilità di prevedere la formazioni di queste reazioni evitandone la formazione. Come risultato del riempimento dello stampo simulato, si ricava l'intensità con cui la lega colata viene a contatto con l'aria contenuta nello stampo, questa fase può essere analizzata in termini di distribuzione locale, cioè in ogni punto della cavità della stampo riempita. Su tale base la riduzione della formazione degli ossidi calcolata nelle impronte viene definita come obiettivo dell'ottimizzazione.

**6.3.4. Eliminazione delle porosità da ritiro**

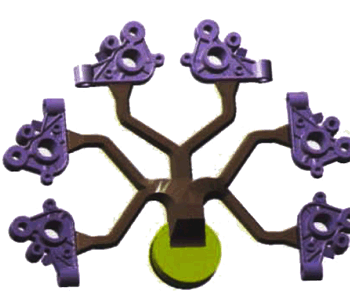
Le porosità da ritiro spesso si formano nelle zone massive del getto e ciò genera problemi sia in relazione al carico in esercizio sostenibile dal getto, sia perché queste zone devono essere lavorate meccanicamente e pertanto richiedono i migliori requisiti in termini di densità. Le zone massive, inoltre, nella maggior parte dei casi, hanno ragioni funzionali, nell’utilizzo finale del componente il che rende importante la loro eliminazione. Essa è difficoltosa attraverso la sola modifica del disegno del getto, di conseguenza, risulta fondamentale fornire un’alimentazione appropriata nelle zone dell'intero getto. Le caratteristiche principali che vengono prese in considerazione durante la progettazione, per evitare questo tipo di problemi, sono la disposizione degli attacchi di colata attraverso i quali il getto può essere alimentato a fine riempimento, ed il controllo locale della temperatura dello stampo. La soluzione per l’ottimizzazione durante la progettazione è dunque di considerare e realizzare oltre al ramo di colata, alcuni circuiti di termoregolazione. Questi due elementi dovranno convivere e trovare spazio nel medesimo stampo, che dovrà essere concepito con la geometria dell'attacco che può essere variata per facilitare la compattazione della lega, ed i circuiti di termoregolazione che possono essere utilizzati con fluidi a temperature diverse ed attivati in momenti diversi. La struttura dei sistemi di raffreddamento controllato e dell’attacco del canale di colata al pezzo è di seguito illustrata (Figure 6.11 e 6.12). La riduzione della porosità da ritiro è un obiettivo del ciclo di ottimizzazione per questo ne vengono simulate anche centinaia diverse conformazioni ottenendo un miglioramento vitale della solidificazione. L'impostazione dello stampo descritta sopra non può, tuttavia, evitare completamente le cavità da ritiro, ma possono essere ridotte ad un livello tale da consentire al getto di essere lavorato senza problemi (Figure 6\_13 e 6\_14). Va inoltre ricordato che la razionalizzazione dei circuiti di termoregolazione ha conseguenze importanti sui costi di attrezzatura e di produzione.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 6.11.** Componente con circuiti di termoregolazione. | **Figura 6.12.** Componente con attacco di colata. |

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 6.13.** Miglioramento delle porosità da ritiro in solidificazione ottenuto con l'ottimizzazione nelle zone del pezzo che subiranno lavorazioni meccaniche a sinistra. | **Figura 6.14**. Porosità da ritiro prima dell’ottimizzazione a destra. |

**6.4. Ottimizzazione del riempimento di uno stampo a più impronte**

La maggior parte dei piccoli getti viene prodotta in stampi a cavità multiple. Per produrre parti di qualità uniforme e per permettere un riempimento omogeneo dello stampo, le cavità dovrebbero essere riempite tutte allo stesso tempo, evitando picchi locali nel flusso. In questo esempio, sei getti vengono colati simultaneamente.Di solito, l'andamento delle sezioni trasversali dei canali di colata è stabilito dal progettista sulla base dell'esperienza e di "tabelle" ricavate da vari manuali. Nel caso della simulazione per mezzo di software di simulazione, ciò è fornito dal modulo specifico di ottimizzazione del riempimento. Il modello parametrico della geometria viene disegnato con un modellatore tridimensionale e poi inserito direttamente nel programma di simulazione (Figura 6\_15).



**Figura 6\_15.** Modello tridimensionale parametrico di stampo a cavità multiple.

Le eventuali simmetrie presenti permettono il calcolo soltanto su una metà della matrice dello stampo, il che è sufficiente per la simulazione e consente risparmi di tempo nel calcolo. La simulazione fornirà il tempo di riempimento per ogni cavità, esso è calcolato da quando il pistone comincia a muoversi fino al completo riempimento della cavità stessa. L’obiettivo di ottimizzazione di questa specifica simulazione è quella di rendere le deviazioni tra i tempi di riempimento di ciascuna impronta, più piccole possibili, agendo su determinate sezioni trasversali dei canali di colata e simulandone anche centinaia, sino ad arrivare ad un processo di riempimento omogeneo di tutte le cavità. Viene rappresentato il riempimento della cavità dello stampo per il sistema di colata prescelto, in due differenti momenti (Figure 6.17 e 6.18). Quando le cavità sono riempite simultaneamente, si può considerare il riempimento come ideale.

|  |  |
| --- | --- |
| **Figura 6.17**. Andamento della lega nello stampo a 970 millisecondi dopo l'inizio del movimento del pistone.. | **Figura 6.18**. Andamento della lega nello stampo a 986 millisecondi dopo l'inizio del movimento del pistone. |

Nel ciclo di ottimizzazione la curva di iniezione è stata aggiunta alla geometria delle sezioni trasversali del canale di colata come variabile di progetto. L'ottimizzazione della curva di iniezione può apparire secondaria, ma i risultati possono evidenziare il grande impatto che la curva di iniezione ha sulla qualità del getto e quindi anche la necessita per l'esperto di fonderia di prestare attenzione alla regolazione di una curva di iniezione ottimizzata e riproducibile.

**6.5. Durata delle attrezzature per una produzione di pressocolata**

La vita degli stampi, come quella delle anime, è determinata dalle spinte idrauliche e dal carico ciclico termico alle quali sono soggette. Per quanto riguarda il carico ciclico termico, esso è causa della propagazione delle cricche superficiali che si determinano in funzione delle oscillazioni da uno stato di compressione ad uno stato di contrazione. I software di simulazione, parallelamente allo studio della dinamica di riempimento e solidificazione del particolare, al fine di ottenere la miglior qualità possibile dello stesso, ha in dotazione una serie di strumenti che permettono al progettista di valutare le condizioni di massima durata delle attrezzature. Questi moduli aggiunti ai programmi di simulazione, sono in grado di indicare in particolare le zone critiche delle attrezzature più soggette e sensibili ai cicli termici in una colata in pressofusione. Si mostra di seguito come il software evidenzia, dopo la simulazioni di numerosi cicli, le aree maggiormente soggette (Figura 6.19).



**Figura 6.19**. Aree critiche dello stampo, maggiormente soggette al carico ciclico termico.

**6.6. Sistema di provini per lo studio della microstruttura e del comportamento meccanico delle leghe pressocolate**

Un’evoluzione di particolare utilità sullo studio della pressofusione a bassa pressione per analizzare proprietà e caratteristiche dei materiali prodotti con tale tecnica, e con lo scopo aggiunto di capire il perché del possibile sviluppo di difetti ed arrivare alla loro riduzione, è la realizzazione di un sistema di provini prodotto proprio mediante questa tecnica. Esso sarà quindi in grado di fornire informazioni sia dal punto di vista della microstruttura che delle proprietà meccaniche. L’idea si basa sulla progettazione e la realizzazione di uno stampo per la produzione del getto che include tutte le possibili tipologie di provini per i test di laboratorio: prove di fluidità, resistenza a trazione, resistenza a tensocorrosione, comportamento a fatica, resilienza, ecc. Un esempio della colata del set di provini viene illustrato di seguito (Figura da 6.20).



**Figura 6.20.** Simulazione del riempimento di un set di provini per successive prove meccaniche e fisiche della colata.

**6.7. Simulazione del processo per la riduzione delle tensioni**

Il processo di pressofusione a bassa pressione è caratterizzato come già detto da alcune fasi principali due delle quali sono (riempimento e solidificazione). Le tensioni indotte nel pezzo dal processo di produzione, oltre che da eventuali trattamenti termici, sono operazioni che in qualche modo si possono assomigliare, e spesso non sono considerate o lo sono solo parzialmente. Esse, caratterizzano le proprietà che rimangono invariate su tutta la struttura del getto. Gli stress residui sono un pre-carico che necessita di essere integrato nel calcolo a fatica e possono essere dannosi o utili. L’integrazione delle informazioni ricavate dalle simulazioni di processo consentono di ottimizzare la progettazione (migliorare le performance) proponendo molti vantaggi. Il legame tra lo studio della performance del componente finito e la simulazione di processo della colata tramite il quale viene prodotto, permette di considerare le caratteristiche presenti nel materiale fin dalle prime fasi dello studio. La progettazione non sarà quindi più limitata dal riferimento a grandezze standard ma considererà direttamente le reali proprietà fisiche e meccaniche presenti nel getto, questo può offrire la possibilità di calcolare le sollecitazioni sui getti in funzione della reale situazione fisico-meccanica a fine processo.

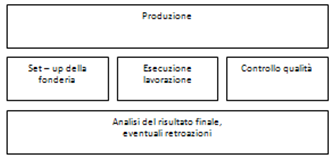
**6.8. Sviluppo ottimizzato del componente attraverso la simulazione del processo**

I software di simulazione di colata in conchiglia per pressofusione hanno svariati pacchetti aggiuntivi di simulazione che consentono l’analisi di tutti quelli che sono i maggiori elementi che contraddistinguono il processo. Oltre le più importanti e critiche fasi delle operazioni presso di pressofusione però, per migliorare il risultato nel suo complesso, è utile anche analizzare quella che si può definire integrazione processo-prodotto. Le simulazioni di questo tipo si possono considerare complete in quanto consentono di ottimizzare nell’insieme tutti i fattori e le fasi che interessano il sistema per arrivare al componente finale. Riassumendo, le simulazioni complete, portano a vantaggi globali che risultano nel concreto essere:

* riduzione dei tempi e dei costi di sviluppo migliorando la progettazione del componente virtuale. In modo particolare forniscono maggiore affidabilità nella valutazione della vita a fatica anche considerando localmente il componente del materiale e permettono lo sfruttamento ottimale dell’intero potenziale del materiale;
* riduzione degli scarti dei prodotti di fonderia attraverso un’integrazione anticipata della simulazione di processo ed una pre-identificazione dei potenziali problemi;
* miglioramento della qualità e dell’affidabilità.

Una simulazione completa comprende un’analisi della catena di produzione nella sua interezza attraverso l’uso di programmi diversi. Di seguito viene fatta una schematizzazione per comprendere la suddivisione dell’analisi di ottimizzazione di integrazione processo -prodotto (Figura 6.24).





**Figura 6.24.** Schema di tutte le fasi di una catena di produzione da simulare. Sono comprese: progettazione Cad, analisi FEM, preparazione e simulazione di processo, esecuzione e controllo finale.

**7. ANALISI DELLA SIMULAZIONE**

Il lavoro della simulazione viene effettuato per migliorare il processo di produzione oltre che aiutare ed impostare studi futuri. Una modellazione non corretta, come un’incompleta simulazione, è conseguenza di errati risultati. Trascurare in una simulazione il canale di colata, per esempio, provoca errate temperature nelle leghe colate in ingresso alla conchiglia, un altro esempio può essere la simulazione di solidificazione senza quella precedente di riempimento. Tutte queste mancanze portano ad un incoerente risultato finale che non rispecchia la realtà. Le temperature quindi andrebbero rilevate tramite una verifica diretta attraverso l’applicazione di un’appropriata attrezzatura sperimentale effettuata durante la produzione o, quando possibile, durante le sperimentazioni pratiche. Con l’utilizzo di sistemi di accesso dotati di strumentazione atte a rilevare temperature anche in questa zona, è possibile evidenziare che le temperature viste nelle simulazioni corrette trovano un riscontro pressoché in linea ai valori realmente misurati. Ritornando all’esempio fatto in precedenza infatti, si ha che con l’aggiunta del canale di accesso nelle simulazioni, si aumenta la precisione di qualche livello. Va considerato per contro che aumenta il numero di cellule o maglie della mesh con le quali si simula e di conseguenza anche il tempo delle simulazioni.

I dati dei materiali utilizzati immessi nel software, possono essere verificati e migliorati in ogni misura necessaria per realizzare ed ottenere valori attraverso modelli teorici. Mentre le misurazioni sul campo forniscono solitamente risultati su materiali di uso comune, la difficoltà di alcune delle stesse misurazioni su materiali sperimentali può portare all’uso di modelli teorici invece che reali. Le misurazioni riguardano i materiali allo stato fuso, ciò pone rilevanti problemi, per esempio viscosità e tensione superficiale del fuso sono difficili da misurare in funzione della temperatura. Un altro determinante dato che può essere migliorato e studiato in quanto porterebbe migliorie essenziali è il coefficiente di scambio termico. In una simulazione i valori del coefficiente di scambio termico possono essere calcolati attraverso metodi di simulazione matematica i quali fanno affidamento a modelli teorici. L’altro metodo per determinare tali valori è per mezzo dei sempre più completi software di simulazione e la comparazione ai loro risultati con le curve tempo-temperatura trovate con le misurazioni delle simulazioni pratiche. Attraverso prove ed errori, i corretti valori dei coefficienti di scambio termico possono essere trovati con un sufficiente numero di iterazioni. A seconda della strumentazione e dei dati termici rilevati, alcuni diversi valori dei coefficienti possono essere determinati durante la simulazione o la prova di colata in conchiglia. I software danno anche la possibilità di determinare e visualizzare le interfacce anche attraverso il lancio di diverse simulazioni sequenziali regolando i valori tra ogni ciclo di iterazione. I dati della simulazione possono essere poi verificati direttamente attraverso misurazioni pratiche dei differenti parametri di processo come curve della pressione di riempimento e la sincronizzazione delle differenti fasi del ciclo. Nel corso di un buono e scrupoloso lavoro, molti dati sui materiali e sui parametri del processo possono essere aggiornati per la simulazione e dalla simulazione. Il miglioramento di precisione e di immissione dei parametri di processo, migliorerà nel corso degli studi i risultati simulati significativamente.

**7.1. Miglioramento dei parametri di processo**

Nel corso di un buono e scrupoloso lavoro, molti dati sui materiali e sui parametri del processo possono venire aggiornati per la simulazione e dalla simulazione. Eseguire un lavoro di simulazione come quello descritto consente di implementare notevolmente la conoscenza sui materiali aggiungendo dati nel software e nella comune conoscenza degli addetti. Nuovi materiali analizzati attraverso le modellazioni forniscono risultati alle simulazioni in tutte le nuove vie in cui si può sviluppare la ricerca. È possibile immaginare che dopo le simulazioni anche le proprietà simulate e l’analisi termica di alcuni materiali, porta ad enormi differenze nei modelli dei materiali da utilizzare, in particolare a quelli originariamente pensati per l’utilizzo pratico degli esperimenti del caso. Molto interessante sarebbe la simulazione delle proprietà e dell’analisi termica delle leghe a basso contenuto di piombo in quanto fornirebbe nuove comprensioni su molti problemi che esistono soltanto in questa lega. È uso comune credere che tutte le leghe utilizzate abbiano comportamenti simili come anche proprietà simili. E’ stato invece provato che la lega a basso contenuto di piombo ha temperature di fusione maggiori se comparata ai normali contenuti di piombo presenti negli ottoni gialli.

Lo studio del coefficiente di scambio termico è attività di ricerca frequente in quanto influenza molto i risultati della simulazione della pressofusione a bassa pressione. Questi valori possono essere migliorati attraverso il lancio di simulazioni con differenti profili di coefficiente di scambio termico e dal miglioramento della precisione su più iterazioni degli stessi coefficienti. Questa fase del progetto richiede elevata potenza dei calcolatori, i quali sono oggi giorno fornite o consigliate già dagli sviluppatori dei software. I coefficienti di scambio termico utilizzati per le simulazioni spesso non sono corretti e provocano scostamenti alla simulazione dal caso reale. Proprio con la simulazione si possono correggere i coefficienti stimati ed attraverso nuovi lanci si arriva alla coincidenza dei risultati. Molti aspetti diversi vengono ripensati durante i processi per garantire la consistenza e la precisione della simulazione. Il rischio che porta il non aggiornamento dei valori è ottenere una differenza nella distribuzione delle temperature di fusione durante le simulazioni di riempimento dei getti. Con l’aggiornamento del valore di coefficiente di scambio termico, i risultati simulati risulteranno completamente differenti se paragonati a quelli delle prime simulazioni. Talvolta la dimensione di errore è tale che con i valori iniziali la simulazione rappresenti la colata ancora liquida quando la solidificazione è già avviata o ad uno stato avanzato. Gli errori portano anche ad errori inversi rispetto a quello nominato.

**7.2. I materiali delle attrezzature**

Le simulazioni spesso sono lanciate con informazioni sui materiali per conchiglie approssimati, questo è doveroso non avendo a disposizioni informazioni sufficienti. Il lavoro seguente di simulazione e di prove sul campo, consente di aggiornare la conoscenza ed inserire nuove descrizioni per alcuni materiali da conchiglia nel database dei software per modellazioni future. La ragione del descrivere le caratteristiche dei materiali nel database del software è rivelare se il materiale da conchiglia utilizzato negli usi comuni è il contributo di qualche fallimento o dei problemi di colata. Spesso proprio perché poco conosciuti si decide che descrivere i materiali per le anime non è importante quanto la descrizione degli altri materiali del sistema, tuttavia negli ultimi tempi questa tendenza va cambiando. La ragione principale di questo è l’aggiunta di grandi quantità di nuove informazioni, ricercate e verificate sui differenti materiali per anime e per conchiglie nelle nuove versioni dei software che verranno. Pertanto sui materiali per anime si effettuano solo semplici test di comparazione tra i diversi tipi. Se fossero evidenti significative differenze rispetto ai dati a disposizione, va rivalutata l’importanza della modellazione di materiali per anime all’interno del database del software. Con le nuove versioni dei programmi è doveroso riconsiderare la necessità di migliorare anche le informazioni su questi materiali per anime aggiornandole non appena è possibile avere dati a disposizione.

**7.3. Confronto tra porosità misurata e simulata**

Negli ultimi tempi le aziende e gli studi che si rivolgono a software di simulazione sono in costante aumento e le ragioni sono innumerevoli. Oltre alla riduzione di costi e tempi i programmi di simulazione e modellazione dinamiche sono molto pratici, semplici da utilizzare e costantemente sempre più precisi. Per questi motivi si stanno studiando e sviluppando diversi metodi per poter migliorare la simulazione sotto ogni punto di vista. Le analisi non avvengono soltanto mediante l’utilizzo dei numerosi software a disposizione ma sono spesso integrate con altre soluzioni. Una delle ultime tecniche di analisi che supporta le fasi di studio delle difettologie del processo di pressofusione è la tomografia computerizzata. La tomografia computerizzata è un metodo non distruttivo per l’analisi dei difetti, i quali, dopo essere adeguatamente filtrati con programmi di elaborazione di immagini, sono in grado di utilizzarli per creare ed elaborare delle conclusioni capaci di indicare la probabilità di avere difetti in ogni determinata zona del getto. Tale tipologia di risultato può in seguito essere utilizzata in simulazioni con tecniche FEM che sfruttando i moduli appositi dei software, rendono possibile la determinazione locale delle proprietà meccaniche in corrispondenza di difettologie da riempimento o solidificazione. Il sistema di funzionamento della tomografia computerizzata è quello di immagazzinare i risultati in una bitmap tridimensionale dalla quale si è in grado di riconoscere i possibili difetti evidenziando con colorazione differente le sezioni interessate, per esempio le aree sane più luminose e quelle con porosità più scure. Con queste tecniche ed in base alla risoluzione adottata possono essere individuati difetti inferiori ai 0,5 mm. Occorre però utilizzare dei filtri appositi per i dati perchè non tutte le sezioni scure possono essere provocate da una porosità reale. Alcune di esse infatti possono essere causate da artifici ottici specialmente nelle piccole nervature o in prossimità della superficie esterna. Usando uno speciale programma di filtro, è possibile selezionare solo quelle sezioni più scure individuate dalla scannerizzazione della tomografia computerizzata che rappresentano un difetto reale. Una volta che i dati sono stati filtrati possono essere utilizzati per individuare la variazione stocastica in produzione. Effettuando la tomografia computerizzata su più pezzi uguali è possibile creare una sorta di casistica o media dei difetti, infatti quei difetti che appaiono in tutte le scannerizzazioni nella stessa posizione sono i più critici. In seguito si riporta una schematizzazione del confronto tra difetti individuati da tomografia computerizzata e dal software di simulazione. Di seguito è riportato un esempio dei due tipi di misurazioni delle analisi (Figure 7.1 e 7.2) ed un confronto tra le due (Figura 7.3).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Figura 7\_1**. Probabilità di porosità individuata dall’unione di tre differenti tomografie computerizzate del prototipo scatola cambio. | **Figura 7\_2.** Porosità simulata direttamente da programma si simulazione | **Figura 7\_3**. Confronto di porosità simulata e porosità della tomografia computerizzata mostrate assieme, colori sono cambiati a causa dell’interpolazione |

**7.4 Considerazioni sulle tensioni residue**

Gli stress residui sono un precarico che necessita di essere integrato nel calcolo a fatica e possono essere dannosi o utili. L’integrazione delle informazioni ricavate dalle simulazioni di processo consentono di ottimizzare la progettazione proponendo molti vantaggi tra i quali:

* sostituzione delle verifiche fisiche con quelle virtuali;
* inferiori costi di progettazione e pianificazione;
* inferiori tempi di sviluppo;
* ottimizzazione dei parametri di lavorazione;
* miglioramento della stabilità di processo;
* capacità di produzione più elevata.

**7.5 Verifiche dei risultati simulati**

In definitiva i risultati simulati vanno verificati confrontandoli con i risultati dei profili di tempo e temperatura forniti da misure su conchiglie dotate di strumentazione studiata appositamente. I risultati individuate possono essere verificati anche simulando altre fusioni prodotte comparando quei risultati simulati alle colate di una produzione. Un paio di fasi di produzione e di colata è consigliabile analizzarle innanzitutto per verificare la bontà dei risultati simulati. Con dati non aggiornati, cioè con quelli base forniti dal software, i risultati finali rappresentano scarsamente la realtà. Le modellazioni con il set di dati originali rischiano di fallire precocemente oltre che avere scarsa attendibilità senza rivelare i problemi reali relativi a queste colate. La maggior parte degli scostamenti ed errori è dovuto a non corretti valori dei coefficienti di scambio termico. Nell’uso del software di simulazione il set di dati aggiornati e forniti dall’analisi di casi reali, consentono una rappresentazione della realtà verosimile. Correntemente pare che molti dei problemi prima inspiegabili relativi alla metodologia di colata in conchiglia per pressofusione a bassa pressione sono stati risolti attraverso l'utilizzo diretto dei risultati delle simulazioni ottenuti con nuovi metodi e dati reali.

**8. CONCLUSIONI**

Il presente progetto ha verificato la bontà di alcuni risultati a disposizione per le simulazioni del processo di pressofusione a bassa pressione oltre che proposto linee guida per possibili sviluppi futuri.

Le simulazioni di colata a bassa pressione possono essere utilizzate come strumento per valutare i processi produttivi di colata, considerando materiali e metodi di attrezzamento, prima del progetto e soprattutto dell’esecuzione. Attraverso tali modellazioni, oltre che conferme di alcuni parametri, sono emersi nuovi dati utili all’individuazione del comportamento di riempimento e solidificazione della colata a bassa pressione in conchiglia per alcune leghe di rame.

L’uso della simulazione e del corretto sviluppo dei parametri dei materiali utilizzati, porta ad una conoscenza di livello elevato per andare ad ottimizzare al meglio la colata finale. Questo è possibile grazie all’aggiunta di conoscenza dei processi di colata, dei parametri fisici dei materiali utilizzati e con uno strumento che può essere utilizzato per facilitare i cambiamenti diretti in tutte la fasi di progetto ed esecuzione.

Molte informazioni acquisite durante questo lavoro, sono universali ed utilizzabili per tutte le fusioni, tuttavia alcuni dei parametri di processo, come il coefficiente si scambio termico, non sono gli stessi per tutte le colate. La precisione delle simulazioni di colata può essere migliorata attraverso una curata messa a punto dei parametri di processo comparando i risultati ottenuti con i risultati rilevati dalle colate reali. Il suggerimento vuole essere quello di iniziare, utilizzando soltanto poche semplici geometrie realizzabili facilmante nella pratica. I risultati Alphaintrodotti con questi processi sperimentali riguardanti materiali nuovi, vengono poi inseriti nei software. Nel futuro sarà probabilmente anche possibile utilizzare le informazioni termiche misurate direttamente dalle conchiglie e poter mettere a punto modelli sperimentali in grado di ricavare parametri fisici reali oltre che curve di pressioni di riempimento precise esercitate dalle macchine durante il processo.

Eseguire un lavoro di simulazione come quello descritto consente di implementare notevolmente la conoscenza sui materiali aggiungendo dati ai software e nella comune conoscenza. Nuovi materiali analizzati, attraverso le modellazioni, forniscono risultati utili in tutte le nuove vie in cui si può sviluppare la ricerca. È possibile immaginare che la simulazione delle proprietà e dell’analisi termica di alcuni materiali, porti a differenze visibili nei modelli rispetto a quelli sperimentali. Molto interessante sarebbe la simulazione delle proprietà e dell’analisi termica delle leghe a basso contenuto di piombo in quanto fornirebbe nuove comprensioni su molti problemi che esistono soltanto in questa lega. È uso comune credere che tutte le leghe utilizzate abbiano comportamenti simili, come anche proprietà simili, tuttavia l’errore di pensiero è rilevante. In particolare, lo studio del coefficiente di scambio termico è attività di ricerca frequente, in quanto influenza molto i risultati della simulazione della pressofusione a bassa pressione. Questi valori possono essere migliorati attraverso il lancio di simulazioni con differenti profili di coefficiente di scambio termico e dal miglioramento della precisione concessa da più iterazioni degli stessi coefficienti. Proprio con la simulazione si possono effettuare correzioni dei dati stimati ed attraverso nuovi lanci si arriva alla coincidenza dei risultati. Il rischio che porta il non aggiornamento dei valori è ottenere differenze nella distribuzione delle temperature di fusione durante le simulazioni di riempimento dei getti.

In buona sostanza si può affermare l’utilità pratica di questo tipo di simulazione che porterà sicuramente a futuri migliori sviluppi di tutte le fasi del processo, senza trascurare la possibilità di ottenere database completi in grado di simulare la realtà in maniera dettagliata e precisa con relativa importante riduzione di tempi e costi.

**BIBLIOGRAFIA**

**Testi e pubblicazioni consultati:**

* [1] S. Di Rosa, D. Trabucco, P. Parona, Flussi di ottimizzazione di processo, " Fonderia Pressofusione", giugno 2008.
* [2] American Society for Metals (ASM), *Source book on copper and copper alloys*, ASM Engineering Bookshelf, 1979.
* [3] Harkness, J. C., W. D. Spiegelberg, and W.R. Cribb. “beryllium-Copper and Other Beryllium Containing Alloys.” In Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM handbook, AMS international, 1990.
* [4] Sadayappan K., M. Sahoo, and H.T. Michels “copper and copper alloy Casting” ASM International, 2008.
* [5] Woycik Gregory G, and Gordon Peters. “Low Pressure Metal casting” ASM handbook, AMS International 2008.
* [6] McGraw-Hill, AIMAT, *Manuale dei materiali per l’ingegneria*.
* [7] Campbell John “Casting” (Second edition). Oxford: Butterworth-Heinemann, 2003.
* [8] G. Hartmann, P. Parona, U. Weiss, Come ottenere getti con prestazioni migliori, "Fonderia Pressofusione", ottobre 2007.
* [9] S.-L. Chen, S. Daniel, F. Zhang, Y. A. Chang, X.-Y. Yan, F.-Y. Xie, R. Schmid-Fetzer and W. A. Oates, “The PANDAT - A Software Package and Its Applications,” CALPHAD, 2002.
* Baber Michael “Die Design” Document. KWC Engineering. Unterkulm. 2002.
* [10] S.-L. Chen, F. Zhang, S. Daniel, F.-Y. Xie, X.-Y. Yan, Y. A. Chang, R. Schmid-Fetzer and W. A. Oates, “Calculating phase diagrams using Pandat and PanEngine,” JOM, 2003.
* [11] H. Kuroki, H. Kawaray “Oxidizing mechanism of beryllium-copper in alkaline solution”.
* [12] Mampaey F. “practical Examples Using the Finit Volume Method for simulating the Casting Process. (American Foundry Society)” 2001.
* [13] Liu Yuan ‘’Equivalent heat transfer coefficient at casting/Cu mould interface and temperature field simulation’’ 2003
* M.A. Maratorano, J.D.T. Capocchi ‘’Heat transfer coefficient at the metal mould interface in the unidirectional solifdification of Cu-8%Sn alloys’’ 1999.
* [15] Politeknisk Forlag. “Fundamental of Numerical Modelling of Casting Processes”. Edited 1st by Jesper Hattel 2005.
* [16] J. Miettinen ‘’Thermodynamic-kinetic model for the simulation of solidification in binary copper alloys and calculation of thermophysical properties’’ 2005.
* G. Siwiec, J. Labaj. ‘’Viscosity of Cu-Zn Alloys’’ 2010.

**Indirizzi internet:**

* [1] Istituto Italiano del Rame <http://www.iir.it/rame/leghe.asp> http://[www.copper.org](http://www.copper.org)
* [2] Friul Centrifuga srl <http://friulcentrifuga.it>
* [3] Fonderia metal leghe srl <http://www.fonderiametalleghe.it>
* [4] Foseco <http://www.foseco.it>
* [5] IMR spa [http://www.imr.it/products/foundry](http://www.imr.it/products/foundry/bpc155h-low-pressure-compact-machine/)
* [6] Enginsoft <http://www.enginsoft.it>
* [7] Magmasoft <http://www.magmasoft.com/en/>
* [8] Computerm, Pandatsoftware <http://www.computherm.com/downloads.html>
* [9] Flow3d Cast <http://www.flow3d.com/>
* [10] Procast <http://www.esi-group.com/products/casting/casting-simulation-suite>
* [11] Università di Roma La Sapienza <http://www.uniroma1.it>
* [12] [Univ](file:///C:\Users\FM%20nuovo\Downloads\Univ)ersità di Trento <http://www.unitn.it>
* [13] Università Carlo Cattaneo <http://my.liuc.it>
* [14] Università di Catania <http://www.dmfci.unict.it>
* [15] Università di Bergamo <http://www.unibg.it>
* [16] University of Michigan, Missisippi State University
* [17] Open Source of'Imperial College [http://www3.imperial.ac.uk](http://www3.imperial.ac.uk/advancedalloys/software)
* [18] h[ttp://www.gotrawama.eu/FONDERIA/](http://www.gotrawama.eu/FONDERIA/FilmatoMozzi.wmv)