



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Sede Amministrativa: Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA INDUSTRIALE
INDIRIZZO DI INGEGNERIA METALLURGICA
CICLO XXII

APPLICAZIONE DEL TOTAL QUALITY MANAGEMENT NELLA FONDERIA DI ALLUMINIO

Direttore della Scuola: Ch.mo Prof. Paolo Bariani

Coordinatore d'indirizzo: Ch.mo Prof. Emilio Ramous

Supervisore: Ch.mo Prof. Franco Bonollo

Dottorando: Mario Delli Zotti

Sommario

Il presente lavoro ha lo scopo di individuare e suggerire una serie di metodi per innalzare la qualità del getto in alluminio prodotto in fonderia con formatura manuale in sabbia. Tali metodi appartengono sia all'ambito organizzativo che all'ambito tecnico, seguendo la logica dell'approccio della "qualità totale" che suggerisce l'azione almeno su tutti i processi che sono coinvolti nella realizzazione diretta della qualità nel prodotto. Il lavoro è stato svolto in collaborazione con lo stake holder industriale Castalia, impresa specializzata nella realizzazione di getti di alluminio di grandi dimensioni attraverso la sabbia-resina. Il lavoro si è orientato quindi su due filoni principali: il tema sull'indagine quantitativa di parametri metallurgici per l'ottenimento del prodotto di qualità ed il tema della gestione TQM nella classica accezione dell'approccio alla qualità delle organizzazioni.

La prima parte del lavoro è una panoramica sulle tecniche di produzione per le fonderie a formatura manuale, sul tipo di materiale utilizzato nella produzione con leghe d'alluminio e sui principali difetti che emergono nella produzione di getti.

La seconda parte delinea il tema della gestione della qualità focalizzando l'attenzione su due ambiti principali: l'attenzione sull'approccio per processi e sulle certificazioni di qualità e sull'individuazione della struttura per una base dati per la gestione della produzione. Da un lato si sono specificate le implicazioni organizzative delle procedure e dall'altro sono stati individuati prima di tutto i dati essenziali del sistema produttivo di una fonderia; o meglio dei processi gestiti sia interni che esterni, e del sistema di gestione delle attrezzature.

La terza parte dell'elaborato è costituita dallo studio e modellazione del sistema di colata e dell'ottimizzazione dei sistemi di alimentazione. Lo studio dei sistemi di colata è servito per la progettazione e la verifica delle velocità all'attacco, in modo da poter garantire la condizione di una buona qualità metallurgica. Lo studio dell'alimentazione del getto ha invece portato all'analisi dei classici parametri metallurgici per il posizionamento di materozze e raffreddatori, correlato alla presenza del ritiro, e all'analisi del parametro di Niyama, correlato alla presenza di microritiri del materiale. Per ottenere dati reali sono state eseguite delle prove su getti realizzati con formatura in sabbia-resina. La solidificazione è stata seguita tramite l'acquisizione delle temperature in punti diversi.

Abstract

The present work aims to identify and suggest a number of methods to increase the quality of the cast aluminum product of sand molding foundry. These methods belong to the scope of organization which is the technical realm, following the logic of the “total quality” that suggests the action at least on all the processes that are involved in direct execution of quality in the product. The work was done in collaboration with the stake holder industrial Castalia, which specializes in the production of large aluminum castings through the sand with resin binders. The work was then focused on two main areas: the subject interested party quantitative metallurgical parameters for obtaining quality product and the issue of managing TQM in the classic sense of the approach to quality organizations. The first part of the work is an overview of manufacturing techniques for manual forming in foundry, the type of material used in the production of aluminum alloys and the main defects that arise in the production of castings. The second part outlines the theme of quality management by focusing on two main areas: the focus on the process and quality certifications and identification of the structure for a database for production management. On one hand it specifies the procedures and other organizational implications have been identified above all the basic details of the production system of a foundry, or better managed processes both internal and external, and system management tools. The third part consists of the elaborate study of the system of casting and modeling and optimization of power systems. The study of casting was used for the design and verification of the attack speed, so as to ensure the condition of a good quality metal. The study of feeding techniques in castings has instead led to the analysis of classical metallurgical parameters for the positioning of risers and chills, related to the presence of the withdrawal, and the analysis of the Niyama parameter correlated to the presence of microshrinkage in the material. Real data tests were performed on castings made by sand-molding resin. Solidification was followed by the acquisition of temperatures at different points.

ai miei Genitori

Indice

1	La fonderia di Alluminio	1
1.1	Generalità sul processo di fonderia	1
1.1.1	Tecniche di formatura permanente	1
1.1.2	Tecniche di formatura a perdere con modello permanente	3
1.1.3	Tecniche con forma e modello a perdere	4
1.2	La fonderia in sabbia a formatura manuale	5
1.2.1	Realizzazione del modello	6
1.2.2	Formatura	9
1.2.3	Ramolaggio	12
1.2.4	Pulizia delle forme	13
1.2.5	Creazione di accessori o parti di getto	13
1.2.6	Verniciatura	13
1.2.7	Posizionamento delle anime e chiusura	14
1.2.8	Fusione	14
1.2.9	Sterratura	17
1.2.10	Finitura	17
1.2.11	Lavorazioni successive	18
1.3	Le leghe di alluminio da fonderia	18
1.3.1	Designazioni	18
1.3.2	Le leghe principalmente utilizzate nella fonderia in sabbia	20
1.3.3	Gli effetti degli elementi di lega	21
1.3.4	Meccanismi di rinforzo nelle leghe da fonderia	27
1.3.5	Trattamenti	28
1.4	Difetti	31
1.4.1	Le classificazioni dei difetti	31
1.4.2	Difetti tipici della fonderia in sabbia	33

2	La qualità	43
2.1	Che cos'è la qualità	43
2.1.1	Cenni storici	43
2.1.2	Le norme ISO	44
2.1.3	I sistemi di qualità integrati ed il TQM	46
2.1.4	La strutturazione dei documenti	47
2.1.5	Dal controllo di prodotto al controllo di processo	48
2.2	Gli strumenti di controllo	50
2.2.1	Carte SPC	50
2.3	I processi e la strutturazione delle attività	54
2.3.1	La strutturazione dei processi	54
2.3.2	I diagrammi dei flussi fisici dei processi e le procedure	55
2.3.3	Il miglioramento continuo	59
2.4	L'informatizzazione	62
2.4.1	Le priorità	62
2.4.2	La valutazione del carico di lavoro	62
2.4.3	La scelta degli strumenti	63
2.4.4	Lo sviluppo del flusso informativo e l'implementazione	65
3	Approcci al miglioramento della qualità in fonderia	71
3.1	Casi di studio	71
3.2	Ottimizzazione dei sistemi di colata	72
3.2.1	Elementi del sistema di colata	73
3.2.2	Regole pratiche per il posizionamento degli attacchi nella fonderia in sabbia	75
3.2.3	Rapporto fra le sezioni	76
3.2.4	Filtrazione	77
3.2.5	Parametri	77
3.2.6	La fluidodinamica nel sistema di colata	79
3.2.7	Soluzione numerica	80
3.2.8	Considerazioni conclusive	85
3.3	Riduzione ed ottimizzazione della materozzatura	86
3.3.1	Criteri di progettazione per ottenere l'assenza di ritiro	86
3.3.2	Metodi per la valutazione della porosità da microritiro	89
3.3.3	Criterio di Niyama e la previsione della porosità	90
3.3.4	Considerazioni conclusive	110
	Simboli matematici	113
	Bibliografia	115

La fonderia di Alluminio

1.1 Generalità sul processo di fonderia

La fonderia è un'attività metallurgica che consente di ottenere oggetti metallici tramite la fusione e la solidificazione dei materiali in apposite forme che riproducono in negativo la geometria da ottenere. Le forme sono dei contenitori nelle quali sono presenti le cavità che le leghe liquide riempiranno assumendone la "forma". Si possono ottenere prodotti di forme assai complesse non ottenibili con altre tipologie di semilavorati metallici. Le tecniche di produzione variano molto a seconda del materiale utilizzato, della numerosità della produzione e delle dimensioni degli oggetti realizzati. In fig. 1.1 si trova una rappresentazione delle tecniche di fonderia.

1.1.1 Tecniche di formatura permanente

In genere la colata in forme permanenti è possibile solo con materiali a basso punto di fusione, quali alluminio, zinco, magnesio o rame. Questo poiché la forma è costituita generalmente in acciaio, suddivisa in più parti assemblabili e viene utilizzata per molti cicli di colata. È comunque possibile l'utilizzo di leghe ferrose, ma le complicazioni sono notevoli a causa della alta temperatura di fusione. Normalmente la produzione in forme permanenti prevede una scala produttiva di almeno piccole serie e dimensioni medie, con una automazione della produzione. Inoltre non esiste un modello per la realizzazione della forma, ma viene creata attraverso altri processi, da getti o laminati lavorati successivamente e verniciati con vernici refrattarie.

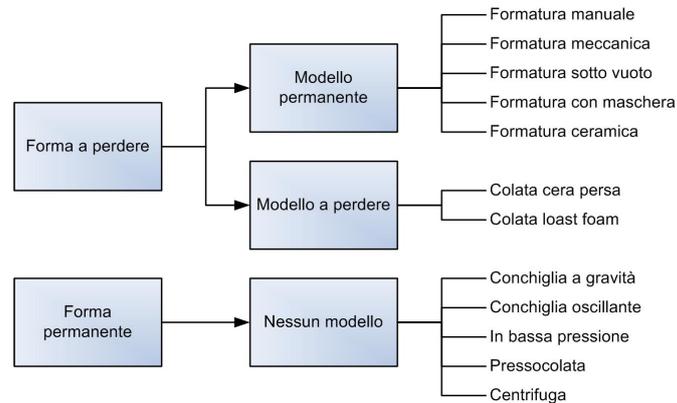


Figura 1.1 – Schema riassuntivo dei processi di fonderia

Colata in conchiglia per gravità

Le conchiglie sono forme metalliche e consentono una produzione molto numerosa di getti in alluminio. Le forme possono essere scomponibili in modo anche complesso, per seguire gli angoli di sforno che possono essere anche molto numerosi e complessi; possono essere inserite anche anime in sabbia. La finitura superficiale è ottima, grazie anche alla applicazione di vernici isolanti che proteggono da un lato la conchiglia e dall'altro ne riducono la rugosità. L'elevata dispersione termica accelera la solidificazione del getto, con un incremento della durezza superficiale, ma diminuisce la permeabilità, che comporta l'aumento della complessità a causa la necessità di prevedere degli sfoghi di aria.

Colata in conchiglia in bassa pressione

Il riempimento della conchiglia metallica, usata da questo sistema di colata, avviene facendo risalire il metallo attraverso un tubo immerso in un bagno di metallo fuso sulla cui superficie viene applicata una leggera pressione. Le caratteristiche del pezzo che può avere pareti anche molto sottili ed alettature, risultano analoghe a quelle dei getti colati in conchiglia a gravità, con il vantaggio di avere un unico alimentatore centrale e l'assenza quasi totale di materozze.

Colata centrifuga

Questo sistema di colata utilizza la forza centrifuga per distribuire uniformemente il metallo liquido sulla superficie interna di una conchiglia rotante. Lo spessore del getto dipende ovviamente dalla quantità di metallo versato. Con questo sistema si possono ottenere anche getti di notevole peso, in funzione dell'attrezzatura disponibile.

Colata in pressione

Il metallo fuso viene spinto velocemente da un pistone nella forma metallica dotata di opportuni canali di sfiato ed estrattori. Il metallo solidifica sotto pressione e da luogo ad un getto di ottimo aspetto, entro limiti di tolleranza assai ristretti (da 0,1 fino a 0,4%). Tali getti, tuttavia, non sono generalmente idonei al trattamento termico, essendo molto spesso affetti da micro porosità gassose. L'eventuale presenza di pellicole di ossido, se non si adottano tecniche di fonderia particolarmente accurate, impedisce una buona ossidazione anodica. Infatti date le elevate velocità di iniezione, si creano turbolenze che inglobano i gas presenti nello stampo. Il sistema di colata a pressione, tuttavia, consente volumi di produzione assai elevati e riduce il costo unitario del getto che risulta quasi finito. Si possono avere impianti a camera fredda o a camera calda, dove in quest'ultimo il sistema di iniezione ed il contenitore del pistone sono immersi nel bagno di fusione e sono parte integrante del forno di attesa. Per migliorare le caratteristiche del getto colato a pressione si utilizzano processi particolari, possono essere adottati accorgimenti vari, come l'estrazione dell'aria dalla forma oppure l'impiego di un pistone doppio (due pistoni concentrici, secondo il procedimento Acurad). Per ridurre la porosità viene anche usato il procedimento PF (pore free) che inietta ossigeno scacciando l'aria dalla forma. L'ossigeno reagisce con il metallo liquido, dando luogo a minutissime particelle di ossido, senza la formazione di pori.

1.1.2 Tecniche di formatura a perdere con modello permanente

Formatura manuale

La formatura manuale verrà ampiamente trattata nella sezione 1.2. In questa verranno brevemente descritti gli altri metodi di formatura.

Formatura meccanica

La formatura meccanica è quella generalmente più utilizzata. Con questo tipo di impianti è possibile realizzare in serie delle forme di medie dimensioni. Esistono molte varianti di impianto a seconda del tipo di prodotto e di produzione.

Si tratta sostanzialmente di una movimentazione circa in linea delle staffe che vengono riempite automaticamente dalla sabbia dopo il posizionamento del modello. Possono essere realizzate forme orizzontali separate che vengono portate dalla linea fino in colata e poi in distaffatura. Tali forme sono contenute nelle staffe che si muovono in linea. Altrimenti il getto può essere posizionato verticalmente e la forma non è in staffa ma in motta e la composizione della linea è modulare; ciò significa che una forma accoppiata alle vicine realizza sulle due superfici le due parti di modello.

Formatura con maschera

Questo tipo di formatura utilizza modelli permanenti, in genere metallici che sono molto rigidi e consentono un utilizzo prolungato: l'accuratezza delle dimensioni è ottima e non decade velocemente con l'uso. Il processo utilizza l'indurimento della parte più vicina al modello con leganti in resina, ottenendo un guscio sottile (lo spessore varia in funzione del peso del getto e dalla resistenza che deve avere il guscio) in sabbia che va accoppiato ed incollato al suo omologo, un po' come per la formatura in conchiglia. Viene normalmente impiegato in linee automatizzate. Possono essere realizzate anche anime cave, consentendo anche risparmi di materiale.

Formatura ceramica

La forma è costituita da un impasto di materiale ceramico resistente ad alta temperatura, che indurisce per effetto di una reazione chimica. Tolto il modello, gli elementi della forma vengono cotti alla temperatura di circa 1000 °C e poi ricomposti. Questo sistema di formatura è particolarmente indicato per getti con pareti sottili, dà la possibilità di ottenere tolleranze ristrette e si adatta a leghe ad elevato punto di fusione. Si possono ottenere pezzi anche molto grandi, fino a qualche centinaio di chilogrammi. Il sistema si addice a pezzi unici, oppure a serie medie e piccole. Le tolleranze possono variare dallo 0.3 allo 0.8%.

1.1.3 Tecniche con forma e modello a perdere

Formatura cera persa

Caratteristica del sistema è l'impiego di un modello di cera che viene volatilizzato da metallo liquido che entra nella forma. Per migliorare la produttività, i pezzi vengono sistemati a grappolo. La colata può avvenire sia immergendo detto grappolo in una miscela refrattaria che poi viene fatta solidificare (investment flask casting), sia rivestendo il grappolo con un semplice guscio refrattario (investment shell casting). Caratteristiche dei getti (dai più piccoli ai più grandi) è quella di riprodurre con precisione i dettagli del modello. Le tolleranze variano dallo 0,3 allo 0,7

Formatura lost foam

Questo sistema impiega un modello di polistirene espanso, ottenuto mediante apposita conchiglia, che poi viene annegato in una massa di sabbia. Il modello di polistirene fatto in un solo pezzo può consentire sottoquadri che non impediscono la sua estrazione dalla conchiglia data la relativa deformabilità del materiale; esso viene anche verniciato per ottenere una superficie liscia. L'ingresso del metallo liquido volatilizza il polistirene che viene sostituito dal metallo. Con questo sistema si possono colare anche pezzi di notevole grandezza, secondo la disponibilità delle attrezzature. Le tolleranze raggiungibili vanno

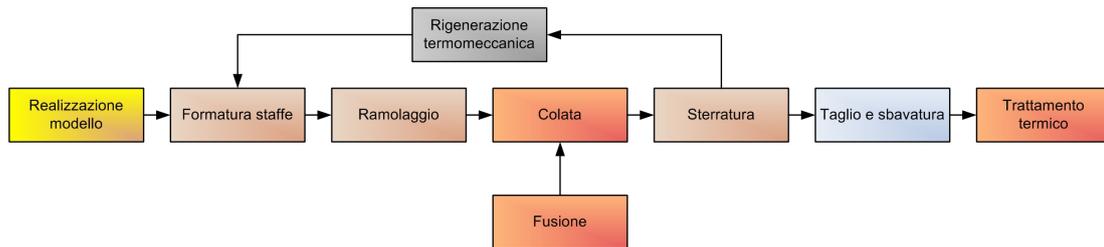


Figura 1.2 – Schema del processo di fonderia in sabbia con rigenerazione meccanica

dal 2 al 4%. Al pari del sistema a cera persa, suo antichissimo predecessore, il sistema a schiuma persa è un procedimento sostitutivo, in cui un modello maschio, evaporando, lascia il posto al metallo.

Per realizzarlo si prepara un modello in schiuma di polistirolo avente esattamente la forma del pezzo da colare, lo si riveste di uno strato ceramico e lo si copre con sabbia asciutta; indi si introduce del metallo fuso. La schiuma evapora mentre il metallo solidificandosi, ne assume la forma, mantenuta intatta dal rivestimento ceramico. Dato il suo prevalente impiego da parte dei costruttori di motori per autoveicoli, il sistema a schiuma persa può sembrare destinato esclusivamente alla produzione di pezzi di grandi dimensioni, ma esso si presta invece alla realizzazione di qualunque tipo di getto cavo dai contorni irregolari (tanto più che l'uso di attrezzature di alluminio lo rende meno costoso del procedimento di colata in conchiglia).

Dal punto di vista ambientale il sistema a schiuma persa presenta minori inconvenienti rispetto al procedimento di colata in sabbia. La sabbia da fonderia contiene infatti composti fenolici nocivi per l'ambiente. Il suo riciclaggio comporta un notevole dispendio di energia, mentre la possibilità di smaltimento è connessa al tipo di legante usato. La sabbia usata nel sistema a schiuma persa, invece, non contiene leganti e quando, dopo essere stata utilizzata diverse volte, non è più idonea all'impiego perché eccessivamente polverizzata, viene quindi portata a discarica e interrata. L'unico sottoprodotto da tenere sotto controllo è il polistirolo gassoso, per il trattamento del quale si usa un inceneritore catalitico con nido d'ape ceramico e catalizzatore di platino. I gas di scarico, portati alla temperatura di circa 300°C, bruciano ad acqua e anidride carbonica.

1.2 La fonderia in sabbia a formatura manuale

Il processo di fonderia con formatura manuale comincia dalla realizzazione del modello in legno o materia plastica e termina con l'eventuale trattamento termico. Successivamente si possono effettuare delle lavorazioni meccaniche o trattamenti superficiali come l'anodizzazione, la sabbiatura o la verniciatura. In fig. 1.2 è rappresentato lo schema dei processi generalmente interni di una fonderia che utilizza la formatura in sabbia-resina. Le caratteristiche del processo a formatura manuale impongono la realizzazione di bassi volumi di produzione con un'alta variabilità di forme e soluzioni e produzione di getti di dimensioni

notevoli. Per la riduzione dei costi è sempre necessaria la rigenerazione meccanica delle sabbie ed eventualmente a seconda del tipo di produzione anche la rigenerazione termica.

1.2.1 Realizzazione del modello

Contrariamente alle forme permanenti, come quelle utilizzate per i processi in conchiglia, le forme a perdere rendono necessaria la presenza di un modello del getto per la continua realizzazione degli stampi nei quali si cola la lega liquida, poiché essi sono inutilizzabili dopo la loro distruzione che avviene nella fase di sterratura. La progettazione dei modelli avviene a partire dal disegno del componente finito che si vuole ottenere. Deve quindi tenere conto delle modificazioni di forma che intercorrono sia nella forma che nel getto successivamente alla fase di colata. Inoltre è necessario tenere in considerazione le esigenze costruttive del modello stesso, le esigenze operative dei processi a valle, le tolleranze necessarie e la durata che il modello sottoposto a continue formature dovrà avere. A partire dal disegno del componente finito comprensivo di lavorazioni meccaniche, l'analisi necessaria per il disegno definitivo del modello comprenderà i seguenti aspetti:

1. sovrametalli di lavorazione,
2. ritiro in raffreddamento,
3. estraibilità del modello dalla forma in sabbia,
4. fori ed anime,
5. sottosquadri,
6. raccordi.

Vi sono inoltre da considerare tutte le appendici necessarie alle fasi a valle della modelliera, come:

1. canali di colata,
2. materozzatura,
3. centraggio,
4. appendici necessarie alle lavorazioni esterne alla fonderia.

Sovrametalli

Generalmente per le applicazioni meccaniche il processo di fonderia non permette di ottenere finiture e tolleranze dimensionali sufficienti ad evitare le riprese di lavorazione. Per questi settori è sempre necessaria una serie di processi che portano le dimensioni alle tolleranze previste mediante asportazione di truciolo. Anche per il settore dello stampaggio termoplastico la presenza di lavorazioni è sempre necessaria; infatti se per la superficie

utile dello stampo realizzato la precisione sufficiente (come ad esempio per l'arredo bagno) può essere raggiunta utilizzando sabbie a granulometria fine, è necessaria anche se minima comunque una lavorazione per la realizzazione degli accoppiamenti di montaggio dello stampo realizzato sulle macchine operatrici. Ovviamente si cercherà di ottenere fin da subito le tolleranze richieste ove possibile senza ulteriori riprese per asportazione.

Risulta chiaro che sempre e comunque vi è una parte del getto che dovrà prevedere uno spessore aggiuntivo di metallo per permettere l'asportazione di truciolo, come chiaro è anche il fatto che si tenda a minimizzare lo spessore di questo sovrametallo, compatibilmente con le tolleranze insite nelle lavorazioni che precedono l'asportazione e che vanno ad aumentare tali spessori. In altre parole lo spessore del sovrametallo deve essere sufficiente a portare il getto sotto la macchina di lavorazione meccanica con le dimensioni minime: tale spessore non dovrà essere inferiore alla diminuzione delle dimensioni che a partire dalla formatura si potranno avere successivamente, altrimenti l'utensile non otterrà il contatto con la superficie che dovrà lavorare.

Vi sono inoltre altri aspetti che possono indurre un aumento del sovrametallo, come la presenza di porosità superficiali che in alcuni punti non sono eliminabili. Dunque si va ad ingrossare la zona che presenterà tali imperfezioni per arrivare con una superficie finita di qualità sufficiente. Può accadere inoltre che sia più conveniente lavorare il getto ultimato che variare la geometria sul modello a causa delle eventuali complicanze nella sua realizzazione o nel suo utilizzo in formatura. Infine la presenza degli sformi porterà ad un ingrosso variabile delle dimensioni del getto.

Ritiro

Le leghe metalliche utilizzate in fonderia subiscono una contrazione volumetrica successiva alla solidificazione, con il risultato di produrre un getto più piccolo della cavità entro cui sono colati. Il modello deve essere quindi sovradimensionato di quel tanto che basta a compensare la dilatazione termica. In realtà non è sufficiente variare uniformemente tutte le dimensioni: la previsione della quantità di contrazione è possibile solo per geometrie semplici o per mezzo dell'analisi numerica, poiché la deformazione avviene sia a seconda del salto termico, sia a seconda del campo di sforzi indotto.

Inoltre è possibile che il ritiro sia impedito a perché la forma non permette il ritiro del pezzo e dunque potrebbe indurre una deformazione plastica iniziale che altera successivamente le dimensioni a freddo. Nella progettazione del modello è da intuire anche il verificarsi dell'hot-tearing, che si può compensare con strutture del getto o della forma particolari.

Estraibilità del modello dalla forma in sabbia

Il modello che viene completamente ricoperto dalla sabbia non potrà essere tolto dalla forma. Se si prevede di lasciare il modello al suo interno, si parla dunque di Lost Foam (schiuma persa). In tal caso il modello deve essere in grado di vaporizzare all'arrivo della lega liquida, quindi si realizzerà ad esempio in materie plastiche come il polistirolo (che

per esempio non contiene cloro ed esclude il pericolo di formazione della diossina).

Se il modello deve essere riutilizzato è necessario prevedere un sistema per poterlo estrarre dalla forma indurita. La soluzione più semplice è progettare la formatura in modo da ottenere una forma scomponibile, per poterla aprire successivamente. Questo accade con la formatura del modello in natura: le due forme che si ottengono possono essere separate da uno strato che non permette la presa tra due zone della forma. Su un piano si poggia il modello e le staffe di contenimento, si getta la sabbia di formatura all'interno. Dopo l'asciugatura si ruota il tutto, si ricopre la forma indurita di un materiale che non permette l'incollaggio della sabbia che subito dopo sarà gettata e si procede alla formatura dell'altra metà. Ad asciugatura completa le due forme realizzate saranno separate, si solleva quella superiore e si estrarrà il modello. L'accoppiamento successivo senza il modello all'interno creerà la sede dove verrà colato il getto.

Un'altra soluzione è quello di prevedere, invece che la forma, il modello componibile. Si realizzerà un modello progettato in due parti, con un piano di divisione che separerà la formatura della staffa superiore con un semimodello e la formatura della staffa inferiore con l'altro semimodello. La formatura avverrà quindi con due fasi completamente distinte, con due semimodelli completamente distinti. Generalmente i due modelli saranno disposti su placche che avranno anche delle dime per l'accoppiamento successivo delle semiforme. Il modello in placca sarà costituito allora da due tavole (le tolleranze di planarità andranno ad influire sull'accoppiamento successivo delle semiforme) sulle quali saranno presenti le metà superiore ed inferiore del modello. In questo caso la progettazione del piano di divisione dovrà essere molto più accurata, la realizzazione più complessa per le esigenze di centratura e di accoppiamento delle semiforme che si vanno a realizzare.

Esistono un altro tipo di problema legato all'estrazione del modello. Quando i vettori nella direzione di estrazione applicati alla superficie del modello a contatto con la sabbia attraversano solamente il modello, questo è estraibile senza problemi. Quando invece tali vettori intersecano una zona di sabbia si ha la presenza di uno sottosquadro, che impedisce al modello di uscire dalla forma. Esistono due tipi di soluzione al problema, come si vedrà nella sezione dedicata al sottosquadro.

Quando non esistono sottosquadri, il modello che ha una componente di tali vettori paralleli ad una superficie di contatto non è estraibile comunque. Tale comportamento è dovuto alla rugosità superficiale della sabbia e del modello, che genera sottosquadri micrometrici. Per rendere il modello estraibile è necessario allora introdurre degli angoli di spoglio su tutte le superfici di contatto parallele alla direzione di estrazione (generalmente ortogonale al piano di divisione). Il valore dell'angolo dipende dal materiale di formatura, dal legante, dalla rugosità della sabbia e dal tempo di indurimento delle forme.

Fori ed anime

È possibile nel processo di fonderia realizzare delle cavità all'interno del getto grazie ad inserti posizionati all'interno della forma. Questi inserti (detti anime) sono preparati separatamente dalla formatura delle semiforme. Similmente al problema di estrazione

del modello ma in modo opposto, le anime hanno la necessità degli angoli di spoglio per poter essere adeguatamente inserite nelle semiforme; hanno anche il problema dei sottosquadri.

Oltre ai problemi di inserimento in forma, per la progettazione delle sedi di appoggio, dette portate d'anima, ci sono delle difficoltà per la spinta metallostatica che agisce su di esse, tendendo a farle galleggiare all'interno della fusione o a romperle. È opportuno prevedere quindi delle portate d'anima che garantiscano la stabilità e la resistenza delle anime a fronte delle spinte che riceve.

Sottosquadro

La presenza di sottosquadri che impediscono l'estrazione del modello impongono l'utilizzo di artifici diversi a seconda delle esigenze. Caso per caso si definiranno le scelte progettuali più adatte alla soluzione del problema, ma in linea generale si possono classificare in questo modo:

Anima: viene realizzato un inserto che posizionato in maniera opportuna riempie i sottosquadri che senza di esse si presenterebbero sul modello. Ovvero sul modello si toglie il sottosquadro allargando la figura e prevedendo delle portate d'anima e poi si realizza l'anima che andrà a riempire in forma quella parte che è stata aggiunta sul modello.

Motta: invece di realizzare un'anima con la costruzione di una cassa d'anima, si realizza prima di stampare il modello un angolo di spoglio con la sabbia di formatura; in pratica si realizza un'anima, la cui portata verrà automaticamente realizzata stampando la motta ed il modello assieme.

Tassello: il modello in corrispondenza dell'angolo di sforno presenta una parte mobile che viene inserita su di esso parallelamente alla direzione di estrazione della forma. In questo modo il tassello che realizza la protuberanza all'origine del controsforno rimane, durante l'estrazione del modello, nella semiforma. Verrà estratto successivamente con una direzione diversa verso lo spazio lasciato libero dal modello. In questo modo con una serie di operazioni successive di estrazione l'intero modello scomponibile è estratto dalla semiforma senza danneggiamenti e secondo le direzioni opportune. Tali operazioni risultano difficilmente automatizzabili in impianti di formatura, per cui la presenza di tasselli è caratteristica della produzione per formatura manuale.

1.2.2 Formatura

La fase di formatura è la fase in cui viene realizzato il negativo del getto dal modello. Questo processo è presente solo nelle fonderie con forme a perdere. Nelle fasi di formatura vengono posizionati molti dei componenti accessori, come sistemi di colata, sedi per filtri,

materozze interne, componenti per aumentare la resistenza strutturale della forma, sfiati o componenti da annegare nel getto (come ad esempio serpentine per il controllo della temperatura in applicazioni per stampaggio termoplastico, inserti vari. . .).

Si classificano i processi di formatura a seconda dei materiali utilizzati per la realizzazione del negativo. Formatura a legante inorganico:

- a verde, dove l'indurimento è provocato da composti a base di argilla, con acqua ed eventualmente additivi,
- a secco, la forma è indurita con essiccamento,
- in sabbia-silicato, dove la grana è di sabbia di quarzo ed il legante è silicato di sodio,
- in sabbia-cemento, con leganti generalmente costituiti da cementi Portland.

Formatura con leganti organici:

- Hot-Box, con agglomeranti in resine sintetiche con indurimento tramite catalizzatori che reagiscono alla temperatura,
- Cold-Box, con leganti organici che reagiscono a freddo tramite il flussaggio di un gas polimerizzante,
- No-Bake, con catalizzatori che polimerizzano a freddo.

Generalmente l'utilizzo di sabbie silicee è abbinato alla formatura a verde o al processo No-Bake per la semplicità di utilizzo, mentre per la formatura delle anime si trova ancora una notevole varietà.

No-bake

In questa classe di processi rientrano tutti i quelli che utilizzano sabbie silicee e resine sintetiche ad indurimento a freddo. L'indurimento della forma è controllabile tramite la variazione dei componenti del legante, potendolo completare in alcune ore o in alcuni minuti.

Esistono diverse resine che sono utilizzate per la formatura:

- Alchidico, con buona resistenza in colata e basso costo
- Furanico, con elevata resistenza a freddo e recuperabilità della sabbia
- Poliuretano, con ottime caratteristiche per il processo di sterratura e molto adatto alla rigenerazione termica delle sabbie
- Fenolico, con elevata resistenza in colata e basso costo dei leganti.

Il processo con legante organico garantisce un'ottima riproduzione delle geometrie e della finitura superficiale del modello, grazie alla elevata compattazione e rigidità raggiungibili. Per queste ragioni sono anche state revisionate le norme sulle tolleranze dimensionali e sui sovrametalli dei getti, con l'introduzione di classi di severità superiore. L'elevata rigidità della forma impone d'altronde la scelta di soluzioni costruttive dei modelli che tengano conto del maggiore angolo di sforno necessario e della maggiore resistenza strutturale e all'usura che sono necessarie per poter utilizzare il modello a lungo.

Il secondo aspetto critico nell'utilizzo di forme rigide è la resistenza al ritiro termico dei getti, poiché si introducono tensioni elevate, con pericoli di rottura a caldo nelle leghe con basso scorrimento plastico a caldo.

Le sabbie

Generalmente la sabbia utilizzata in fonderia di metalli leggeri è quella silicea (generalmente almeno 99% di SiO_2), in quanto oltre ad essere compatibile con tutti i sistemi leganti ed essere discretamente refrattaria, è anche quella con il costo più basso con qualità buona. Vi sono molti tipi di materiale per formatura, come la cromite (bassa dilatazione e alta conducibilità), lo zircone (refrattario), l'olivina (utile con materiali al manganese in quanto non reagisce), ma spesso sono utilizzati per i getti in acciaio.

I parametri per la valutazione della sabbia sono i seguenti:

Granulometria: ha notevole importanza sulla qualità della fusione, in quanto un ampio spettro di distribuzione può portare a rotture che causano bave e crestine, mentre uno spettro ridotto può comportare una coesione debole, a causa dei massicci vuoti tra i grani più grandi.

Superficie specifica: è la somma della superficie dei grani presenti in una determinata quantità di sabbia. È un indice che tiene in considerazione il fattore di forma dei grani che influenza la capacità di essere coesi con la matrice legante e le proprietà di traspirazione e resistenza termica. Il fattore di forma è minimo per un grano sferico e massima per un grano discoidale.

Angolosità: a parità di massa è il rapporto tra la superficie sferica e la superficie reale del grano.

Densità apparente: è la massa contenuta in un dato volume. Poiché la sabbia è in grani, in tale parametro viene considerato il volume interstiziale fra i grani e rappresenta la cosiddetta densità di mucchio, che è inferiore alla densità teorica del materiale che costituisce i singoli grani.

Permeabilità: è la capacità della sabbia di essere attraversata dai gas che si formano in fase di colata ed è determinata essenzialmente dallo spettro granulometrico. Più frazioni fini sono presenti più la sabbia è impermeabile, ma permette di contro una crescente finitura superficiale del getto.

Proprietà meccaniche: si misura in diversi modi, come resistenza a taglio, compressione, trazione flessione. . .

Le caratteristiche elencate sono strettamente correlate, in quanto a seconda della distribuzione granulometrica e della superficie specifica si necessita una maggiore o minore quantità di legante, si determina una maggiore o minore permeabilità. Tali necessità opposte necessitano di un'ottimizzazione al fine di raggiungere il compromesso corretto che porta alla qualità ed alle caratteristiche desiderate del getto.

La rigenerazione

La rigenerazione è il processo mediante il quale le sabbie ritornano pronte all'uso dopo la sterratura dei getti. Il processo comincia generalmente con la frantumazione del materiale di sterratura attraverso vari setacci vibranti e frantoi, per giungere ad una granulometria simile a quella originale. Dopo questo processo il grano è ancora rivestito da un film di legante e può essere ancora incollato ad altri grani. Vi è comunque una parte di grani che rompendosi va a formare una frazione fine indesiderata che viene eliminata. Questa fase della rigenerazione è detta "meccanica". Questo processo può essere sufficiente ed i grani vengono nuovamente immessi nelle nuove forme.

Se invece si desidera utilizzare sabbia senza legante residuo si utilizzano processi meccanici o termici. I primi utilizzano elevate energie d'urto per distaccare i film di legante sul grano (producendo però una quantità notevole di frazione fine non voluta), mentre i secondi bruciano i composti organici residui attraverso una combustione della sabbia (calcinazione), generando così solo una frazione inferiore di fini (rigenerazione termica).

La sabbia che esce dal processo rigenerato è migliore di quella nuova, poiché i grani escono arrotondati, con un fattore di forma più vicino a quello della sfera. Inoltre si ottiene un controllo interno della granulometria, raggiungendo quantità di fini inferiore. Data la continua degradazione dei grani verso la forma sferica e la continua eliminazione del fino prodotto, il processo non è definibile come chiuso in senso stretto, poiché è necessaria la periodica reintegrazione con sabbia nuova.

1.2.3 Ramolaggio

Il ramolaggio è la fase successiva alla formatura che si occupa della preparazione delle forme per il processo di colata. In questa fase sono possibili aggiustamenti o modifiche della forma. Le fasi che sono necessarie alla colata variano a seconda del tipo di getto, ma sostanzialmente si possono distinguere in:

- pulizia delle forme,
- creazione di accessori come canali di colata,
- verniciatura delle forme,

- posizionamento delle anime e chiusura.

1.2.4 Pulizia delle forme

La pulizia delle forme è necessaria in quanto la riproduzione del modello può non essere perfetta. In questa fase vanno date alle parti della forma che lo necessitano le finiture che non sono venute in fase di formatura. Inoltre sono da eliminare le bave o le parti di sabbia che corrono il rischio di rompersi con il flusso di metallo liquido e quindi di essere inglobate nel getto. Si effettuano eventualmente riparazioni con incollaggio o ricostruzione dei particolari danneggiati o inutilizzabili. Si eliminano anche i componenti dei modelli ad una sola stampata che sono rimasti agglomerati nella forma, in particolare spessori sottili con modelli in materiale plastico. Tramite levigatura possono essere inoltre migliorate le finiture superficiali quando il materiale del modello è particolarmente rugoso (ad esempio polistirolo).

1.2.5 Creazione di accessori o parti di getto

In questa fase possono venire realizzati degli spessori che risulteranno nel getto tramite l'asportazione di sabbia. Oltre alla costruzione di spessori o appendici del getto, in questa fase si possono costruire i veri e propri canali di colata. In effetti tali operazioni potranno sembrare inutili a fronte di una progettazione perfetta del sistema di stampaggio, ma poiché nelle realtà produttive le risorse non sono sempre disponibili, è necessario prevedere una capacità di adattamento e modifica. Ad esempio la realizzazione di un canale di colata con modello prevede una superficie piana di accoppiamento tra le semiforme, che non è sempre possibile. In questi casi si procede con la creazione manuale.

Sempre in questa fase vengono eliminati gli spessori utilizzati per dare spessori ai getti in casi particolari, utilizzati per la stampa di una delle forme.

1.2.6 Verniciatura

Generalmente la sabbia polimerizzata non garantisce una buona riuscita del getto, poiché non possiede o le caratteristiche strutturali o termiche. Infatti la coesione superficiale della sabbia può non essere sufficiente per garantire la sua integrità nelle parti dove il flusso di lega liquida ha elevate velocità. Oppure la finitura superficiale della sabbia più fine non è ancora sufficiente per il rispetto dei requisiti del cliente. Inoltre si possono aumentare le capacità refrattarie della forma.

In questi casi si procede alla verniciatura con materiali speciali che prevengono i fenomeni di erosione, riducendo la rugosità e gli attriti con la lega. Secondo la funzione richiesta, possono essere applicate a pennello o a spruzzo, il secondo garantendo una superficie priva di striature.

1.2.7 Posizionamento delle anime e chiusura

Il posizionamento delle anime di solito avviene sulla semiforma inferiore. Esse vengono estratte dalla cassa d'anima, rifinite e inserite sugli alloggiamenti predisposti nella forma (portate d'anima). Una volta che le anime sono state inserite si procede alla chiusura della forma con il posizionamento della forma superiore su quella inferiore. Tale operazione è assai critica, in quanto è determinante per la sicurezza del processo di colata. Una cattiva chiusura può infatti provocare una perdita più o meno cospicua a seconda del grado di disaccoppiamento e del battente metallurgico. Sia nel posizionamento delle anime che nella fase di chiusura è essenziale verificare il corretto accoppiamento delle parti, provvedendo a ripetere l'operazione fino a che non si siano eliminate le eventuali interferenze, le quali causano un'abrasione tra le parti con successivo inglobamento nel getto di sabbia.

La chiusura definitiva avviene con l'inserimento di cordini e di colla sui piani di accoppiamento per la sigillatura. In fase di posizionamento della forma chiusa in colata avverrà anche un serraggio dei componenti in modo da garantire una forza di coesione superiore al peso della forma superiore, poiché questa ha una densità inferiore a quella delle leghe in colata. La pressione metallostatica potrebbe infatti far galleggiare la forma superiore con il distacco dei piani di accoppiamento.

1.2.8 Fusione

Il flusso delle lavorazioni sul metallo per la preparazione del bagno per la colata interseca trasversalmente il flusso di produzione delle forme. Il processo comincia con la fusione dei pani di alluminio che sono generalmente costituiti da leghe già pronte e termina con la colata in forma. In bagno comunque possono essere fatte aggiunte con fili animati per la creazione di leghe speciali. Dopo la completa fusione dei pani nei forni si procede con la pulizia del bagno, la affinazione, la modifica ed il degasaggio. Possono esserci vari passaggi del bagno, dai forni fusori a quelli di attesa e modifica, fino ad arrivare alla spillata in siviera, che porta la lega vicino alla forma in attesa. Si possono avere molteplici configurazioni, anche considerando il fatto che il passaggio di lega possono avvenire in appositi canali senza la necessità di spillature in siviera o in altri forni. Anche i forni hanno una notevole varietà, da quelli a crogiolo a quelli ad induzione. Nel caso specifico verranno considerate le operazioni necessarie alla conduzione del processo con forni a crogiolo.

La sequenza delle operazioni nel processo di colata in fonderie di getti di grandi dimensioni è la seguente:

1. Caricamento dei forni e fusione
2. Trattamenti
3. Spillatura e colata

Caricamento dei forni e fusione

L'operazione di fusione comincia con il caricamento dei crogiuoli con i pani di lega da fondere e dei ritorni di fusione. Il caricamento avviene in maniera selettiva, con l'appoggio delle bave sul fondo e poi dei pani disposti verticalmente, per evitare di rovinare o criccare il secchio con urti o dilatazioni termiche di pani disposti trasversalmente. I ritorni devono avere una percentuale controllata, poiché sono sempre più impuri della lega proveniente dalla prima fusione.

Trattamenti

Una volta che la lega è completamente fusa ed il bagno è liquido, si cominciano i trattamenti per portare il materiale allo stato desiderato.

Depurazione: serve a portare in superficie la maggior parte delle particelle non metalliche, presenti in bagno. Dopo l'aggiunta del depurante sulla superficie si formerà della scoria, che verrà tolta dal bagno con appositi mestoli.

Affinanti: servono a ridurre la dimensione della grana cristallina. Tale effetto si può raggiungere con una notevole asportazione di calore in fase di solidificazione, ma ove i flussi termici non sono sufficienti allo scopo (come nella fonderia in sabbia resina), è necessario introdurre degli elementi che abbassano la barriera energetica della nucleazione, in modo da favorire quest'ultimo ed ostacolare la crescita del grano; l'accrescimento del singolo grano ha una velocità minore, poiché la dispersione termica è distribuita su più grani. Generalmente si tratta di particelle metalliche che fungano da centri di cristallizzazione. Più sono piccole e numerose tali particelle, più il potere affinante aumenta. Oltre a diminuire la dimensione del grano, il trattamento di affinazione diminuisce la dimensione dei micro ritiri ma aumenta il loro numero. Inoltre diminuisce la viscosità a causa della minore dimensione dei cristalli.

La modifica è un trattamento che ha effetti sulla morfologia di solidificazione dell'eutettico. Generalmente con leghe al silicio, la dimensione dei precipitati è grossolana e la loro forma è aciculare. Con tali trattamenti il materiale diventa più fibroso e compatto. Per modificare morfologia e dimensione dei composti eutettici si possono utilizzare due metodi:

- per via fisica, con elevata velocità di raffreddamento, generalmente ottenibile con un trattamento di tempra (quench modification),
- per via chimica, introducendo i cosiddetti modificanti, ossia dei composti che alterano la nucleazione e la crescita del silicio.

Gli agenti modificanti più utilizzati sono:

Sodio: ha temperatura di fusione molto bassa e quindi è facilmente evanescente e di conseguenza ha tempi di azione molto ristretti, inoltre da luogo a reazioni violente; è però il più efficace nel produrre una struttura fibrosa, fine ed uniforme alle più basse concentrazioni;

Stronzio: è attualmente il più impiegato per la scarsa evanescenza. Comporta però una perdita di fluidità ed un aumento dei ritiri di solidificazione. Solitamente viene aggiunto sotto forma di "leghe madri" ($AlSr_4$, $AlSr_{10}$, ecc).

La morfologia del silicio eutettico varia in funzione di differenti livelli di modificante: man mano che si aumenta il tenore del modificante, si passa da una struttura non modificata, a lamelle, parzialmente modificata, e modificata, con una struttura molto fine. Il livello di modifica viene valutato in diverse modi. Per esempio, si può confrontare la microstruttura del campione con delle micrografie di riferimento, oppure misurare i parametri geometrici delle particelle di silicio eutettico, come area o perimetro, utilizzando tecniche di analisi d'immagine.

Il difetto della modifica è l'innalzamento del livello di porosità, anche se vengono distribuite uniformemente, in modo simile al trattamento di affinazione. Le ragioni si possono ricercare nella diminuzione di idrogeno, nella facilità di nucleazione delle porosità, nell'aumento dell'intervallo di solidificazione (abbassamento di $T_{SOLIDUS}$) che determina un micro riempimento più difficoltoso. Il *degasaggio* è il processo necessario alla eliminazione dei gas disciolti in bagno. I gas solubili nell'alluminio sono:

- idrogeno,
- metano,
- anidride carbonica,
- anidride solforosa,
- ossigeno,
- tracce di ossido di carbonio e azoto.

Tra tutti, l'idrogeno è il più solubile e viene disciolto molto facilmente nell'alluminio liquido: la solubilità aumenta esponenzialmente con la temperatura. L'idrogeno proviene sostanzialmente dal vapor d'acqua, con il quale il metallo reagisce in base alla stessa reazione che comporta la formazione degli ossidi. Il risultato collaterale è anche l'asportazione delle impurità presenti in bagno.

Per poter degasare e pulire in maniera efficiente il bagno sono necessarie condizioni in cui si formano bolle molto piccole di gas inerte, generalmente azoto o argon che trascinano in superficie le impurità e favoriscono la ebollizione di gas disciolti. Per creare queste condizioni non è sufficiente l'insufflaggio con lancia o a sorgente, ma è necessaria anche un'azione di stirring. Queste condizioni si possono ottenere con degasatori a gambo rotante.

Spillatura e colata

La spillatura è l'operazione che porta il bagno pronto in siviera, mediante la quale la lega è colata nella forma. Tale operazione comporta un'ossidazione del bagno abbastanza consistente, anche tenendo in considerazione il fatto che l'alluminio durante tutte le lavorazioni effettuate sul suo stato liquido non deve mai effettuare un salto superiore ai 12 cm. Per prevenire salti superiori è opportuno prevedere un sistema di filtrazione tra forno e siviera, che riduce anche lo stato turbolento ed il salto compiuto. In ogni caso è d'obbligo la scrematura in siviera prima della colata e prevedere la modifica all'ultimo momento in siviera. La colata comporta gli stessi problemi della spillatura, ma per contro bisogna considerare la filtrazione effettuata attraverso il sistema di colata.

1.2.9 Sterratura

La fase di sterratura è quella che estrae il getto dalla forma. Ci sono diversi sistemi di sterratura, a seconda del tipo di formatura, della dimensione e della presenza di anime. Generalmente è effettuata su griglie vibranti che frantumano la sabbia attorno al pezzo oppure con martelli pneumatici quando le condizioni sono difficili. Possono essere effettuate su impianti automatici per dimensioni medio-piccole, mentre per dimensioni notevoli o con presenza di staffe in acciaio è necessario un processo manuale.

La fase è particolarmente delicata a causa delle notevoli vibrazioni subite dai getti, che possono facilmente portare a rotture o cricche sulle appendici. In effetti è consigliabile prevedere sulle materozze e sugli attacchi di colata dei punti ad innesco di rottura agevolato, in modo da salvaguardare l'integrità. Alternativamente si possono irrobustire tutte le appendici, ma con un aumento del tempo necessario al taglio e alla sbavatura.

1.2.10 Finitura

Dopo la sterratura si devono eliminare le appendici di colata e le bave. Le materozze possono essere asportate con varie tecniche, a seconda della progettazione. Possono essere tagliate o, se prevista una sezione debole, troncate o urtate. Dopo il taglio delle materozze è necessaria un'operazione di sbavatura che elimini le bave che derivano sia da accoppiamenti imprecisi tra le forme e tra le anime e le loro portate, sia dai residui delle appendici di colata. Il getto grezzo ha tutte le appendici di colata e le materozze. Normalmente lo smaterozzamento avviene o per taglio con mola o per deformazione plastica, se il materiale ed i getti lo permettono. Successivamente il getto deve essere sbavato per eliminare i residui di smaterozzamento e le bave che si formano tra anima e portata d'anima e tra le semiforme. Le operazioni devono essere previste in progettazione, poiché un errato posizionamento della materozza comporta un aumento della difficoltà e di conseguenza del tempo necessario allo smaterozzamento e sbavatura per la difficoltà di raggiungere con le attrezzature i posizionamenti necessari al taglio.

1.2.11 Lavorazioni successive

La sabbiatura o la granigliatura è una fase importante della realizzazione dei getti, poiché permette di ottenere un ottimo risultato visivo che è molto difficile da un grezzo. Inoltre si mettono a nudo i difetti superficiali per l'asportazione del piccolo strato sporco che può coprire porosità o cricche. Lo strato deriva ovviamente dalla carbonizzazione dei primissimi strati di materiali organici presenti in genere sulle forme e dalle eventuali piccole inclusioni superficiali presenti.

Le lavorazioni meccaniche sono variabilissime, dalla semplice bilanciatura ad operazioni con robot. Alcune leghe sono particolarmente lavorabili per asportazione di truciolo, altre molto meno. Da considerare inoltre per valutare gli effetti del processo produttivo sulle lavorazioni successive, la presenza di inserti duri, come ferro o inox, che possono portare ad un notevole rallentamento dell'asportazione di truciolo se non addirittura al rischio di rottura dell'utensile. Spesso gli inserti sono utilizzati per sospendere, all'interno della forma che sarà riempita di alluminio, dei componenti, come ad esempio il caso di serpentine per il controllo del raffreddamento in applicazioni termoplastiche.

1.3 Le leghe di alluminio da fonderia

Le leghe di alluminio hanno avuto un grande successo per le notevoli proprietà meccaniche, tecnologiche ed estetiche. L'utilizzo nell'industria è infatti vastissimo e prima di tutto la ragione è da ricercare nel rapporto tra resistenza meccanica e peso, che è paragonabile a quello degli acciai. Da notare grazie alla struttura CFC anche che l'allungamento e la malleabilità sono ottime (almeno per alcune leghe): grazie a tale duttilità si riescono a ricavare spessori sottilissimi. È molto resistente alla corrosione, in quanto lo strato di passivazione è assai stabile, al contrario degli acciai, offrendo una elevata resistenza agli agenti atmosferici e marini. Molte sue leghe sono saldabili. La sua conducibilità elettrica e termica sono ottime e grazie a questo è utilizzata per la conduzione di energia dove il peso dei componenti risulta critico.

L'insieme di tutte queste qualità è la ragione per cui tale materiale è il più utilizzato in campo aeronautico e spaziale, elettrico e termico, alimentare.

1.3.1 Designazioni

Contrariamente a quanto riscontrabile in altri materiali, come quelli ferrosi, le leghe a base di alluminio presentano composizioni chimiche molto differenti a seconda se destinate a processi di fonderia o a processi di lavorazione plastica. Da ciò ha preso origine storicamente lo sviluppo di metodi di designazione dissimili per le due categorie di leghe, e riferiti per quasi tutti i sistemi di normazione a specifiche norme; va precisato che frequentemente a questi criteri si aggiunge una codifica, a parte, per l'alluminio non legato. La classificazione delle leghe di alluminio legato per fonderia è possibile in due forme: la classificazione numerica e la classificazione chimica. La prima è definita dalla norma UNI 1780-1:2003, la

seconda dalla norma UNI 1780-2:2003 che UNI ha definito con recepimento delle edizioni europee. La prima è composta dai seguenti elementi nell'ordine

1. il prefisso EN seguito da spazio bianco;
2. la lettera A che indica l'alluminio;
3. la lettera che indica la forma: B per pani di alluminio legato per la rifusione, C per i getti, M per le leghe madri;
4. trattino;
5. cinque cifre che indicano la composizione ed i suoi limiti.

21xxx	Al Cu
41xxx	Al SiMgTi
42xxx	Al Si7Mg
43xxx	Al Si10Mg
44xxx	Al Si
45xxx	Al Si5Cu
46xxx	Al Si9Cu
47xxx	Al Si(Cu)
48xxx	Al SiCuNiMg
51xxx	Al Mg
71xxx	Al ZnMg

Tabella 1.1 – Gruppi di lega di alluminio legato da fonderia secondo la norma UNI 1780-1:2003

Le prime due cifre indicano i gruppi di lega: in tabella 1.1 sono raccolti i gruppi di lega. La terza cifra è arbitraria e la quarta è sempre zero. La quinta è diversa da zero solo per impieghi aerospaziali. La designazione chimica definita invece nella 1780-2:2003 è basata sui simboli degli elementi seguiti generalmente da cifre che indichino il tenore nominale in percentuale di massa. Come per la designazione numerica, i primi componenti fino al trattino rimangono uguali. Successivamente si inserisce il simbolo Al seguito da uno spazio bianco. L'elenco dei simboli che segue comincia dagli elementi più presenti a quelli meno presenti. Con priorità decrescente si descrive il contenuto nominale, poi se non è sufficiente si inseriscono tra parentesi le impurità principali e se non basta ancora si possono inserire dei suffissi. La designazione degli stati metallurgici segue una codifica alfanumerica dove le cifre hanno un significato puramente simbolico ed ogni combinazione lettera-numero contraddistingue una sequenza completa di operazioni termiche o meccaniche usate per ottenere il trattamento, quindi uno stato metallurgico della lega. La prima lettera definisce gli stati metallurgici di base:

F: grezzo di fabbricazione.

O: ricotto, per ottenere uno stato di minima resistenza alla deformazione.

H: incrudito, allo scopo di ottenere specifiche caratteristiche meccaniche. Utilizzato per le leghe che non prendono durezza per trattamento termico.

T trattato termicamente allo scopo di ottenere specifiche caratteristiche meccaniche, attraverso la solubilizzazione (W) e successivo invecchiamento.

Le altre cifre definiscono il ciclo delle operazioni termiche e meccaniche, con un dettaglio crescente.

1.3.2 Le leghe principalmente utilizzate nella fonderia in sabbia

Di seguito verranno descritte alcune delle leghe principalmente realizzate per la fonderia.

42100: AB-AISi7Mg0,3

È la lega principalmente utilizzata per la fonderia di alluminio. È adatta alla produzione in sabbia, in conchiglia e in bassa pressione. Per il suo contenuto di magnesio possiede ottime doti meccaniche e può subire trattamenti termici con ottimi risultati. Ottima resistenza a corrosione e saldabilità. La colabilità è ottima per colata in gravità, sabbia ed alta pressione, buona per la colata in bassa pressione. Questa lega è utilizzata in tutti i settori industriali, dalla realizzazione di autovetture, alla realizzazione di macchine di ogni genere, industria alimentare, energetico. . .

46400: AB-AISi9Cu1Mg

Possiede ottime doti di colabilità e poco ritiro. In particolare vi è la precipitazione di silicio di magnesio (Mg_2Si). Il silicio di magnesio forma un eutettico simile al silicio e quindi precipita al di sotto del campo di solubilità (precipitato α in matrice β). Se è presente magnesio oltre la proporzione stechiometrica, si riduce drasticamente la solubilità dell'intermetallico nell'alluminio, mentre la concentrazione di silicio la alza leggermente. Il massimo indurimento si ha per una composizione stechiometrica. Tramite il trattamento termico i precipitati possono essere finemente dispersi.

51300: AB-AIMg5

Tra le leghe di alluminio non suscettibili di indurimento per trattamento termico quelle di maggiore interesse sono le composizioni della serie 5000. All'aumentare del tenore di Mg (il massimo contenuto in peso nelle leghe commerciali è intorno al 5%) aumenta il livello delle caratteristiche meccaniche, ma si riduce sensibilmente la plasticità, che anche nei casi favorevoli non è mai molto elevata. Le leghe Al-Mg presentano eccellente saldabilità ed hanno un'elevata resistenza alla corrosione (specialmente marina). Le caratteristiche essenziali dei prodotti realizzati con le leghe da fonderia alluminio-magnesio sono l'elevata

resistenza alla corrosione, soprattutto in atmosfera salina, e la buona estetica. La miglior resistenza alla corrosione viene ottenuta con bassa presenza di impurezze (sia solide che gassose) e quindi le leghe devono essere preparate partendo da metallo di qualità e manipolate con molta cura in fonderia. La colabilità relativamente scarsa delle leghe Al-Mg e la naturale tendenza del magnesio ad ossidarsi rendono necessario curare con buona attenzione la tecnologia di colata di queste leghe.

71000: AlZn10Si9Mg

Lo zinco è un elemento molto solubile nell'alluminio e gli dona notevoli proprietà meccaniche di resistenza, anche per la capacità di essere trattato termicamente. La tempra può avvenire in aria a temperatura ambiente, quindi si definisce la lega autotemperante. È molto utilizzato in aeronautica per il suo elevato rapporto tra resistenza e peso, basti pensare che più dell'80% del peso di un aereo da trasporto è alluminio. I componenti presenti sono forgiati, laminati o getti da fonderia. Questa lega è saldabile, ma per la sua capacità autotemperante la saldatura non è di semplice esecuzione per le notevoli tensioni interne che genera.

1.3.3 Gli effetti degli elementi di lega

Raramente l'alluminio è commercializzato perfettamente puro a causa della sua scarsa resistenza meccanica. Normalmente al contrario, richiede l'aggiunta di piccole quantità di altri metalli che ne esaltino determinate caratteristiche. Alcuni elementi aggiunti ne evidenziano la resistenza meccanica o la resistenza alla corrosione, mentre altri ne sottolineano particolarmente la sua lavorabilità, duttilità, saldabilità e resistenza alle alte temperature. Gli elementi che si possono aggiungere in lega all'alluminio si possono distinguere in

leganti: elementi che caratterizzano la lega, ossia ne determinano e definiscono le caratteristiche (meccaniche, fisiche, ecc.) e le peculiarità. Essi sono: Cu, Si, Mg, Zn, Mn, Li;

correttivi: cioè elementi che modificano o migliorano le proprietà strutturali, fisiche o tecnologiche come l'affinazione del grano, la neutralizzazione di alcune impurità nocive, l'innalzamento della temperatura critica di ricristallizzazione, il miglioramento della lavorabilità all'utensile, l'incremento di resistenza ad elevata temperatura. Essi sono: Mn, Fe, Ni, Ti, Sn, Cr, B, Zr.

I vari elementi destinati alla preparazione di leghe binarie o complesse con l'alluminio possono essere aggiunti sostanzialmente in due modi:

- per introduzione diretta dell'elemento nell'alluminio. Questo metodo è impiegato per quegli elementi che presentano punto di fusione inferiore o uguale a quello dell'alluminio, ossia Sn, Zn, Mg. Oltre a questi, è impiegato anche per il Si che,

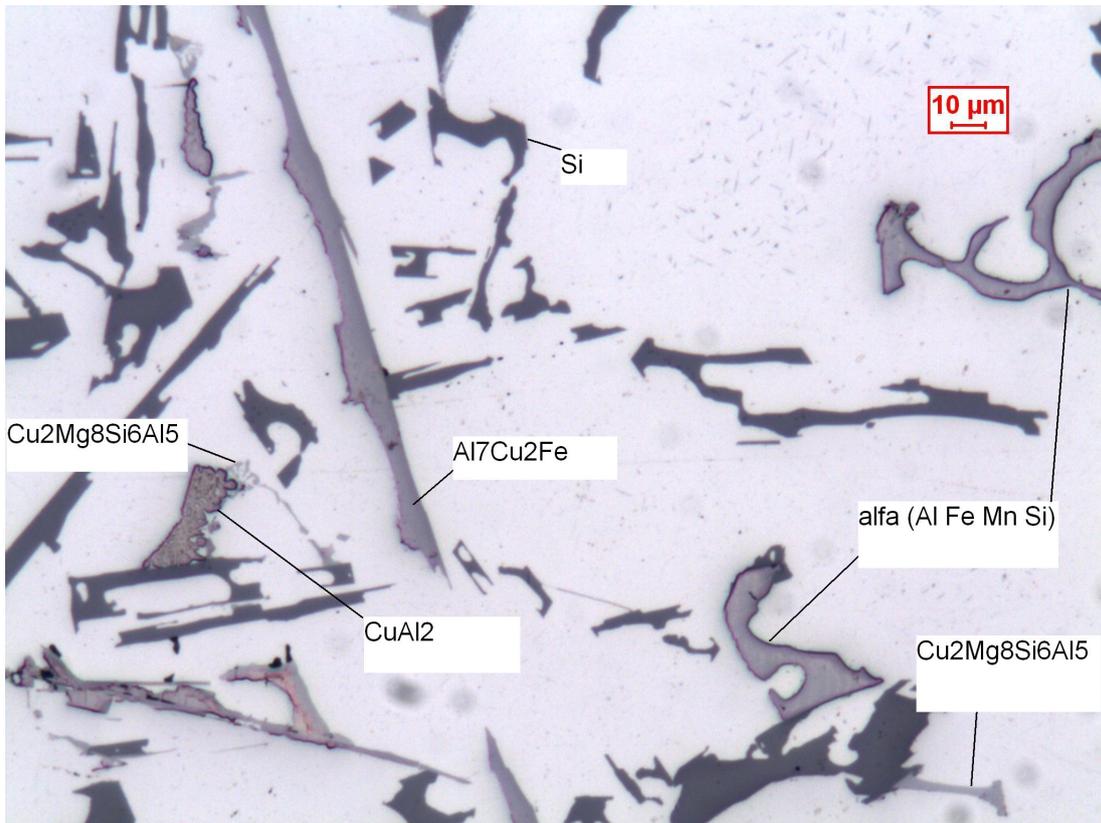


Figura 1.3 – Micrografia di un campione di AB-46400 in cui sono identificati i precipitati che formano i principali elementi chimici. Si può notare che la precipitazione del ferro formi un cristallo fortemente aciculare, che cambia morfologia con l'introduzione del manganese assumendo una forma a ideogramma cinese.

pur presentando un punto di fusione assai più elevato (1414°C), viene introdotto, e rapidamente solubilizza, in alluminio surriscaldato ($800\text{-}850^\circ\text{C}$);

- per introduzione nell'alluminio fuso di una lega generalmente binaria precedentemente realizzata contenente il legante nella massima percentuale possibile, compatibilmente con la temperatura di fusione conseguente. Questa lega è detta lega madre. Questo metodo viene applicato per tutti gli altri elementi che, pur disciogliendosi egualmente nell'alluminio fuso, in ragione principalmente della loro elevata temperatura di fusione, presentano una velocità di dissoluzione troppo bassa.

Nella fotografia in fig. 1.3 sono visibili i precipitati che alcuni elementi chimici formano in lega con l'alluminio. Di seguito saranno esposti brevemente gli effetti degli elementi chimici che più sono utilizzati per la realizzazione di leghe d'alluminio.

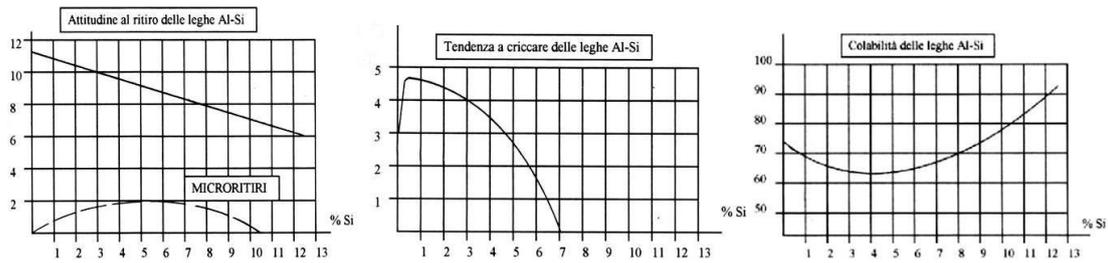


Figura 1.4 – Variazione delle caratteristiche di contrazione, colabilità e tendenza alla cricca al variare del tenore di silicio

Silicio

Il silicio è solubile parzialmente con l'alluminio e forma un eutettico a 577°C con una proporzione di 11,7% in peso. La precipitazione del silicio avviene in forma pura, senza la presenza di composto intermetallico. Ha importanti effetti sulla fluidità delle leghe liquide, quindi è fortemente desiderato nella fonderia. Inoltre ha particolari effetti migliorativi sulla caratteristica di ritiro liquido, sulla presenza di porosità e sulla tenacità. Riduce inoltre il coefficiente di espansione termica (minor tensioni di raffreddamento). Migliora la resistenza a corrosione (soprattutto intergranulare) e la conduttività elettrica e termica. Nelle leghe ipereutettiche (>12,2%) i cristalli di silicio primario migliorano la durezza e la resistenza ad usura, ma peggiorano la lavorabilità. Generalmente è richiesta la modifica delle leghe, perché i precipitati sono grandi e aciculari. In figura fig. 1.4 sono tracciati gli andamenti delle caratteristiche fondamentali delle leghe al variare del tenore di silicio.

Magnesio

Ha un eutettico (intermetallico Mg_2Al_3) al 35% alla temperatura di 450°C. Aumenta notevolmente la resistenza a corrosione in ambienti alcalini e marini. Dà una buona resistenza a caldo. Rimane inoltre duttile e perciò lavorabile. Non richiede trattamenti termici di invecchiamento. È facilmente saldabile. Ha una buona solubilità nell'alluminio per cui la precipitazione avviene in maniera consistente solo con percentuali superiori al 7% senza altri elementi (che riducono ancora la quantità di precipitati): il trattamento termico quindi non è utile all'aumento delle proprietà meccaniche. Le sue leghe sono però lavorabili a freddo e quindi incrudibili. Nelle fasi di precipitazione possono presentarsi delle strutture di "Widmstätten" dalle scarse proprietà indurenti, le cui dimensioni decrescono con l'aumentare della T di tempra.

Nelle leghe silicio-magnesio si ha invece la precipitazione del Mg_2Si , che è alla base dei trattamenti termici di queste leghe.

Zinco

È l'elemento più solubile nelle leghe d'alluminio, presentando un eutettico al 95% con temperatura di 382°C. Lo zinco aumenta fortemente la resistenza meccanica tramite l'in-

durimento per precipitazione, ma poiché comporta basse proprietà di resistenza a caldo, alla corrosione (inoltre tende alla fessurazione) elevati tenori di Zn sono sempre abbinati a magnesio e rame. Da solo non apporta nessuna modifica significativa delle proprietà, ma rende più fluida la lega e permette l'invecchiamento a temperatura ambiente. Le leghe della serie 7000 raggiungono prestazioni simili a quelle dell'acciaio, inoltre è autotemperante. Generalmente viene aggiunto assieme al magnesio.

Rame

Al 33% possiede un eutettico con una temperatura di 548°C (composto intermetallico: $AlCu_2$.) Aumento della resistenza meccanica per precipitazione ed invecchiamento (anche a caldo). Diminuisce il ritiro e la fragilità a caldo. Cala invece la resistenza alla corrosione. Fornisce un'ottima lavorabilità alla macchina utensile. Poco saldabile. L'indurimento avviene per precipitazione e successivo invecchiamento. In fig. 1.6 sono fotografati dei precipitati di forma globulare che evidenziano una morfologia non aciculare. In ogni caso i campioni fotografati non sono stati sottoposti a trattamento termico, quindi queste formazioni non si presentano nelle leghe altotestate e bonificate.

Nichel

Aumenta la resistenza meccanica a caldo, riduce il coefficiente di espansione e cala la resistenza a corrosione.

Zirconio, titanio, niobio, ferro, cromo, sodio e stronzio

Affinanti i primi tre, lo Zr controlla le dimensioni del grano durante la lavorazione a caldo o durante i trattamenti termici. Na e Sr modificano l'eutettico portando dalla morfologia aciculare alla sferoidale i precipitati secondari. Il ferro forma dei precipitati molto sottili ed allungati, infragilendo la lega, anche se migliora la resistenza a gocce fredde.

Cromo, manganese e ferro

In piccoli tenori il cromo aumenta la resistenza a corrosione. Cr e Mn sono impiegati in piccole quantità (meno dell'1%) e spesso assieme per migliorare le proprietà tensili alle alte temperature, nelle leghe alluminio-ferro-silicio, alterano la forma dei costituenti, migliorando le proprietà meccaniche a temperatura ambiente. L'allungamento delle leghe dipende fortemente dal contenuto di ferro presente in lega ed è una delle caratteristiche molto ricercate. Il ferro infatti precipita formando sottili grani aciculari e per diminuire il loro fattore di forma si introduce manganese. In Figura 4 si vede la micrografia di un campione lucidato con le indicazioni della composizione dei precipitati. Il sistema Al-Mn ha un eutettico (intermetallico $MnAl_6$) per una percentuale di 2% alla temperatura di 658°C. Il manganese controlla la dimensione granulare in temperatura (come lo Zr) aumenta la resistenza meccanica e la corrodibilità, in particolare riduce la corrosione intergranulare e



Figura 1.5 – Altri esempi di microstrutture. Si può notare la precipitazione del rame e, nella foto inferiore, la complessità della forma dei precipitati Fe-Cr-Mn a ideogramma cinese.

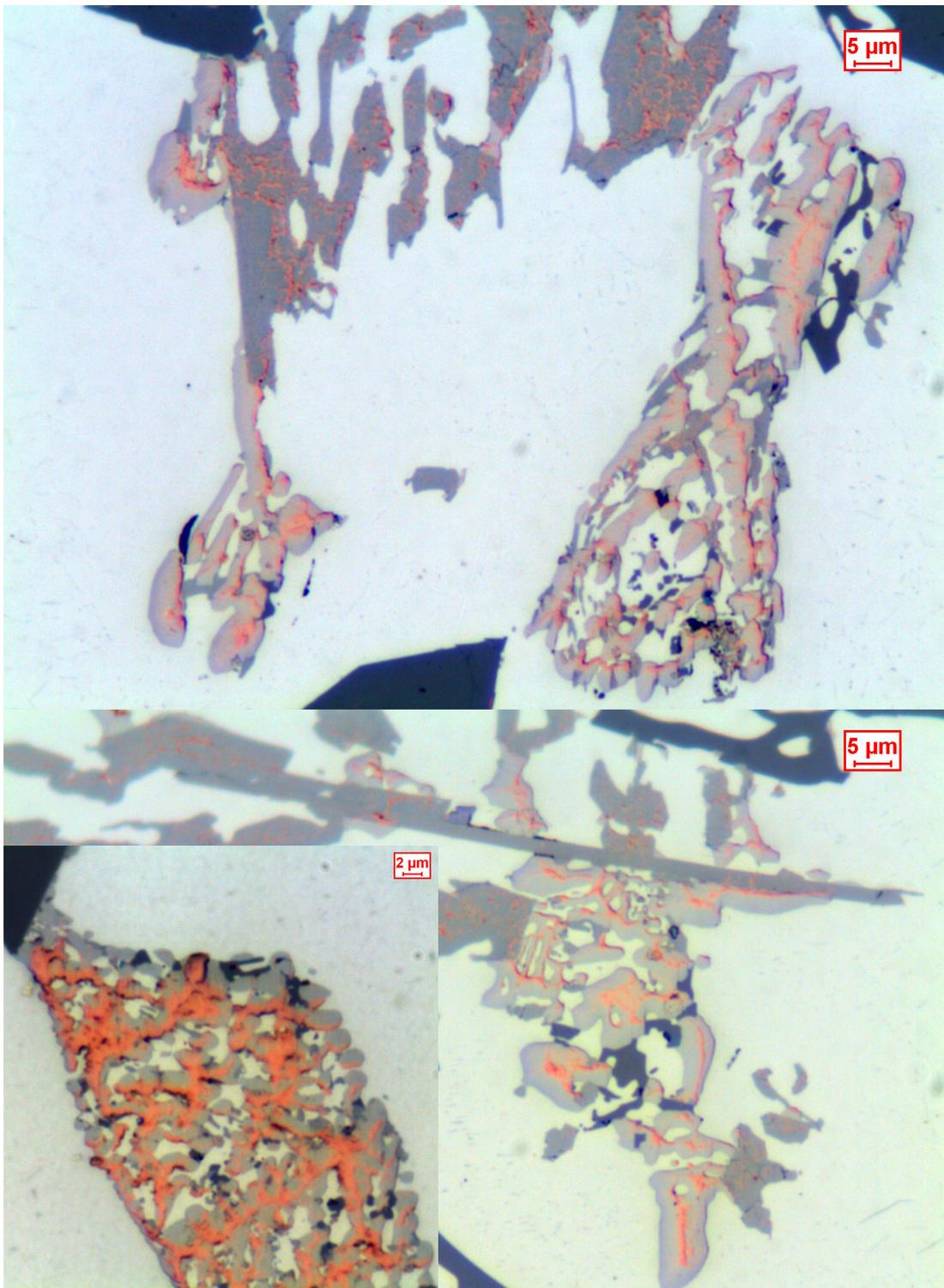


Figura 1.6 – Esempi di precipitazione del rame. La struttura affinata e non aciculare incrementa notevolmente le prestazioni meccaniche

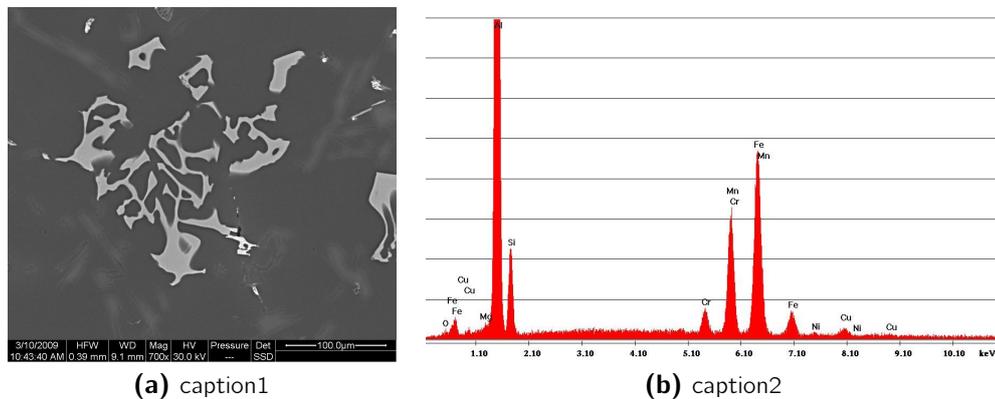


Figura 1.7 – Analisi micrografica e spettrografica di un precipitato ricco di manganese

la tensiocorrosione. Aumenta la resistenza meccanica a caldo (il Mn ha una temperatura di fusione alta). Un'altra funzione è quella di protezione dall'infragilimento da ferro, poiché conferisce ai precipitati la struttura ramificata a "carattere cinese". In fig. 1.7 sono inserite le analisi al SEM per l'individuazione della composizione chimica dell'eutettico in fotografia. La composizione rilevata indica chiaramente come il manganese si combini al cromo ed al ferro per formare un eutettico morfologicamente migliore, in quanto ha perso la classica forma aciculare così indesiderata dell'intermetallico che il ferro forma con l'alluminio.

1.3.4 Meccanismi di rinforzo nelle leghe da fonderia

Rinforzo per soluzione solida

Tale meccanismo di rinforzo agisce in leghe nelle quali l'elemento aggiuntivo è solubile anche nel solido. Tramite le tensioni e le distorsioni introdotte da elementi con raggi atomici diversi (sia da elementi interstiziali che sostituzionali) da quello della matrice si introduce un incrudimento (la distorsione cristallina è ostacolo alla propagazione delle dislocazioni).

Rinforzo per precipitazione

La precipitazione di composti forma un ostacolo alla propagazione delle dislocazioni, ma essendo normalmente più rigidi delle matrici il loro effetto di irrigidimento potrebbe essere dannoso per il comportamento meccanico se non vengono fatti precipitare in maniera finemente dispersa e morfologicamente opportuna. In

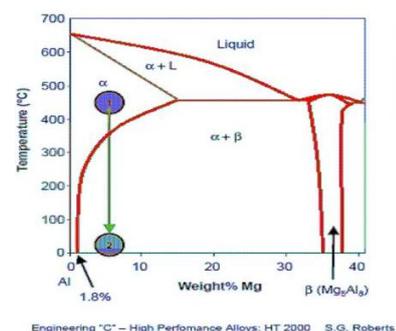


Figura 1.8 – Diagramma di stato di una lega al magnesio, dove è indicata la trasformazione che dà origine al rinforzo per precipitazione

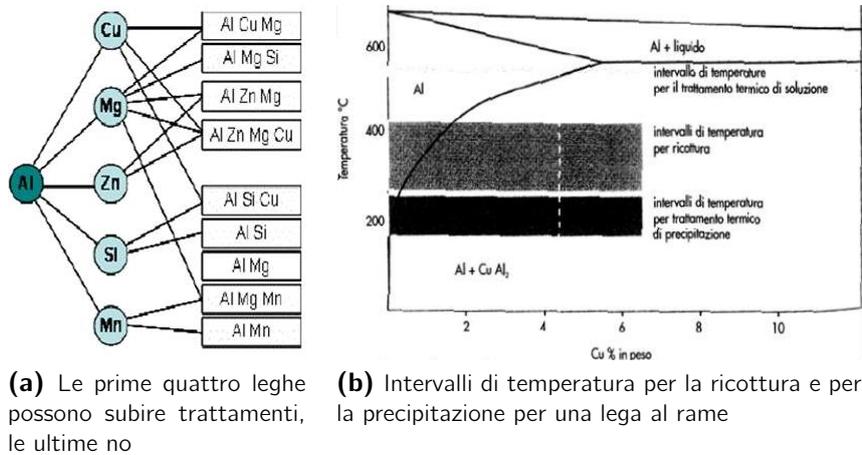


Figura 1.9 – Schema delle leghe e temperature di trattamento

fig. 3.4 si vede sul diagramma di stato di una lega al magnesio la trasformazione che porta al rinforzo per precipitazione.

Affinazione del grano

L'affinazione del grano aumenta la superficie di adesione dei grani e diminuisce i percorsi delle dislocazioni che la deformazione plastica introduce: le dislocazioni infatti terminano la corsa a bordo grano, dove vi è una zona di accumulo delle distorsioni. Tanto più fine è la grana della matrice metallica, tanto migliore sarà il comportamento meccanico.

Modifica

Per limitare un marcato calo di duttilità dato dai cristalli aciculari fragili di Silicio, viene praticata la modifica del costituente eutettico trasformazione in composti più fini e tondeggianti mediante Na oppure Sr. La modifica è stata trattata più ampiamente nella sezione 1.2.8.

1.3.5 Trattamenti

Solo alcune leghe possono subire trattamenti termici, nella fig. 1.9 a sinistra lo sono solo le prime quattro.

Omogeneizzazione

Lo scopo del trattamento di omogeneizzazione è quello di ridurre le caratteristiche di fragilità della struttura grezza di colata, migliorandone la lavorabilità a caldo e a freddo permettendo un più efficiente controllo delle condizioni di cristallizzazione e di ingrossamento del grano. Nella fig. 1.9 sono riportate le temperature di omogeneizzazione tipiche

della lega alluminio rame, insieme alla gamma dei tempi di permanenza in temperatura normalmente utilizzati per billette di circa 400 mm di diametro. Si tratta naturalmente di dati indicativi, poiché per la massima efficacia del trattamento si rendono spesso necessari dei test preliminari di messa a punto con analisi e comparazione delle microstrutture ottenute.

Ricottura

Nei getti la ricottura è adottata per ridurre le tensioni residue da solidificazione, o per minimizzare le variazioni dimensionali di pezzi da impiegare ad elevata temperatura. In Figura 11 sono schematizzati sul diagramma di stato con il rame i principali intervalli di temperatura dei trattamenti di soluzione, ricottura e precipitazione.

Solubilizzazione

La solubilizzazione ha lo scopo di portare allo stato di soluzione solida la maggior parte possibile degli elementi di alligazione presenti nella lega. La temperatura ideale per effettuare la solubilizzazione è spesso prossima, ma comunque inferiore, a quella di inizio fusione, compatibilmente alle esigenze di limitare l'accrescimento granulare. Un riscaldamento che provochi incipiente fusione deve essere accuratamente evitato poiché genera una rete intergranulare di eutettici fragili (fenomeno di "bruciatura") che, su vasta scala, possono ridurre in maniera irreversibile sia la resistenza meccanica che la duttilità della lega.

Un'importante conseguenza pratica di questi aspetti microstrutturali è che le leghe di alluminio, subito dopo tempra, presentano livelli di resistenza simili a quelli del materiale ricotto, e solo dopo un sufficiente periodo di invecchiamento, nel corso del quale la condizione di sovrassaturazione dà la possibilità al soluto di subire opportune evoluzioni microstrutturali, raggiungono le durezze tipiche di impiego.

Tempra e Invecchiamento

La tempra è chiaramente illustrata dai diagrammi in fig. 1.11, dove si distinguono le condizioni in cui si ottengono precipitati molto fini: sinistra è schematizzato il trattamento di bonifica (tempra ed invecchiamento). La tempra serve a portare in soluzione gli elementi si lega per poi farli precipitare molto fine-

mente per un violento raffreddamento (caso b). Un raffreddamento normale o lento comporta una scarsa nucleazione dei precipitati con un numero inferiore e dimensioni elevate (caso a). Con una dispersione fina degli elementi precipitati si possono ottenere elevate proprietà meccaniche per la diminuzione degli sforzi concentrati per l'aumento della superficie di contatto tra precipitato e matrice. L'invecchiamento ha una notevole influenza sulla resistenza che le

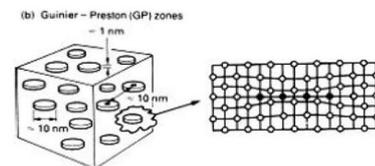


Figura 1.10 – Formazione delle zone GP

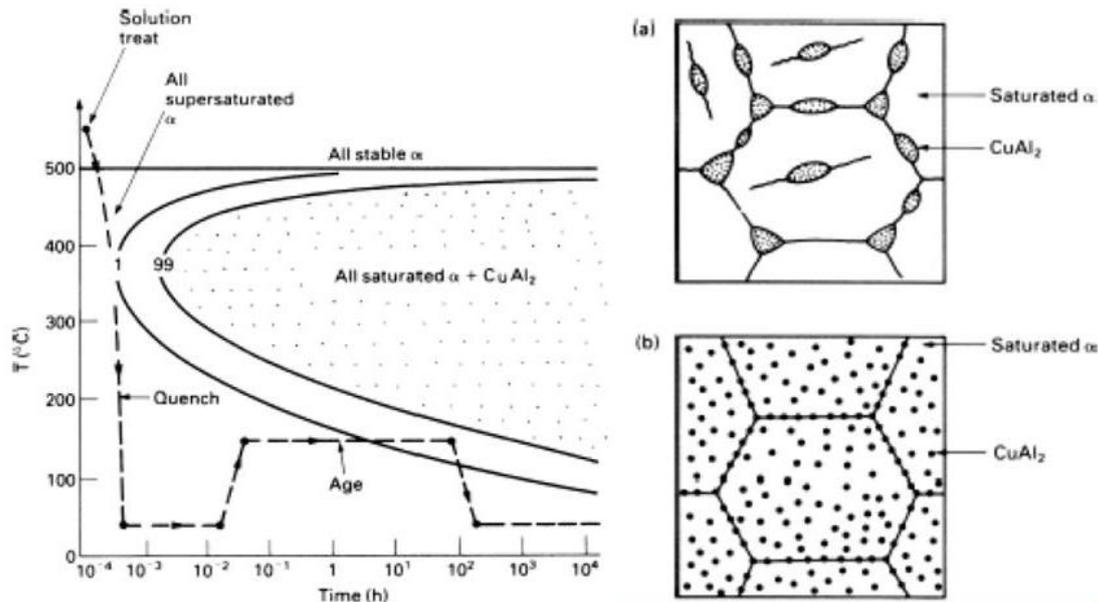


Figura 1.11 – Differenza di dispersione del precipitato per velocità diverse di raffreddamento: in a) la dispersione è scarsa, in b) la dispersione è fine

leghe d'alluminio riescono a raggiungere. Tale trattamento apporti notevole incremento rispetto allo stato temprato. nel caso delle leghe al rame si compone delle seguenti trasformazioni fisiche.

1. Cu va in soluzione solida con un aumento della temperatura in campo α .
2. Cu forma a seguito del rapido raffreddamento dei cluster di atomi (zone G-P) circondati da intensi campi sforzo-deformazione. In fig. 1.10 è schematizzata la morfologia e la struttura cristallina di questi agglomerati.
3. Il rame reagisce con l'alluminio e forma precipitati di piccole dimensioni e vicini fra essi (finemente dispersi). Tali precipitati (θ'') hanno strutture cristalline intermetalliche complesse. In questo caso tanto più fini sono le distorsioni cristalline e le dislocazioni, tanto più finemente i precipitati nucleano. In sono riportati i vari passaggi come somma di resistenza del materiale dei vari precipitati che si trasformano con il procedere del trattamento. Si noti come esista un tempo ottimale in cui la morfologia che risulta dalle varie trasformazioni conferisca una resistenza massima al materiale.
4. Reazione finale verso θ' e θ ($CuAl_2$) è quella desiderata, che conferisce migliori proprietà al materiale e si trova al punto 3 della fig. 1.12.

In fig. 1.12 sono rappresentati gli andamenti della UTS in funzione della temperatura e del tempo di invecchiamento per una lega 6085.

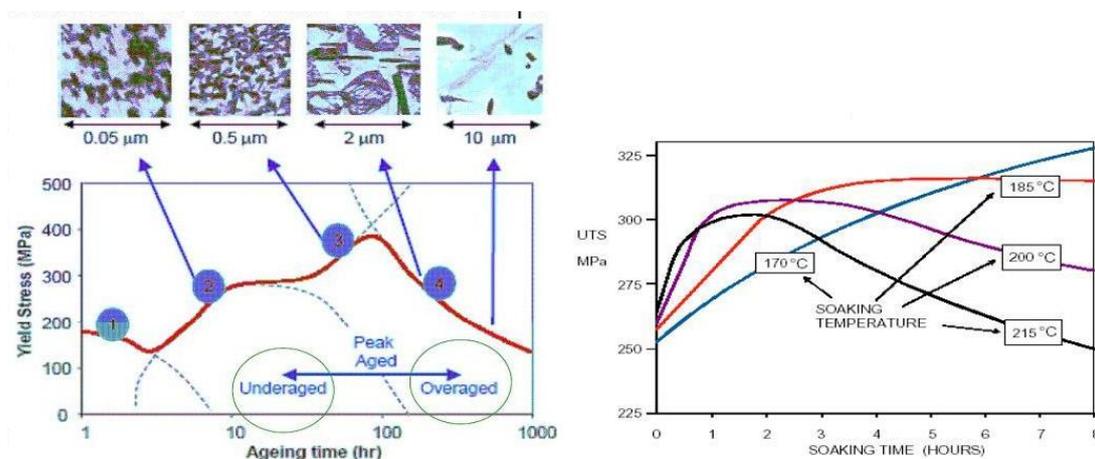


Figura 1.12 – A sinistra è schematizzato l'andamento della resistenza in funzione del tempo di trattamento e a destra l'andamento della resistenza per una lega 6082 in funzione della temperatura

1.4 Difetti

Il termine difetto viene spesso associato a quello “non-conformità”. Come specificato nel capitolo 2 i due termini hanno significati diversi. Se il difetto significa la presenza di una caratteristica del getto che non è desiderata rispetto all'utilizzo previsto, la non conformità è una qualunque disapplicazione di requisiti previsti, che siano organizzativi o di prodotto. In generale la gestione delle non-conformità include la gestione dei difetti, ma all'interno di quest'ultima categoria sono presenti delle classi che non conviene gestire come non-conformità e delle classi che non sarebbero dei difetti ma che possono indicare però lo stato di un processo. A fronte dell'utilità che deriva dall'analisi delle cause conviene dunque gestire come difetto non solo quell'aspetto che non permette l'utilizzo previsto, ma anche gli aspetti che possono indicare come un processo possa generare difetti su altri tipi di prodotto e che quindi possano essere potenziali difetti (e cioè ne impediscano l'uso previsto) sul resto della produzione. La scelta della categoria a cui appartiene una generica anomalia è quindi subordinata comunque a considerazioni sui metodi organizzativi e sui costi di gestione derivanti. Questo punto verrà sviluppato in seguito nel capitolo 2.

1.4.1 Le classificazioni dei difetti

Esistono diversi di approccio al problema della classificazione dei difetti da fonderia; si distinguono i due grandi famiglie, quelle che classificano il difetto in base alla morfologia e alla distribuzione e quelle che lo classificano in base alle specifiche origini metallurgiche. Entrambi hanno vantaggi e svantaggi, poiché l'uno non fornisce l'orientazione per una azione correttiva e l'altro non consente la catalogazione di un difetto che non abbia cause note. Per agevolare la pratica di fonderia è utile probabilmente lo schema che raggruppa i difetti morfologicamente, poiché la grande variabilità e la mancanza a volte di una causa certa rende difficoltosa la catalogazione in base alle origini. In questo lavoro è stata

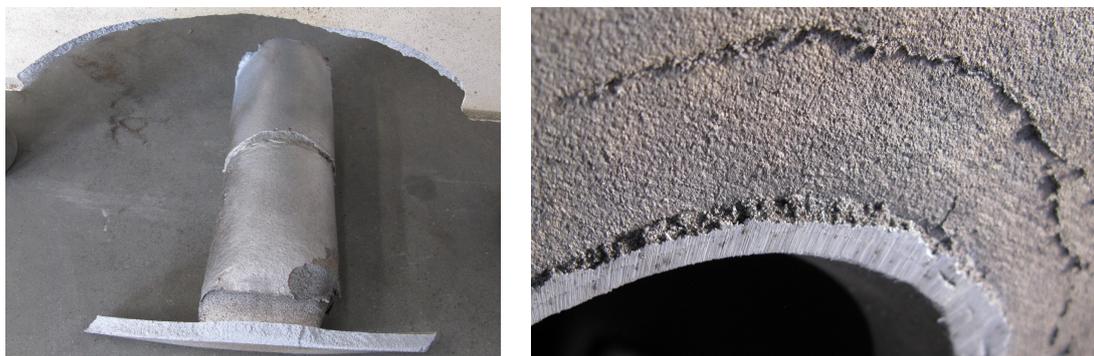
fatta la scelta di adottare la classificazione morfologica. Dunque quello utilizzato per lo schema di dati proposto più avanti in questo lavoro è il sistema di classificazione proposto da NADCA (North America Die Casting Association) e da AFS (American Foundrymen's Society), basato sulla descrizione fisica del difetto considerandone la sola morfologia. Secondo questa classificazione i difetti sono raggruppati in quattro livelli. Ciascun elemento facente parte di un determinato sottogruppo rappresenta uno specifico difetto che viene individuato con un codice a tre cifre, preceduto dalla lettera che ne indica la categoria. Tutti i difetti sono suddivisi in 7 categorie di primo livello. Anche Cocks [15] suggerisce di suddividere le difettosità dei getti in lega di alluminio in due categorie morfologiche: difetti interni e difetti superficiali. Alla prima categoria appartengono i difetti che incidono di più sulla qualità del getto meccanico, cioè il difetto interno, che compromette le capacità strutturali del prodotto. Alla seconda categoria appartengono quelle difettosità rilevabili sulle superfici dei getti, i cui effetti si ripercuotono sia sull'aspetto estetico che funzionale del pezzo, ad esempio nel caso dei settori che richiedono elevate finiture superficiali come per lo stampaggio di materie plastiche in cui stampi sono soggetti a sola lucidatura. Il sistema di classificazione adottato da NADCA identifica sette categorie, all'interno delle quali sono definiti 3 livelli ulteriori di classificazione. I sette gruppi principali sono:

1. Proiezioni metalliche
2. Cavità
3. Discontinuità
4. Difetti superficiali
5. Getti incompleti
6. Dimensioni o forma non corretti
7. Inclusioni o anomalie strutturali

Ogni categoria è poi suddivisa in tipo di difetto, famiglia e nome del difetto.

Si fa notare fin da ora come ogni difetto sia classificato in base ad una lettera e tre numeri; questo infatti consente di collocare immediatamente il difetto all'interno della struttura. Inoltre più la specificazione aumenta, più si possono incontrare analogie con altre famiglie di difetti e cause comuni; in questo senso una causa scatenante potrebbe anche avere molteplici effetti sovrapposti.

Inoltre si è sentita l'esigenza di estendere alcune classificazioni e di crearne altre, in funzione del presentarsi di difetti che non erano stati contemplati per la diversità del processo in conchiglia con quello in sabbia. Infatti la trattazione del micro e macro ritiro è forse troppo generica e forse serve una distinzione ancora più fine per la fonderia in sabbia. Le tecniche di *lost-foam* e la presenza di inserti nei getti realizzati in sabbia sono ad esempio quasi del tutto inesistenti in colata a conchiglia.



(a) Rottura dovuta all'insufficiente spessore dell'attacco della materozza. Tipo E221

(b) Sporgenza metallica per rottura della forma dovuta al campo termico attorno all'anima. Il tipo è A112

Figura 1.13 – Difetti in fonderia di alluminio

1.4.2 Difetti tipici della fonderia in sabbia

In questo paragrafo esamineremo in breve solamente i difetti che hanno causa scatenante in fonderia e non quelli che hanno origine durante le fasi di lavorazione successiva, come l'asportazione di truciolo o il trattamento termico.

Rotture

Le rotture possono essere di due tipi, a caldo e a freddo.

Le rotture a caldo (*Hot Tearing*) sono dovute alle deformazioni introdotte a seguito della riduzione termica di volume. Tali deformazioni nascono dall'impossibilità del getto di ritirarsi, poiché circondato generalmente da materiali con diverse curve di dilatazione termica, come ad esempio la sabbia silicea, e generalmente si verifica sulle prime parti a solidificare se la contrazione è impedita dalla forma e sulle ultime se impedita delle parti già fredde del getto stesso. Le cause generalmente sono dipendenti dal tipo di formatura e dalla geometria del getto, anche se vi sono rotture dovute all'errata composizione della lega o dei prodotti affinanti o modificanti che causa un ritiro diverso da quello previsto, con una esagerata accentuazione delle tensioni interne al getto. Le soluzioni per questa classe di rotture possono essere diverse, dalla variazione dei parametri relativi ai leganti delle sabbie per permettere il cedimento della forma o della rugosità della superficie dello stampo, alla modifica della geometria del pezzo per uniformare e/o rallentare le velocità di raffreddamento (non solo del pezzo, ma si può anche variare la distribuzione del campo termico spostando raffreddatori, attacchi e materozze), alla aggiunta o modifica di strutture rinforzanti da tagliare a pezzo freddo; si possono prevedere delle rotture di sicurezza sia sul pezzo che sulla forma, in modo da permettere il ritiro senza sforzi da deformazione. Generalmente le rotture a caldo si distinguono per la presenza di film ossidato sulla superficie.

La rottura meccanica a freddo dei getti può avvenire durante le fasi di distaffatura e



(a) Sporgenza metallica dovuto a cattivo accoppiamento tra forma superiore ed inferiore

(b) Gioco eccessivo tra la forma e l'anima che ricava il foro nel getto

Figura 1.14 – Sporgenze metalliche per cattivi accoppiamenti. Tipo A111 secondo NADCA

taglio. Si possono produrre rotture impreviste o in posizioni indesiderate per varie cause; oltre a quelle accidentali dovute a movimentazione e packaging, possono essere causa di rottura la cattiva progettazione (forma e posizione) delle gole delle materozze e degli attacchi di colata, che tendono a rompersi in punti diversi da quelli previsti. In fig. 1.13 a sinistra è chiaramente visibile la frattura a causa della movimentazione che forzando la materozza ha provocato una rottura sulla sezione sottile alla quale era connesso il carico. Spesso e volentieri si confonde nella pratica di fonderia le cause di rottura. Tipico è l'esempio in cui la movimentazione o la distaffatura causa fratture con frequenza elevata: l'errore non ha più origine generalmente in produzione, per merito di addetti disattenti e svogliati, ma in fase di progettazione. In quella sede, infatti, è necessario prevedere una certa resistenza del getto con uno studio delle parti deboli che facilmente possono rovinarsi. L'utilizzo di ingrossi o di inviti alla frattura sono i rimedi più utilizzati per permettere una movimentazione consona alla dimensione, al peso e all'ambiente di fonderia. Rotture prima della distaffatura sono causate generalmente da inadeguata rigidità delle forme o da disomogeneità di caratteristiche tra forme ed anime, sia per diverse regolazioni della composizione dei leganti, sia per diverse proprietà termiche.

Sporgenze metalliche

Le sporgenze metalliche in genere denotano la rottura della forma di sabbia o l'errato accoppiamento tra le staffe o tra anima e forma. La genesi dei due difetti è differente. Nel primo caso la presenza di sporgenze non è in corrispondenza degli accoppiamenti fra le varie parti che costituiscono la forma e sono generalmente di forma irregolare. Le cause possono essere molto diverse, come l'eccessivo surriscaldamento della forma o la presenza di umidità. Si può avere una eccessiva pressione metallostatica o una scarsa capacità legante della forma. Oppure una movimentazione con troppi scossoni. In figura fig. 1.13 a destra si possono notare delle sporgenze dovute alla rottura della forma, che formando delle cricche ha permesso all'alluminio di penetrarvi e formare le bave positive chiaramente localizzate attorno ad un'anima. Probabilmente l'eccessivo carico termico sull'anima ha



(a) Rottura della forma superiore: il liquido è penetrato nella cricca della sabbia sollevando i frammenti al di sopra, per una pressione di serraggio eccessiva su alcuni elementi di supporto interni alla forma di sabbia. Il difetto è classificabile con A221



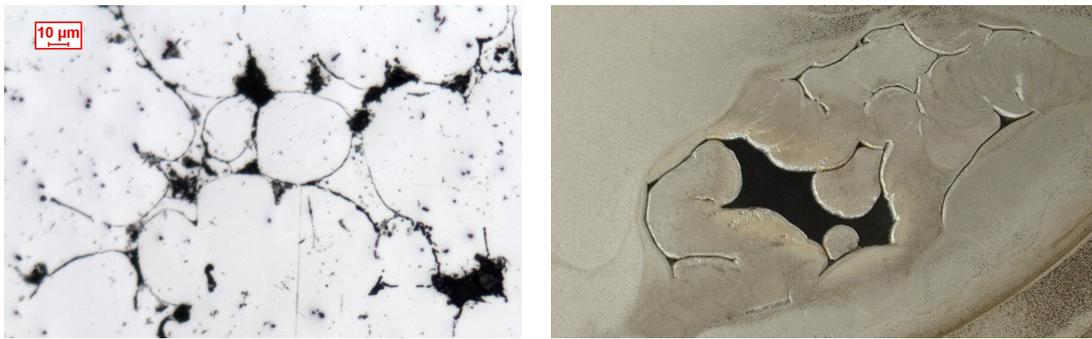
(b) Rottura del modello lost foam a causa della pressione della sabbia in formatura. Questo difetto non è classificabile secondo Nadca, in quanto la sua classificazione è più adatta alla colata in conchiglia

Figura 1.15 – Sporgenze metalliche per rottura della forma. Tipo A111 secondo NADCA

espanso la portata che ha condotto alla cricca le zone attorno. In fig. 1.14 a sinistra si vede una sporgenza che è causata da un cattivo accoppiamento tra forma superiore ed inferiore, mentre a destra per il gioco eccessivo che ha l'anima sulle sue portate.

Il problema vero di questo tipo di difetti non è la presenza della bava positiva sul getto, che si può facilmente eliminare, ma la presenza di porzioni di forma non semplicemente ciccate ma rotte e completamente separate dal resto della forma. Questo causa vuoti di riempimento nel getto che sono identificabili da protuberanze ruvide (sulle quali si denota rapidamente il negativo di frattura della sabbia). In fig. 1.15 a sinistra è stato fotografato un getto scarto a causa della frammentazione della forma in più pezzi, che galleggiando sull'alluminio liquido permettono la creazione di uno spessore tra le superfici di frattura.

Altre cause sono individuabili nella fase di ramolaggio, dove l'interferenza non corretta in fase di montaggio della forma può causare rime da strisciamento o carichi concentrati nella forma. Le cause possono infine anche imputarsi a rotture del modello in fase di formatura a causa della pressione della sabbia, caso tipico del processo Lost Foam, come si vede chiaramente dalla fotografia in fig. 1.15 a destra. La classificazione utilizzata in questi casi non è sufficiente, poiché in origine la NADCA ha catalogato i difetti della colata in conchiglia. Questo è uno dei casi in cui si potrebbe benissimo aggiungere una categoria, estendendo la classificazione alla fonderia in sabbia. Per quanto riguarda i difetti che originano dall'imperfetto accoppiamento delle parti della forma, l'entità del danno è correlata alla diversa geometria che il getto può avere rispetto alle specifiche. Infatti lo scostamento dei componenti della forma dal disegno può essere tale da presentare zone del getto che sono sotto ai profili di lavorazione meccanica. Se invece il getto presenta solo delle sporgenze ed è ugualmente lavorabile il difetto non ha particolari conseguenze. Il cattivo accoppiamento oltre a generare luci non desiderate provoca anche fratture, nel caso vi siano interferenze non rilevate in fase di montaggio della forma, soprattutto sulle



(a) Inclusione di un film d'ossido: G142. Probabilmente è il risultato di un flusso non laminare con intrappolamento del film protettivo in colata

(b) Discontinuità causata da colata fredda. Il riferimento NADCA è C311

Figura 1.16 – Ossidi e colata fredda

portate d'anima.

Macro e microsegregazione

La segregazione degli elementi interstiziali avviene tipicamente nell'acciaio con la segregazione del carbonio in fase austenitica e poi ferritica, nel alluminio con la segregazione del silicio. Tipicamente esistono due ordini di grandezza: se il gradiente di concentrazione chimica percorre tutto il getto dai raffreddatori alle materozze oppure se percorre solamente la lunghezza della dendrite di solidificazione.

La macrosegregazione può dipendere da cattiva progettazione dei flussi termici (sia per geometria che per conduttività dei materiali isolanti), presenza di punti caldi, flussi turbolenti o uso esagerato delle polveri esotermiche, reazioni esotermiche impreviste delle anime.

La microsegregazione può dipendere da accrescimenti eccessivi del grano dovuti a surriscaldamento o a colate con temperature elevate.

Inclusioni

Sono difetti causati dalla presenza di parti estranee al getto che vengono inglobate durante la colata. Specialmente se non metalliche sono pericolose, in quanto comportano un aumento dello sforzo locale a causa della elevato modulo elastico che generalmente presentano le inclusioni. Possono essere di vario tipo, classificate in endogene o esogene. Quelle endogene originano dalla presenza in bagno di impurità, dagli ossidi, ai prodotti di lavorazione della lega. Un esempio di inclusione endogena è in fig. 1.16 a sinistra dove è chiaramente visibile un film d'ossido intrappolato. Probabilmente le alte velocità di colata hanno rotto il film protettivo del bagno che è stato inglobato in modo turbolento.

Quelle esogene generalmente sono particelle di sabbia o argilla provenienti dalla forma, che



(a) Rima di colata fredda

(b) Rat Tail causata da espansione della forma: D131

Figura 1.17 – Discontinuità e sporgenza

per erosione o per frattura si trovano più o meno finemente disperse nel getto. Possono essere causate da parecchi tipi di difetti di processo, quali lo schiacciamento di parti della forma in fase di chiusura staffe o di ramolaggio, l'errato calcolo della dilatazione termica della forma, errati accoppiamenti fra forme ed anime, errata combinazione delle resine indurenti che provoca ammorbidimenti o indurimenti localizzati, errata progettazione del getto o dei canali di colata a cui conseguono alte velocità del fluido, eccessive temperature di colata, spillatura non adeguatamente controllata. . .

Discontinuità superficiali (negative)

Le discontinuità superficiali sono intese all'opposto delle sporgenze: sono solchi che attraversano la faccia del getto ma possono però estendersi all'interno (come nel caso di giunti freddi).

Le linee che tipicamente si scorgono in fonderia sono causate da colata fredda, e possono essere interessate le zone che sono le ultime riempirsi o che sono a contatto con inserti metallici o raffreddatori. Nella fig. 1.16 a destra e fig. 1.17 a sinistra si possono vedere i segni di giunzione di una colata fredda, che può dipendere anche da un cattivo sistema di colata. Per rimediare a questo difetto si può innalzare la temperatura di colata, aumentare la fluidità della lega o la velocità di colata (che può comportare anche un aumento della sezione degli sfiati, caso abbastanza raro nelle fonderia a formatura manuale per la grande dimensione delle sezioni delle materozze). Ovviamente un'altra causa comune di questi difetti è l'interruzione di colata. Da osservare che il fenomeno delle gocce fredde non è però generato dalla temperatura troppo bassa di colata, ma da un flusso irregolare e turbolento che provoca schizzi le cui goccioline sopravanzano il fronte di colata e si raffreddano immediatamente al contatto della forma, per poi non essere riassorbite dal flusso liquido che arriverà subito dopo; inoltre anche il distacco di porzioni di alluminio già solidificati

possono creare questo fenomeno. Spesso tali gocce sono anche superficialmente ossidate. Il flusso di colata è infatti sempre rivestito da un film ossidato che lo confina e lo protegge. Il distacco di gocce è imprescindibile dal distacco di porzioni ossidate di pelle; per questo incontrano quindi anche difficoltà ad essere riassorbite.

L'eccessiva dilatazione della forma o dei raffreddatori provoca la frattura della sabbia e l'accrescimento di quest'ultima sulla rima in modo simmetrico da entrambe le bande. Tale rottura può anche essere provocata dall'uso di vernici che indeboliscono i leganti della forma. In tal caso i solchi hanno una sezione abbastanza simmetrica. Diversamente, il caso delle *Rat Tail* (code di topo fotografate in fig. 1.17 a destra) indica un'evaporazione dei primi strati di sabbia al di sotto della superficie a causa del calore eccessivo vicino ad attacchi di colata. Tale evaporazione indebolisce la sabbia e provoca la disgregazione in maniera non geometrica e definita come invece consegue da una dilatazione della forma. Simile la geometria della sabbia in acque solcate da onde.

Altro difetto più che altro estetico per getti lucidati è la presenza di linee di flusso del riempimento, di solito superficiali, causata dall'ossidazione superficiale dell'alluminio liquido. Per eliminarle si può abbassare la temperatura di colata, aumentare il preriscaldamento della forma o addirittura inclinarla (ovviamente difficilmente attuabile quest'ultima strategia nel caso di formature manuali).

La rugosità eccessiva rispetto a quella di formatura può derivare dalla errata composizione dei leganti della sabbia che provoca il suo indebolimento, dall'eccessiva pressione metallostatica. Di solito è accompagnata da fenomeni di erosione vera e propria, con inclusioni silicee nelle vicinanze. L'erosione in modo simile è generata dall'elevato carico termico ma anche dall'elevata velocità del metallo liquido, che asporta nei punti dove è più veloce degli strati di sabbia disgregandola e inglobandone le particelle.

Le discontinuità di questo tipo sono, come già detto per le sporgenze, irrilevanti se non hanno effetti sulle lavorazioni successive. Nel caso di lavorazioni meccaniche la profondità non deve eccedere il sovrametallo. Critico invece è questo difetto nei getti ad elevata finitura superficiale soggetti solo all'operazione di lucidatura. Infatti non tutte le superfici sono lavorate, poiché il processo in sabbia-resina permette un'eccezionale riproduzione della geometria del modello, inclusa la finitura superficiale, che è regolata esclusivamente dalla dimensione dei grani di sabbia (e che quindi in linea teorica non ha limite).

Dimensionamenti errati e distorsioni

Per dimensionamento non corretto si intende una variazione delle dimensioni risultanti del getto rispetto alle specifiche. Il caso più semplice è un getto più piccolo lungo tutte le dimensioni del desiderato, causato da una contrazione termica dopo la solidificazione mal calcolata.

Altro caso è quello in cui si riscontrano misure errate solo su una o due dimensioni. Questo significa che la contrazione è stata bloccata senza però arrivare ad una frattura a caldo. Per prevenire questi difetti è necessario prevedere la possibilità di contrazione, ammorbi-



(a) Spesso per evidenziare questo tipo di difetti è necessario sabbiare o lavorare per asportazione di truciolo, poichè la pelle integra resiste alla pressione atmosferica comprendo il vuoto senza deformarsi. B311 secondo NDCA

(b) Microritiri dovuti alla materozza non correttamente dimensionata sul lato opposto a quello visibile

Figura 1.18 – Ritiri e microritiri

dendo la forma o prevedendo la sua facile frattura. Altro caso è la distorsione provocata direttamente dal modello o dalla cassa d'anima, deformato o a causa dell'elevato carico in formatura o dalla distorsione provocata dalla sua vecchiaia, mal realizzato o mal progettato. Linee non parallele, rotazioni, spostamenti di solito sono provocati da una centratura del modello non adeguata, da una chiusura approssimativa delle semiforme con la creazione di spessori o dal danneggiamento delle olive di centraggio. Le stesse considerazioni si possono fare per le anime e la loro formatura a partire dalla cassa d'anima. Ancora, la causa può essere provocata da espansioni o contrazione della forma o da una formatura non completa.

Tutte le cause sopraesposte possono portare a distorsioni del getto, ma generalmente per distorsione si intende una deformazione del getto dopo la sterratura. Le tensioni residue possono portare ad una deformazione più o meno pesante, a seconda della geometria del getto ma anche del sistema di colata e di caricamento. Il campo termico, il ritiro al raffreddamento e dunque le tensioni residue che causano le deformazioni sono intimamente legati, quindi una buona progettazione della geometria del getto volta ad impedirne eccessive deformazioni deve tenere conto anche degli stress introdotti dai campi termici degli attacchi, delle materozze e dei raffreddatori.

Porosità

La porosità si distingue principalmente per le dimensioni dei vuoti, che possono essere dell'ordine dei micron oppure molto più grandi e visibili, e per le due cause scatenanti, individuabili nel ritiro incontrollato della lega o nel gas intrappolato. La porosità è negativa per tutte le proprietà meccaniche ed anche per la finitura superficiale. Per le porosità da gas si può generalmente sostenere che i vuoti siano di forma sferica e che i gas possano derivare dalla lega (idrogeno nel caso di leghe d'alluminio), dalla forma (come vaporizzazione di leganti o umidità) o da inclusioni in fase di colata (che generalmente presentano dimensioni assai superiori agli altri casi). L'individuazione delle cause passa dunque attraverso un'analisi della morfologie, della distribuzione dei vuoti e dall'analisi chimica (ad esempio l'inclusione di particelle di scoria comporta anche la presenza di vuoti). Se per esempio si trovano porosità sferiche con una densità superiore nei pressi di un'anima è logico pensare all'evaporazione dei leganti di formatura dell'anima o se si trovano presso le superfici si può pensare alla presenza di umidità nella forma o a evaporazione dei leganti delle vernici. Ancora, se le porosità sono presenti vicino ai raffreddatori si può ipotizzare porosità da idrogeno a cause della condensa atmosferica che si può avere su componenti metalliche della forma.

Per l'eliminazione di questi difetti le strategie sono innumerevoli. A seconda dell'origine si può prevedere un processo migliore di degasaggio in forno o in siviera, il preriscaldamento prolungato di tutte le attrezzature a contatto con il bagno (da schiumarole, a crogioli, a siviere fino al preriscaldamento della forma stessa), la realizzazione di canali di sfogo gas nelle forme, l'aumento della pressione metallostatica, abbassare la temperatura di colata di lastre o barre, cambiare i leganti o le vernici, individuare ed eliminare possibili reazioni esotermiche.

Le microporosità da ritiro si formano nelle piccole zone interdendritiche. Quest'ultimo fenomeno si indebolisce utilizzando processi sotto vuoto o in gas inerte oppure aggiungendo deossidanti, stampi ad alta conducibilità termica o con la tecnica Hot Isostatic Pressing. L'origine è imputabile ad un'esagerata modifica (alcuni elementi affinanti o modificanti possono inoltre variare le morfologie delle cavità, raggruppandole o disperdendole) oppure ad un carico termico sbagliato. Nella fig. 1.18 è chiaramente visibile la notevole dispersione del ritiro che sicuramente è accompagnata da una notevole presenza di porosità microscopiche. Anche in fig. 1.18 a destra è chiaramente visibile la presenza di porosità da ritiro interdendritico dovuta alla cattiva direzionalità del campo termico che provoca delle zone o dei punti caldi.

In genere i microritiri si formano in zone dove vi sono campi termici simili punto per punto e con velocità di raffreddamento basse. Per ovviare è necessario aumentare o la velocità di raffreddamento o, meglio, il carico termico, per direzionarlo e differenziarlo in modo migliore. Ad esempio al centro dei getti, dove le temperature sono uniformi e la solidificazione lenta, le dendriti possono essere molto lunghe e quindi al centro del lingotto troveremo porosità; allo stesso modo nelle zone più massicce (come al centro di sezioni a T o sugli spigoli vivi degli angoli, o sulla linea mediana di lastre, barre, costole e rinforzi).

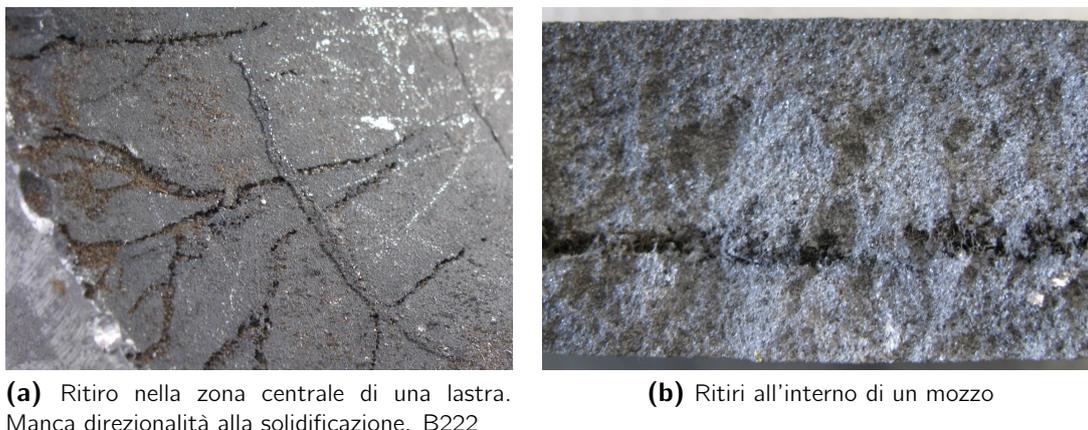


Figura 1.19 – Ritiri: a volte sono visibili a volte no

Da tenere presente che si possono confondere con dei ritiri (o comunque attribuire le cause del difetto solamente a problematiche di ritiro in solidificazione) le zone di spigolo vivo che hanno più facilità a sfogare i gas della forma; oltre ad avere ritiro infatti può passare inosservato il fatto che in tali zone si possano sfogare gas nelle zone ancora sotto lo stato liquido.

Ritiri e cavità

I ritiri generalmente si trovano in punti dove per ragioni geometriche o per ragioni chimiche la temperatura rimane elevata. Ad esempio sugli spigoli vivi del getto è facile trovare ritiri, in quanto tale geometria nei pressi dell'angolo porta ad un accumulo del calore e dunque ad un ritardo della solidificazione. La macroporosità generalmente si rileva nelle parti del getto che solidificano per ultime senza che venga loro fornito liquido di alimentazione. Per ovviare all'inconveniente si utilizzano delle tecniche di controllo del flusso termico, come il posizionamento di raffreddatori e di materozze riscaldate. Da notare che i ritiri generalmente non sono accompagnati da cavità, ma possono essere denotati da depressioni superficiali al di sopra dei punti caldi. In fig. 1.19 a sinistra è visibile una zona centrale di un getto che ha ritirato a causa di una insufficiente pressione metallostatica, ma più probabilmente da un'insufficiente direzionalità della solidificazione. In fig. 1.19 a destra è infine visibile un altro esempio di ritiro; non essendo ancora lavorato il ritiro è visibile perché la pelle non ha resistito alla pressione atmosferica e ha chiuso il vuoto sottoastante portando subito alla luce il difetto.

Le cavità se non sono generate dai ritiri sono causate dalla presenza di materiale di formatura incluso nella sabbia. È evidente dunque che più è direzionale la solidificazione migliore sarà il risultato sia sotto l'aspetto porosità che sotto l'aspetto dei ritiri. Ma questa è una chimera, in quanto si tratta sempre di un compromesso, poiché è evidente che più la soli-

dificazione è direzionale, più il getto è soggetto a tensioni residue, quindi rotture a caldo e a freddo, distorsioni e tensioni residue. Un bilanciamento, che è frutto del compromesso che soddisfa sia le esigenze dimensionali che quelle di porosità, è inevitabile ed il getto senza microritiri e senza leggere deformazioni è impossibile da realizzare. Quello che si può fare per rimediare ad eventuali difetti è lo spostamento verso uno o l'altro stato di campo termico, progettato in sede di ingegnerizzazione del disegno del cliente, a seconda delle tolleranze dimensionali e del carico di rottura e dell'allungamento minimo richiesto.

Altro

Difetti di varia natura non classificati possono presentarsi. Ad esempio può capitare che la forma perda liquido dai piani di divisione, con il risultato di un riempimento parziale e di una bagnatura della forma, con la formazione di un getto cavo.

Inoltre errori di vario tipo effettuati in formatura, come l'inadeguatezza dei tempi di attesa per l'estrazione del modello (troppo lunghi o troppo brevi), causano la perdita o il danneggiamento della forma o del getto. Anche in ramolaggio possono verificarsi operazioni non adeguate, come l'eccessiva pulizia che provoca un ispessimento del getto, oppure un posizionamento errato dei canali (nei casi in cui il sistema di colata sia da ricavare non da modello ma da portafiltri standard ed operazioni di tracciatura del canale).

La qualità

2.1 Che cos'è la qualità

2.1.1 Cenni storici

All'inizio del 1900 si cominciò a considerare l'importanza della qualità in relazione alle esigenze del mercato con la creazione di strumenti statistici, utilizzati con largo impiego nella produzione bellica; questo cambiamento culturale nella produzione industriale culminò negli anni del dopoguerra con un approccio al problema della qualità diretto alla realizzazione di un prodotto esente da difetti entro certi limiti. Soprattutto sotto la spinta dell'industria militare statunitense, che creò le prime norme per la gestione dei controlli, vennero creati standard organizzativi per l'assicurazione della conformità del prodotto ai requisiti adottati in seguito da molte imprese in tutto il mondo.

L'assicurazione della qualità cominciò ad estendere il suo campo d'azione, cominciando ad essere presente in tutte le fasi produttive ed anche in tutte le attività di supporto: venne esteso il controllo a tutte le componenti del processo produttivo ed oltre, con la verifica dei fornitori e con la qualificazione del personale. Da non dimenticare il successo dell'industria giapponese, che con la leva strategica della qualità industriale fece passi da gigante nella seconda metà del secolo scorso.

Il risultato di un approccio al problema della qualità sempre più ampio e generalizzato porta alla metodologia odierna per l'assicurazione qualità, che non si limita a porre dei requisiti sull'organizzazione ma ne formalizza la struttura.

2.1.2 Le norme ISO

Generalità

L'ISO (International Organization for Standardization) è una organizzazione non governativa che ha lo scopo di migliorare i costi della produzione, la commerciabilità, la compatibilità ambientale, la sicurezza di prodotti, i processi e i servizi per promuovere lo sviluppo degli scambi nei mercati e dell'economia globale. Le norme ISO 9000 si occupano di organizzazione aziendale e la loro finalità è promuovere la fiducia nel rapporto fornitore/cliente tramite l'identificazione di metodologie di lavoro. Nate in particolari settori -aeronautica, aerospaziale e nucleare - esse oggi hanno conquistato anche l'ambito dei servizi, privati e pubblici.

Le norme ISO 9000 vengono in aiuto con l'introduzione di due elementi nuovi: la misurazione e il miglioramento. La misurazione consiste nel raccogliere dati per confrontare i risultati attuali con quelli attesi o previsti ed è una delle chiavi portanti della nuova serie di norme (Vision2000). Il Sistema di Gestione per la Qualità ha infatti come riferimento gli obiettivi da perseguire, che dovranno essere sempre misurabili. La misurazione diventa quindi strumento fondamentale per dimostrare la validità del Sistema di Gestione e nel contempo anche l'anello di congiunzione fra l'azione e il miglioramento. Tale connessione si esplicherà tramite misurazioni condotte a più livelli (utile netto, utile operativo, indici di bilancio, Customer Satisfaction, reclami, garanzie, audit interni, indicatori di processo, disservizi, . . .) che saranno capaci di fornire ampi suggerimenti.

Le nuove edizioni del 2008 approfondiscono la parte di progettazione del prodotto, definendo più specificatamente gli standard organizzativi di questo processo.

L'approccio per processi

Tutte le norme che vengono attese nelle organizzazioni produttive ridefiniscono l'organizzazione come l'intreccio di processi a valore aggiunto, non più come risultato dello semplice svolgersi di funzioni aziendali. La conseguenza è la formalizzazione degli ingressi e delle uscite (che siano risorse materiali, lavoro degli addetti od informazioni necessarie) su più livelli, dalla scomposizione dell'attività produttiva in processi, sottoprocessi, procedure ed istruzioni, ognuno dei quali è studiato con lo stessa metodologia. La conseguenza dell'applicazione dell'approccio per processi porta a considerare tutti gli input e gli output del sistema produttivo, quindi anche le emissioni di sostanze o rifiuti, l'impatto sulle comunità locali e sulla comunità in generale, l'impatto dell'attività sull'addetto e su coloro che hanno un interesse per l'attività dell'impresa. Nel caso specifico del gruppo delle norme ISO, questo comporta un'uniformità organizzativa per tutti i processi aziendali con la conseguente integrazione dei metodi e degli strumenti di gestione delle attività. Le organizzazioni che hanno saputo comprendere l'enorme vantaggio derivante dal superamento dei limiti dell'organizzazione funzionale basata sui compiti sequenziali stanno trasformando le loro strutture funzionali in strutture che gestiscono i processi utilizzando le capacità gestionali in modo da seguire il work-flow end-to-end dai clienti ai fornitori attraverso la

catena interna/esterna della fornitura. Il controllo della qualità ha avuto anche per queste ragioni un'accresciuta capacità di analisi dei costi che influenza. In effetti il bilancio fra costi per la gestione della qualità ed i costi per il mancato controllo e correzione è sempre considerato valorizzando ove possibile tutti gli input e gli output del sistema di qualunque tipo, dall'acquisto di una nuova tecnologia alla valutazione di danno derivato da un possibile incidente.

Il miglioramento continuo e la misurabilità

Il fondamento sul quale la norma appoggia il concetto di miglioramento continuo è il ciclo di Deming; si tratta di una sequenza chiusa di comportamenti da attuare in quattro fasi: progettare, implementare, verificare ed acquisire come prassi. Tale metodo è valido per un processo qualsiasi, poiché per ogni attività si possono pensare questi quattro momenti. Il nocciolo è la possibilità di rilevazione.

Le norme impongono l'utilizzo di indicatori che rilevino il comportamento di un processo. Tali indicatori sono necessari per poter giudicare l'andamento delle attività e stabilire le azioni da intraprendere per migliorare. Ma tali indicatori devono essere S.M.A.R.T:

Specific: il sistema qualità deve essere in grado di fornire dei risultati chiari e direttamente correlati ad un solo obiettivo.

Measurable: il sistema di monitoraggio della qualità deve contenere degli indicatori che siano progettati per essere facilmente misurabili, definendo completamente la grandezza osservata e l'unità di misura adottata.

Achievable and Attributable: bisogna identificare bene l'obiettivo e lo scostamento atteso dallo stato corrente per prevedere quanto più possibile che l'obiettivo sia raggiungibile. Inoltre deve essere chiara la correlazione che esiste tra il cambiamento degli indicatori e la gamma di interventi effettuati. In altre parole deve essere chiaro il collegamento causa-effetto tra indicatori e interventi.

Relevant and Realistic (and Resources): gli indicatori devono raggiungere un incremento significativo e questi incrementi devono riflettere l'impostazione presa nella progettazione del sistema. Inoltre deve essere garantita la assegnazione delle risorse da impegnare nel sistema.

Time-bound, Timely, Trackable, and Targeted: gli incrementi di standard devono essere definiti nel tempo, ovvero con una scadenza, devono essere periodicamente verificati, le spese devono poter essere progressivamente tracciabili nel tempo e valutati complessivamente alla fine del periodo.

Più avanti (cfr 2.3.3) verranno dettagliati gli strumenti per impostare un'organizzazione che consolidi i propri standard ed agisca per aumentare le prestazioni.

2.1.3 I sistemi di qualità integrati ed il TQM

Costi e benefici di un sistema di gestione integrato

L'osservazione che più ha impatto nell'industria moderna sulle conseguenze monetarie del mancato controllo della qualità è stata fatta dai giapponesi: intervenire per correggere errori di prodotto ha un impatto crescente ritardando la loro scoperta e la loro risoluzione. Intervenire infatti in fasi successive implicherà agire su più fronti già impegnati e su attività consolidate in misura sempre maggiore; la tendenza più redditizia sarà quindi controllare efficacemente la produzione sin dalle prime attività di supporto (ad es. commerciale) che di preparazione alla produzione vera e propria (come la progettazione). Questo significa anche che un investimento per il controllo della qualità sarà più produttivo se impiegato nelle fasi iniziali dell'insieme delle attività piuttosto che in fondo, se impiegato per il controllo di processo piuttosto che per quello di prodotto.

Per ottenere alta qualità in uscita si intensificano dunque i controlli e si cerca di portarli a monte del processo produttivo. Si potrebbe dire quindi che più controlli si fanno e meno si generano costi per la non-qualità. In realtà se si considera solo il controllo come verifica di prodotto che esce da una fase si è semplicemente spostato il centro di costo della cattiva qualità dalla fase successiva al controllo a quella precedente. Distinguendo il costo esterno come costo scoperto dopo la vendita e quello interno come costo scoperto in produzione, l'effetto di maggiori investimenti trasforma il costo esterno in costo interno. La somma dei due come già detto sopra cala comunque.

Se il controllo è invece uno strumento per ottenere informazioni allo scopo di utilizzarle per non ottenere più quella non-conformità l'approccio cambia, perché semplicemente non sposta la scoperta del difetto all'interno dell'azienda e nelle prime fasi della produzione, ma tenta di eliminare la produzione di difetti e non solo eliminarne la presenza a valle dei processi e proteggere il cliente finale. Il miglioramento continuo descritto nella serie ISO ha lo scopo di produrre questo cambiamento nella gestione aziendale della qualità, ovvero il diminuire dei suoi costi nel tempo. Quando esiste dunque un approccio integrato all'interno del quale il controllo qualità è inserito diminuiscono i costi più velocemente del risparmio che dà un piano qualità non integrato o non sfruttato per lo studio della prevenzione del difetto. In fig. 2.1 si raffigurano gli andamenti dei vari costi del controllo e della qualità [1].

Un secondo passo per la diminuzione dei costi viene suggerito dall'approccio gestionale della produzione snella. La qualità del prodotto è garantita dalla qualità del processo, quindi se il processo è sufficientemente buono il controllo di prodotto darà sempre risultati negativi. Risulta quindi un costo superfluo quello del controllo, che deve essere eliminato raggiungendo un'elevata qualità di processo. Nel caso di una fonderia è molto difficile avere un controllo del processo così efficace come in altri settori produttivi, quindi non sarà possibile togliere la fase del controllo di prodotto. Sarà però possibile evitare una parte dei controlli, tramite il raggiungimento della stabilità di una parte del processo.

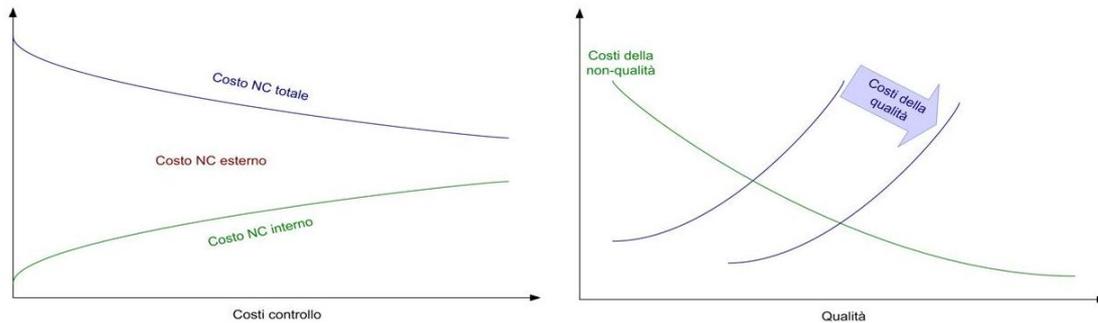


Figura 2.1 – Andamento dei costi interni ed esterni al variare degli investimenti per il controllo qualità a sinistra. Effetto dello spostamento della curva dei costi per la presenza di un sistema di gestione a destra.

2.1.4 La strutturazione dei documenti

Lo scopo della documentazione

La documentazione del sistema qualità ha lo scopo di trasmettere alle varie funzioni coinvolte il metodo da seguire per la gestione delle attività. Tale organizzazione del lavoro induce a formalizzare lo stato dell'arte dei processi in modo da registrare le condizioni di massima efficienza e poterle ripetere senza errori o variazioni. Inoltre la documentazione permette il controllo del processo. Come già spiegato altrove la registrazione degli output e degli input dei processi può permettere la comprensione della "funzione di trasformazione" e quindi il controllo della variabilità tramite la variabilità degli input. Inoltre la definizione di standard diminuisce la necessità di comunicazione ed il costo di gestione delle informazioni. Inoltre tramite la documentazione si cerca di spingere l'organizzazione verso una comunicazione basata di più su dati di fatto; l'oggettività delle misure è un requisito fondamentale per l'analisi delle problematiche che emergono nelle organizzazioni.

I livelli della documentazione

La documentazione di un sistema qualità è strutturata secondo una logica gerarchica che definisce scendendo di livello sempre di più in modo dettagliato le attività. La struttura è piramidale, progressivamente cominciando dalle registrazioni e dai moduli per arrivare ai documenti riassuntivi e strategici come il Manuale della qualità o la politica aziendale. L'articolazione in aree e sottoaree si può classificare secondo queste categorie:

Governo: comprende la politica e gli obiettivi, la pianificazione e le risorse.

Azione: descrive e formalizza le macroattività ed i processi in procedure, con attenzione crescente a seconda del valore aggiunto che viene conferito al prodotto/servizio.

Controllo: sistemi informativi, registrazioni, audit, gestione delle NC, costi della qualità, sistemi di indicatori, reporting, tecniche statistiche,...

Supporto: formazione ed informazione, addestramento, studi, prevenzione e *benchmarking*.

2.1.5 Dal controllo di prodotto al controllo di processo

Lo scopo principale di un sistema qualità è la riduzione dei costi di scarto e di immagine, tramite l'eliminazione dei prodotti non conformi. Secondariamente generalmente l'introduzione dei sistemi qualità dovrebbe portare ad un'analisi dei processi per l'ottimizzazione e la riduzione dei costi normali di gestione tramite l'aumento dell'efficacia e dell'efficienza delle attività. Per poter conseguire una buona qualità e diminuire i costi è essenziale stabilizzare i processi ed individuare quei limiti oltre i quali il prodotto risulterà difforme dal requisito. Questo perché si deve sempre tentare di diminuire la quantità di controlli diretti sui prodotti ed aumentare la capacità di controllo del processo al variare degli ingressi. Spesso si intende che la qualità sia massima per un accurato controllo sul prodotto. Se questo è sicuramente falso per realtà produttive che producono MTS (Make to stock) poiché il controllo totale sul prodotto è costosissimo e tramite campionatura ci si assicura delle condizioni di processo, può altresì non essere così certo per aziende che producono ETO (Engineering to Order), come le fonderie che producono al più piccoli lotti di medie dimensioni. Bisogna sempre tener presente però che il principio può applicarsi comunque a certi processi presenti in fonderia, in funzione della ripetibilità e della scala.

I passi per compiere il salto di controllo sono brevemente qui sintetizzati.

Portare all'interno l'individuazione

Il difetto è generalmente individuato in due posti: all'interno della fonderia ed all'esterno. Il danno maggiore è evidentemente inflitto all'organizzazione quando il difetto è individuato all'esterno, poiché compaiono anche i costi di immagine (ed i costi logistici). Per eliminare definitivamente o quasi l'individuazione esterna è necessario alzare il livello della fase di collaudo e di controllo qualità alla fine del processo in modo da evitare in ogni caso la presenza presso il cliente di un prodotto difforme.

Portare a monte il controllo

Tanto più il difetto è individuato in ritardo, tanto più è fonte di danni. Questo perché se la NC non è individuata, su di essa si compieranno lavorazioni inutili, in quanto la presenza di difetto non può far altro che aumentare il danno inferto in seguito. Inoltre si ha la presenza di materiale riutilizzabile e di semilavorati con una gestione che peserà come costo sui prodotti buoni e che potrebbe danneggiare gli strumenti di lavoro delle fasi successive.

Eliminare il controllo qualità

Come ogni attività umana, il controllo qualità costa. Tanto più è intensivo e compiuto non a campione ma singolarmente, tanto maggiore sarà il costo per garantire al cliente un prodotto perfetto. Generalmente i passaggi nell'implementazione di un sistema qualità cominciano con l'aumento del controllo, ma arrivano all'eliminazione dello stesso a causa del costo eccessivo. Ciò che permette la riduzione della quantità e profondità del controllo è la capacità di conservare il processo produttivo sempre nello stesso stato, in modo che dia prodotti più possibilmente simili tra loro. Generalmente dunque si cerca di passare da un controllo di prodotto ad un controllo di processo. Il controllo di processo implica che si conoscano esattamente i risultati al variare delle condizioni e che si cerchi di mantenere tali condizioni immutate.

L'estensione della qualità a tutti i processi

L'estensione del concetto di controllo di processo porta facilmente a considerare la manutenzione come determinante per ottenere la stabilità desiderata. Ragionando allo stesso modo, si può però estendere la riduzione dei controlli agli output di tutti i processi in generale e cercare di mantenerli in condizioni conosciute e stabili. Controllare un processo non significa controllare il suo output. Significa invece controllare gli input per prevedere il comportamento degli output.

Il miglioramento continuo e la validazione dei processi

Gli strumenti per la gestione totale dei processi con logiche di qualità come quelle appena viste porta alla definizione di un'attività che restringa il controllo qualità ed aumenti il controllo di processo. Passo dopo passo (Kayzen) si cerca di:

1. interpretare il comportamento dei processi a seconda delle variabili,
2. stabilizzare o almeno prevedere l'output dei processi,
3. validare il controllo verificando l'assenza di prodotto non conforme,
4. ridurre ma mantenere comunque il controllo qualità sul prodotto.

Secondo le interpretazioni classiche il miglioramento continuo prevede anche dei balzi sugli standard attesi, quindi miglioramento sì, ma non continuo. Viene generalmente rilevato in corrispondenza di cambi di tecnologia di processo e di impianto, quindi è pianificato e gestito in modo strategico dalla direzione o dal responsabile di processo; proprio per questo quando accade ciò si deve ricominciare il ciclo di ampliamento-riduzione del controllo. A monte del "balzo" vi è dunque un'analisi preliminare di criticità, a cui segue un'azione preventiva.

2.2 Gli strumenti di controllo

Un processo è sotto controllo quando i suoi output sono all'interno di una classe di variabilità ampia a sufficienza per considerare le oscillazioni dovute a cause comuni. L'individuazione ed eliminazione di tutte le altre cause non ordinarie permette di guadagnare sul mancato controllo del prodotto. Le tecniche per comprendere il funzionamento di un processo, per stabilire le correlazioni tra cause ed effetti, per tentare il controllo del processo e per eliminare il controllo dell'output sono essenzialmente di carattere statistico.

2.2.1 Carte SPC

Il ruolo delle carte di controllo statistico è quello di fornire le indicazioni sul funzionamento di un processo in tempo reale, cioè l'analisi delle reazioni a variazioni parametriche, e la stabilità, cioè l'analisi storica della media e della varianza.

- media del processo
- variabilità dovute a cause reali
- variabilità per cause speciali

Generalmente su tali carte di controllo si possono vedere:

La media del processo sulle carte che la rappresentano statisticamente è di solito evidenziata. Tale linea è importante perché il controllo statistico può indicare variazioni che a occhio nudo possono non essere notate. Anche il cambio di variabilità del processo può essere difficile da notare. Inoltre a seconda della varianza del processo si possono identificare cause speciali quando una misura è superiore al multiplo della σ definita. Un processo si definisce stabile quando la variabilità degli output dipende solo dalla variabilità degli input. In questo caso se i parametri di ingresso rimangono inalterati la variabilità è causata da fattori comuni e dopo la normalizzazione l'andamento è normale. La stabilità di un processo è legata strettamente alla sua prevedibilità: infatti se è sotto controllo la media è costante e la variabilità è normale. Se il processo è invece instabile non è prevedibile.

Limiti di specifica e limiti di controllo: indici di processo

Il limite di specifica è il requisito del cliente, ovvero rappresenta ciò che si vuole ottenere dal processo. Il limite di controllo invece un'indicazione della capacità del processo di fornire risultati stabili. Tali limiti sono esclusivamente funzione del comportamento del processo e non sono legati a nessun requisito. Gli indici di processo misurano la capacità del processo di rispettare i requisiti; creano una relazione tra i limiti di specifica ed i limiti di controllo.

Process Capability C_P : è il rapporto che esiste tra le tolleranze ammesse a progetto e l'ampiezza effettiva di controllo del processo. Indica quanto è il margine tra la variabilità del processo ed i limiti imposti a progetto.

Process Capability Index C_{PK} : è la distanza che c'è tra la media del controllo di processo e la media stabilita dai requisiti. Indica quanto la media del processo è fuori centro rispetto allo standard richiesto.

$$C_P = \frac{USL - LSL}{2k\sigma} \quad (2.1)$$

$$C_{PK} = \text{Min} \left(\frac{USL - \bar{y}}{k\sigma}, \frac{\bar{y} - LSL}{k\sigma} \right) \quad (2.2)$$

Il parametro k rappresenta lo standard che il controllo di processo deve avere rispetto alla deviazione standard (che è la radice quadrata della varianza). Dipende dal tipo di standard di qualità atteso. Generalmente lo standard è di $k = 3$ che dà una percentuale di scarto pari a 0,27%. Se si utilizza $k = 6$ la percentuale di scarto è di 0,002 PPM. Questo valore è assurdo, ma è noto per essere il parametro di qualità principale per i sistemi organizzativi Six Sigma (probabilmente il termine ha semplicemente origine da propaganda commerciale); di solito nemmeno in questi sistemi questo dato è significativo, poiché si utilizza al massimo . Le teorie infatti riportano il valore di scarto pari a 3,4 PPM corrispondente proprio a $k = 4,5$ o ad una distribuzione spostata a sinistra di $1,5\sigma$.

Cause comuni e cause speciali

Le cause comuni sono quelle che influenza l'output del processo con una variabilità naturale e fanno parte normale del processo. Tramite l'analisi statistica si riesce quindi a predire anche quanta sia la variabilità attesa del processo. Le cause speciali sono invece raramente presenti nel processo e si verificano in modo sporadico, ma possono essere anche durature. Hanno normalmente un effetto evidente sul processo ma non sono prevedibili e rendono il processo instabile. In base alle evidenze di frequenza delle cause si possono intraprendere azioni correttive. Gli errori generalmente evidenziati sull'applicazione delle correzioni sono le azioni compiute con troppa reattività rispetto a quello che richiederebbe una gestione corretta del problema. Ad esempio quando la frequenza di dati non è alta si può ad esempio compiere l'errore di impostare dei limiti di progetto troppo stretti riferendosi solo all'andamento dell'ultimo tratto temporale. Infatti bisogna prima intervenire sulla struttura del processo e poi abbassare lo standard e non il viceversa. Dunque solamente l'evidenza di una causa speciale con dati rilevati in modo tempestivo può richiedere l'applicazione di azioni immediate. Ovviamente l'analisi delle cause e lo sviluppo di azioni a lungo termine (come specificato nella sezione delle non-conformità) è un presupposto imprescindibile per un buon sistema qualità. Inutile aggiungere anche che di solito l'analisi delle cause è più semplice della progettazione dell'azione efficace. Esistono dei test specifici per l'individuazione delle cause speciali. I più comuni sono:

- “common” Western Electric Rules insieme alla UPV (Unnatural Patterns of Variation),
- AIAG

- Nelson Rules
- Boeing AQS
- General Electric Six Sigma

Queste regole tengono in considerazione non solo le osservazioni il cui valore è all'esterno dei requisiti, ma anche le tendenze nascoste che statisticamente possono essere evidenti, ma nascoste all'occhio umano. Infatti il solo superamento dei limiti non è statisticamente sufficiente per evidenziare comportamenti anomali: ad esempio la alternanza consecutiva sopra e sotto la media, la presenza di successioni che non oltrepassano la media o dati che stanno sempre lontani dalla media sono tutti comportamenti anomali da identificare perché non sono distribuiti normalmente. Ogni volta che la statistica ci avverte che distribuzione non è normale occorre fare un'indagine per una causa speciale.

La normalizzazione

Molto spesso l'obiezione per le carte di controllo è che i dati non sono normali. In effetti è assai raro trovare in natura successioni normali e tali curve non sono adatte a rappresentare fenomeni fisici. Salta subito agli occhi come il dominio di una gaussiana sia $[-\infty, +\infty]$, mentre è difficile che una grandezza reale abbia tale variabilità, essendo generalmente vincolata in un campo di esistenza ben definito e limitato. È necessario quindi ricondurre le grandezze misurate in qualche modo ad una distribuzione normale. Esistono due tipi di trasformazioni numeriche che rendono i dati normali: Box-Cox e Johnson.

Una volta che i dati sono stati trasformati è possibile ottenere le variazioni standard e calcolarsi i limiti del controllo di processo con l'indicazione dei limiti ULS-LSL trasformati. Ottenuti questi valori è sempre utile tornare alla rappresentazione sulla carta di controllo non normalizzata trasformando all'inverso i limiti dai valori normali. In questo modo la rappresentazione del processo risulta molto più naturale e comprensibile. Nella figura fig. 2.2 si evidenzia il tipo di errore che si fa utilizzando dati e limiti non normali. A sinistra sono rappresentate le osservazioni così come sono state misurate con i limiti calcolati su di essi. A destra sono riportate le stesse osservazioni ma i limiti sono stati calcolati sui dati normalizzati. Calcolando i limiti sui dati reali si nota immediatamente che rispetto a quelli normalizzati i punti a causa speciale sono 3 invece di 2. Inoltre il processo sembra che possa variare molto, addirittura in maniera negativa (quando se si tratta evidentemente di tempo per cicli di lavoro tali valori non hanno senso fisico). Guardando invece i limiti riportati nel grafico calcolati sui dati normalizzati si nota che LCL sia superiore allo zero.

Tipi di dato e tipi di carte

I dati rilevabili sono di molti tipi diversi. Le misure possibili sono altrettanto varie, poiché possono essere scientifiche o soggettive, come ad esempio la misurazione di una lunghezza di un getto o la misura dell'aspetto estetico, ma anche la gravità del difetto od il costo

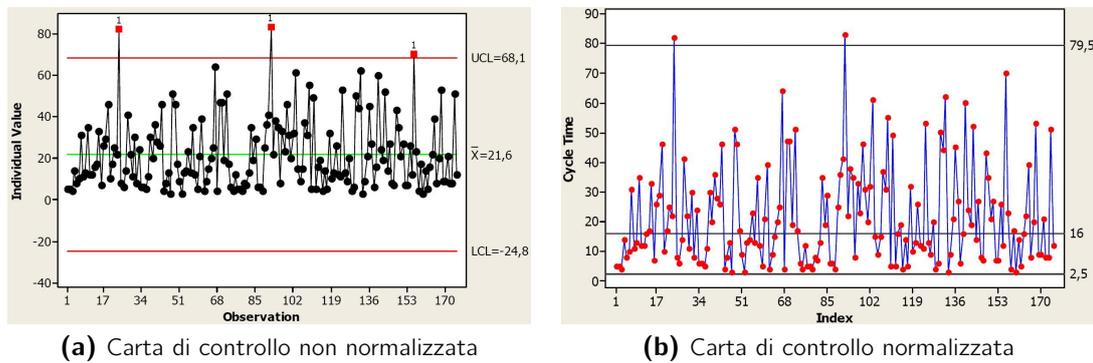


Figura 2.2 – Esempio di carte di controllo; entrambe riportano lo stesso set di dati

Tipo di dato	Azione	Distribuzione	Grandezze statistiche tipiche
Continuo	Misurazione di un valore	Normale	Media e deviazione
Discreto	Conteggi	Poisson	Difetti per unità
Attributo	Classificazioni	Binomiale	Percentuali

Tabella 2.1 – A seconda del tipo di dato, le origini, la distribuzione e le grandezze statistiche sono differenti

stimato dei danni. Ogni tipo di dato rilevato ha un suo comportamento che dipende dal fenomeno misurato e quindi le interpretazioni statistiche avranno leggi diverse, come elencato in tabella 2.1. A seconda del tipo di dato, le origini, la distribuzione e le grandezze statistiche sono differenti. I tipi di carta di controllo utilizzate dipendono dal tipo di dato. In figura fig. 2.3 i tipi di carta sono correlati al tipo di dato che raffigurano. Come limite inferiore affinché la statistica fornisca dati attendibili, la numerosità deve essere superiore a 30. Si possono anche tracciare dei limiti inferiori al controllo, che indicano la necessità di introduzione di un controllo più accurato; ad esempio se il nostro limite è $k = 3$ si possono introdurre le linee $k=2$ per segnalare la necessità di un'attenzione particolare da avere sul processo.

Carta p: rappresenta il numero di osservazioni fuori controllo fatte su un campione che può non essere costante.

Carta c: traccia il numero di difetti in un lotto controllato il cui campionamento deve essere costante; è utile quando vi sia da controllare un materiale con un flusso di produzione continuo, come potrebbe essere un rullo di tessuto o un cavo elettrico rivestito: in ogni caso avrà la difettosità da esprimere per una unità da definire (per es. difetti al mq, ecc.).

Carta u: segnala il numero di difetti per unità di controllo, che può essere variato.

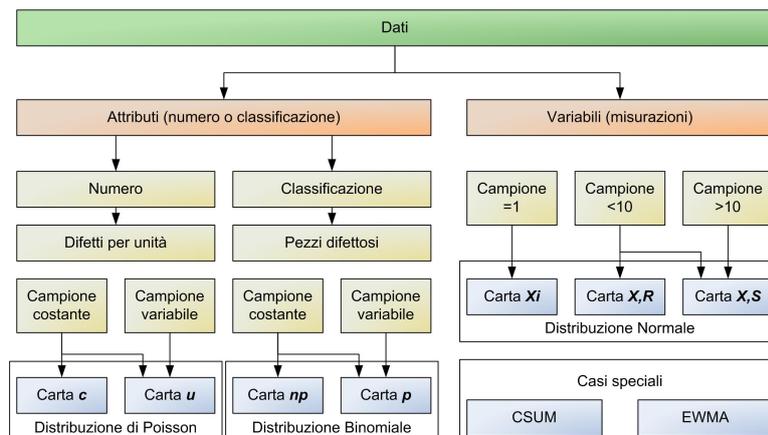


Figura 2.3 – Tipi di carta in funzione dei dati misurati

Carta Xi è la carta classica su un’osservazione di un unico valore.

Carta X,R o X,S: è la carta che rappresenta la media delle osservazioni sulla sequenza di campioni. Ogni punto rappresentato è un campione ed il valore è la media dei valori per le osservazioni su quel campione.

2.3 I processi e la strutturazione delle attività

2.3.1 La strutturazione dei processi

L’approccio per processi che viene utilizzato per la gestione delle attività in tutti i sistemi per la qualità. Per l’analisi delle attività di un’azienda è necessario individuare i processi informali o formali esistenti che hanno influenza sulla qualità, sulla sicurezza e sull’ambiente e formalizzarli tramite diagrammi di flusso, sui quali si devono individuare gli ingressi e le uscite, i vincoli e le risorse. Tali diagrammi sono di due tipi, di processo e di informazione. I diagrammi di processo si riferiscono alla globalità degli ingressi e delle uscite fisiche (materiali di approvvigionamento, flusso dei WIP ed uscite di prodotto e di scarto), mentre i diagrammi di informazione forniscono la struttura del flusso di informazioni tra i vari processi o i loro componenti.

Il sistema generalmente va impostato tramite una scomposizione in livelli. Il primo livello è quello generale, dove si distinguono i processi principali e la connessione tra di essi (commerciale, produzione, approvvigionamento. . .). Il secondo livello è un’esplosione della struttura dei singoli processi individuati e si definiscono singolarmente i singoli requisiti di ingresso e di uscita.

Per la redazione delle procedure che formalizzano la gestione dei processi è necessario prima di tutto partire dallo stato in cui si trova l’organizzazione. Tramite l’indagine sul campo si cercherà di redigere dei documenti che descrivano il processo così come si sviluppa nelle varie attività svolte dal personale. Solo partendo da fotografie dell’esistente è

possibile capire il funzionamento, le criticità e i miglioramenti e le semplificazioni possibili. Nell'ottica di sviluppare un sistema qualità che si conforma ad una qualche specifica norma organizzativa (ad es. la serie 9000 della ISO), non si deve dimenticare che la qualità vorrebbe che siano definiti i processi indipendentemente dal fatto che si rispetti una norma, poiché la riduzione del costo che deriva da un lavoro di qualità non dipende da una norma, ma da un approccio alla gestione delle attività. Che una parte delle attività siano sottoposte ad audit sulla base di una classe di accettabilità, non significa che solo quella parte porti ad una riduzione dei costi.

2.3.2 I diagrammi dei flussi fisici dei processi e le procedure

La scomposizione delle attività in processi porta alla formalizzazione dei flussi, individuati secondo logiche di separazione per tipo e luogo. Per ogni processo si analizzano i flussi esistenti e rappresentati in diagrammi; si è inoltre descritto il processo tramite la redazione di una serie di documenti strutturati secondo la logica delle norme UNI EN ISO 9001:2000, UNI EN ISO 1400:2008 e OSHAS 18001. I processi principali in un'azienda metallurgica o meccanica individuabili sono i seguenti.

1. Valutazione di impatto ambientale
2. Gestione della documentazione
3. Gestione della normativa
4. Gestione delle risorse umane
5. Gestione delle infrastrutture
6. Gestione commerciale
7. Gestione delle comunicazioni
8. Gestione dello sviluppo del prodotto
9. Gestione della produzione
10. Gestione degli approvvigionamenti
11. Gestione dei rifiuti
12. Gestione delle sostanze pericolose
13. Gestione dei DPI
14. Gestione dei dispositivi di misurazione
15. Gestione della sicurezza antincendio e delle emergenze
16. Controllo di prodotto

17. Gestione delle Non-conformità

18. Gestione degli audit

Nella definizione dei processi fornita attraverso la stesura delle procedure si individuano anche le risorse e le responsabilità attribuite secondo le funzioni definite dall'organigramma aziendale.

Nell'ambito del flusso individuato si descrivono di seguito alcune delle procedure di maggiore interesse e più direttamente coinvolte nella realizzazione della qualità del prodotto.

Gestione commerciale

La gestione delle fasi commerciali è indispensabile in un sistema di gestione totale della qualità. Questo perché è tramite esso che si possono ottenere tutti i requisiti del cliente. In tale processo deve essere formalizzata la gestione del contatto, della formulazione del preventivo, dell'offerta, dell'accettazione dell'ordine e della sua verifica. Tutte queste attività ovviamente non si svolgono esclusivamente all'interno dell'ufficio commerciale, poiché devono prevedere un'analisi della fattibilità finanziaria, tecnica e della disponibilità di risorse che può essere fatta solo in sinergia con le altre funzioni aziendali.

Per requisiti del cliente sono intese tutte le specifiche necessarie a soddisfarlo completamente. È ben specificato sulla norma ISO 9001 che tali specifiche possono anche non essere espresse dal cliente, poiché in ogni caso l'azienda ha il compito o di esplicitarle tramite la richiesta al cliente o tramite l'assunzione di standard. Inoltre esistono dei particolari requisiti che non sono del cliente ma che sono invece cogenti: tutte le normative di prodotto vanno integrate nelle specifiche prodotto.

La gestione della complessità prevede che dunque anche nel processo di una fonderia siano formalizzate tutte le attività che determinino i requisiti da rispettare. Generalmente è consigliato tenere traccia anche della fase di preventivazione, poiché da tali documenti scaturiscono i risultati riportati nei documenti di offerta. Per poter migliorare ovviamente serve documentare lo storico e dunque anche i passaggi per la generazione dei costi e dei tempi sono necessariamente sottoposti a continue modifiche ed affinzioni successive. Inoltre possono verificarsi casi particolari per cui esistono dei costi anomali da sostenere, che possono non comparire in fase di offerta, come nel caso di contenziosi. Mettersi al riparo da eventuali azioni legali dovute alla disapplicazione di requisiti del cliente significa registrare ovviamente tutte le fasi critiche, soprattutto quelle di contatto con il cliente. L'organizzazione deve quindi dimostrare di aver recepito tutti i requisiti del cliente anche in modo proattivo e nella complessità della gestione delle modifiche e delle iterazioni che possono frequentemente essere necessarie per il conseguimento dell'ordine.

Particolare attenzione deve essere posta anche nella gestione dei reclami, con dimostrazione di più reattività possibile. Inoltre l'analisi dei requisiti del cliente porta l'organizzazione ad essere attiva nell'indagare le necessità del committente utilizzando strumenti ed indicatori diretti ed indiretti. Consigliabile è la redazione di istruzioni operative sulla gestione

documentale, in modo da facilitare l'archiviazione dei documenti necessari, che possono andare dall'offerta emessa al disegno del componente finito.

Sviluppo del prodotto

Lo sviluppo del prodotto è il processo che porta alla progettazione del componente da realizzare con la specificazione delle modalità di produzione. Deve determinare i requisiti tecnici del prodotto ed i requisiti del processo per la sua realizzazione. A seconda della complessità del prodotto richiede approcci diversi alla gestione. Infatti se il prodotto è un impianto o se è un semplice componente le tecniche organizzative variano da una gestione progetti classica alla semplice progettazione per dimensionamento. Inoltre il coinvolgimento nella progettazione di attrezzature per la produzione aumenta la durata e l'iterazione delle attività.

Generalmente lo sviluppo del prodotto comincia con i requisiti del cliente, tra cui dal disegno del componente. La progettazione è ultimata con la realizzazione del primo getto. In effetti questo risulta strano perché si potrebbe essere indotti a pensare che la realizzazione sia un fatto di produzione. In realtà i requisiti sullo sviluppo del prodotto della ISO9001 includono anche la verifica del risultato della progettazione, quindi ben oltre l'ultimazione del disegno del modello. I passi necessari sono dunque:

1. Verifica dei requisiti in ingresso: chiarezza e completezza del disegno; identificazione dei materiali e degli eventuali trattamenti e lavorazioni; eventuali requisiti cogenti, ingombri del pezzo onde valutare la tipologia di attrezzature; necessità o meno di anime; compatibilità con i processi produttivi disponibili; volumi produttivi richiesti (es. n° pezzi, cadenza lotti...); esigenze particolari di verifiche e controlli. accordi sulla proprietà del modello (se diversi da quelli adottati da ASSOFOND).
2. Progettazione: piani/linee di divisione, sovrametalli, angoli di sformo o spoglia, raggi di raccordo ed eventuali altre modifiche alla geometria del getto (in questa fase è consigliabile interfacciarsi anche con il cliente); definizione della forma, numero e disposizione delle anime. Definizione del sistema di colata e centratura del modello. Definizione delle varianti e dei loro componenti. Ci sono anche le considerazioni da fare per una produzione che risulti agevole e sicura, quindi definendo anche le fasi produttive, come la movimentazione del modello, il tipo di formatura da fare (se in motta, se in staffa...), il tipo di colata, se con una o due siviere, il tipo di distaffatura. Infine bisogna definire anche il tipo di taglio e sbavatura, poiché se difficilmente eseguibili possono aumentare considerevolmente i costi di produzione. Per le lavorazioni meccaniche o altre fasi esterne sono bisogna considerare i requisiti del cliente ma anche quelli del terzista, al quale, possedendo generalmente delle macchine o degli impianti, bisogna garantire compatibilità di ingombro e movimentazione (fissaggi sulle macchine utensili o sulle verniciature). Il tutto risulterà in documenti quali disegni di modello e istruzioni di produzione.

3. La verifica della realizzazione del modello è un controllo intermedio che garantisce l'individuazione di difetti anticipatamente.

4. Realizzazione e validazione della campionatura: garantisce che la progettazione abbia ottenuto i requisiti richiesti prima dell'invio al cliente. Inoltre si possono verificare ed eventualmente modificare tutti i parametri produttivi per la produzione di serie. Il controllo ed il collaudo della produzione campione anche da parte del cliente, che deve visionare anch'egli il prodotto di prova, è un requisito della ISO9001; essa prescrive anche l'esecuzione di azioni correttive nel caso si individuassero delle NC.

Produzione

Il processo di produzione di fonderia è un processo relativamente semplice ovvero non richiede un numero di passaggi elevato con elevata articolazione delle connessioni come può essere un processo di assemblaggio di un elettrodomestico. Il problema del controllo dell'attività in ambito siderurgico più che nella logistica e nell'ottimizzazione delle operazioni è critico per il controllo dei parametri.

Dal controllo dei parametri del materiale di formatura al controllo dei parametri della lega liquida, il problema è simile: come ottenere risultati ripetitivi ed affidabili? L'analisi statistica su questi processi rileva che si è in presenza generalmente di una regolare linea media, ma di una variabilità elevata. Ad esempio l'indurimento della forma è un parametro molto difficile da tenere costante, poiché dipende anche dal carico di lavoro e dall'attesa che i modelli fanno in forma. Il degasaggio dipende dal carico di umidità dell'ambiente. Inoltre vi sono variabilità che dipendono dal tipo, dalla qualità e dall'utilizzo della macchina. Ad esempio a seconda del carico di lavoro i forni saranno sempre accesi o accesi a tratti, quindi la lega liquida potrebbe risentire dell'umidità residua o meno. La gestione in sé del processo da un punto di vista della pianificazione delle attività dipende dal tipo di fonderia e dal tipo di clienti. Una fonderia a formatura automatica con tre turni di lavoro e con clienti che si accontentano di tempi di consegna abbastanza lunghi avrà una programmazione ben differente da una fonderia con formatura manuale e clienti che vogliono tempi di consegna molto stretti. I sottoprocessi di primo acchito programmabili sono la formatura, il ramolaggio e la colata. Non bisogna però dimenticare che i colli di bottiglia possono però trovarsi a valle, con la serratura e la finitura. Infatti la gestione della programmazione può risultare complessa notevolmente spingendosi fino alla fine del ciclo. Tale obiettivo è comunque consigliato.

L'impossibilità di una programmazione puntuale però non deve impedire l'implementazione di una attività di pianificazione, poiché come già spesso detto l'analisi dei dati di scostamento tra pianificazione ed esecuzione può dirsi fondamentale nel migliorare tutto il processo produttivo.

2.3.3 Il miglioramento continuo

Il miglioramento continuo è lo stato per cui una azienda riesce a restringere la variabilità e ad aumentare le prestazioni della sua organizzazione in modo costante. Dipende molto dall'utilizzo degli strumenti di archiviazione ed analisi ed in genere da tutta la documentazione necessaria a tenere memoria dei problemi e delle soluzioni, memoria che sia condivisa in modo da fornire il più velocemente possibile le risposte cercate. Ma dipende soprattutto dalla disponibilità delle persone ad accettare metodi condivisi e quindi alla capacità del gruppo di adottare strumenti nuovi, capacità che non dipende solo dall'intelligenza delle singole persone, ma anche da fattori ambientali come può essere la presenza di altre priorità sul lavoro. Ad esempio uno dei grossi rischi è quello di impostare modulistica che non verrà mai compilata.

Comunque, il mondo delle norme sulla qualità mette a disposizione degli strumenti che dovrebbero se usati nel modo giusto portare l'organizzazione a migliorare in molti aspetti legati al problema della qualità ma non solo.

Controlli di prodotto e gestione delle non-conformità

La norma ISO9001 prevede un piano di fabbricazione e controllo che definisca le verifiche da fare sulle uscite dei processi. Con la scomposizione dei processi in sottoprocessi risulta evidente come sia necessario anche la definizione di punti di controllo intermedi, che impediscano, come già detto, la propagazione degli errori a valle. Ma se intendiamo tenere sotto controllo tutti i processi e non solo quello produttivo ci serve un altro strumento, più flessibile e generico. Oltre alla presenza del Piano di Fabbricazione e Controllo, lo strumento per la gestione delle anomalie che la qualità mette a disposizione delle organizzazioni è la Gestione delle Non-Conformità: La qualità è così intesa non solo come caratteristica dell'uscita dal processo di produzione, ma come uscita da un processo qualunque.

Come già specificato nel capitolo che tratta i difetti di fonderia in sabbia (cfr. 1.4) esistono diverse accezioni dei due termini, difetto e NC. Se il primo indica aspetti che impediscano al prodotto di essere utilizzato come previsto, il secondo indica un qualsiasi risultato di processo (quale che sia il processo: commerciale, gestione dei DPI . . .) che non sia conforme ai requisiti stabiliti per il prodotto del processo.

Dunque l'accezione data al termine difetto è più specifico perché legato al prodotto che il cliente compera, mentre una NC può riguardare qualsiasi aspetto organizzativo che sia vincolato al rispetto di un requisito. Ad esempio la consegna in ritardo di un prodotto non è un difetto di prodotto, ma una non-conformità del processo commerciale o logistico. Altra definizione possibile che distingua difetti e non-conformità potrebbe derivare dall'applicazione sull'output del processo di produzione (in questo caso il getto da fonderia) della differenza che esiste tra deviazione e requisito, definito tramite gli strumenti statistici. Quindi si potrebbe definire un difetto come un comportamento anomalo del processo che ha generato il getto, ossia all'esterno dei limiti di varianza rilevati. La NC potrebbe

differentemente essere associata al limite di progetto richiesto all'output del processo. In questo modo si possono definire difetti tutti i parametri la cui misura rileva una causa speciale, mentre si può definire una NC quando esiste il superamento dei limiti USL-LSL. Generalmente i passi per la gestione di una non-conformità sono gli stessi che si utilizzano per l'eliminazione di un difetto, con una logica comune per arrivare alla soluzione dei due diversi problemi; da ricordare come debba essere invasiva la logica del ciclo di Deming.

1. Classificazione del difetto o della non conformità
2. Individuazione delle cause e classificazione specifica dell'eventuale difetto
3. Definizione delle azioni correttive o preventive
4. Verifica delle azioni intraprese

Per quanto riguarda le NC di prodotto, esse vengono riconosciute dal confronto con i limiti previsti dalle classi di accettabilità e dei parametri misurati sul prodotto durante le fasi di collaudo intermedie o finali Individuazione delle cause e classificazione specifica dell'eventuale difetto. L'individuazione delle cause è un passaggio naturale per la risoluzione dei problemi. Oltre a quest'aspetto le norme prevedono esplicitamente che sia verbalizzato l'esito delle analisi. Come cause si intende l'insieme degli aspetti di carenza, di errona gestione, utilizzo o allocazione, anche riferendosi se possibile a tutta la documentazione che accompagna e motiva la rilevazione della non-conformità.

Per l'individuazione delle cause può essere di grande aiuto la classificazione dei difetti e la strutturazione degli alberi di guasto. Nella classificazione del difetto è naturale avere due sistemi di classificazione, uno discontinuo e l'altro continuo. La classificazione a seconda delle cause è discontinua ed all'interno della stessa categoria sono presenti difetti di eterogenea importanza. Tale classificazione è importante in quanto permette di raggruppare per analogia e similitudine dei difetti che hanno cause comuni, quindi per un'interpretazione fisica del fenomeno volta all'elaborazione di una soluzione tecnica risolutiva. D'altronde può esserci difficoltà a dare importanza diversa ai vari difetti; è allora necessario quantificare regolarmente i costi necessari alle rilavorazioni o alla fornitura in garanzia. Oltre all'analisi di Pareto è necessaria affiancare un'analisi economica della comparsa dei difetti, perché solo così si ottiene una visione reale dell'andamento dei costi e quindi una pianificazione (e non solo una progettazione) corretta degli interventi necessari all'eliminazione progressiva dei problemi. Definizione delle azioni correttive o preventive La definizione delle azioni correttive e preventive dipende dall'analisi delle cause. Ad esempio sappiamo che la temperatura ha forte influenza sulla qualità dei getti e, dal momento che è facile e presto fatto cambiare la temperatura del metallo o quella del cilindro, questa è la prima prova che si fa, nella speranza di risolvere in fretta il problema. Raramente il solo cambiamento della temperatura o comunque di uno solo dei parametri di processo può risolvere i problemi; cambiare più condizioni in contemporanea può però complicare e confondere il processo diagnostico. Talora la soluzione è resa complicata dal fatto che in un solo getto confluiscono più problemi, oppure cause differenti producono effetti che

sembrano uguali. Il modo migliore per diagnosticare un problema è raccogliere i fatti (i parametri di processo) e le osservazioni, restringere il campo di indagine per eliminazione e finalmente scoprire la vera causa con variazioni distinte di singoli parametri. Ovviamente in caso di problemi noti si possono sempre affrettare i passi e farne più d'uno alla volta, ma alla comparsa di problemi sconosciuti la prassi necessita di messe a punto per singole regolazioni.

La scheda tecnica del getto

La scheda tecnica del getto è la raccolta di tutte le informazioni ed i parametri tecnici che servono al reparto produttivo. Tutti i requisiti che sono l'output specifico dell'ufficio tecnico e l'input del reparto produttivo sono raccolti al suo interno. Non si trovano chiaramente tutte le informazioni per la pianificazione della produzione o della logistica e nemmeno il disegno del getto, fornito a parte assieme alla scheda, ma tutte le informazioni per impostare i parametri delle attività, come l'identificativo e la posizione in magazzino del modello associato, la composizione della sabbia, la temperatura in sivera, il numero ed il posizionamento delle maniche etc. . . Se il getto è stato prodotto in passato è possibile raccogliere i dati storici che costituiscono una parte di requisiti per la produzione ulteriore degli stessi getti, come le temperature che sono risultate ottimali od il posizionamento delle materozze. I parametri che si trovano all'interno fanno comunque riferimento a standard o prassi assodate in azienda. Ad esempio non si definiscono le dimensioni dei canali o del colatoio, in quanto esistono degli stampi pronti o i canali sono realizzati sul modello. Non vengono definiti trattamenti standard sui bagni, ma sempre solo le variazioni rispetto allo standard.

Elementi significativi sul tipo di metodo produttivo da utilizzare che possono venir raccolti nella scheda tecnica del getto sono i seguenti, che non rappresentano sicuramente una lista esauriente, ma che danno comunque l'idea di come possa essere utile definire una volta per tutte le tecniche di produzione di un determinato getto:

- Numero componenti principali della forma: fatto in terza o più staffe?
- Partizione orizzontale o verticale della forma
- Posizione attacchi top, bottom, middle
- Tipo di bacino di colata: conical, offset, offset stepped
- Tipo di pozzo: assente, profondo, normale
- Attacchi di colata: singolo o multipli
- Tipo di canali di alimentazione: rettilinei, divergenti o convergenti
- Sezione dei canali: sottile o spessa

- Filtri: tipo e numero di direct pouring, tipo, posizione (all'inizio dei canali, a metà, inclinati o verticali) e numero di in direct pouring

2.4 L'informatizzazione

2.4.1 Le priorità

L'informatizzazione delle informazioni dei processi ha due aspetti complementari. Da un lato mette a disposizione le informazioni in tempo reale e dall'altro raccoglie una quantità di dati notevole con la possibilità di una consultazione rapidissima.

Il controllo di processo presuppone prima di tutto il processo. Senza di esso non vi è controllo. Significa che prima di tutto devo avere delle informazioni sul suo comportamento, devo ottenere dei dati che indichino il suo andamento, che siano significativi per l'interpretazione del fenomeno. Dunque la base di ogni tipo di controllo (anche dal punto di vista dei sistemi matematici) è la capacità di rilevare le informazioni. Su di esse potranno venir costruite poi delle teorie sul suo controllo, ma senza questa base ogni tipo di predizione sul suo comportamento non ha fondamento.

Resta quindi evidente come la prima necessità per poter interpretare il processo sia ottenere delle misure per creare uno storico sul quale possano essere costruiti dei modelli. L'utilizzo di un sistema informatico per la registrazione dei dati di un processo in modo sistematico ed in tempo reale permette l'analisi del processo su tutta la gamma di dati raccolti, anche indietro nel tempo. Possono essere così confrontati ed elaborati in modo semplice.

La seconda priorità è rendere disponibili i dati e la loro elaborazione in tempo reale in un punto qualsiasi dotato di monitor. Se l'elaborazione è automatizzata tramite l'utilizzo di modelli, le analisi potranno essere consultate in qualsiasi momento, permettendo così in tempi rapidissimi l'analisi del comportamento del processo. In questo modo i gestori delle attività conoscono in ogni momento l'andamento delle attività e possono effettuare delle correzioni compiendo così in tal modo il famigerato controllo in maniera più efficace e puntuale; inoltre l'attività legata alla raccolta ed elaborazione dei dati non è così invasiva nel lavoro di ognuno di come si possa fare con una raccolta dati cartacea ed una elaborazione manuale.

Infine è da segnalare come l'utilizzo di sistemi informatici renda meno flessibile la registrazione. A fronte di ciò prima dell'introduzione di un database è necessario avere chiaro il processo ed il flusso di dati che si intende registrare in tutti i loro aspetti, come punti di controllo, significatività dei dati, gestione delle informazioni particolari, ecc. . .

2.4.2 La valutazione del carico di lavoro

La registrazione informatica offre grandissimi vantaggi rispetto a quella cartacea. Rimane però dipendente da essa, in quanto possono essere utilizzati per l'inserimento diretto solo macchine per la lettura di codici, altrimenti tutto il resto avviene prima con registrazione

cartacea e dopo con l'attività di Data Entry. Il lavoro di registrazione è quindi superiore al lavoro di registrazione cartaceo, ma il vantaggio viene poi recuperato nel lavoro di analisi dei dati.

La valutazione delle risorse necessarie deve quindi considerare sia il lavoro svolto per la registrazione cartacea se esiste, sia il lavoro di data entry. In base a tali valutazioni si può progettare l'utilizzo di sistemi di rilevazione automatici, prevedendo l'"Even Break Point" con la quantificazione del lavoro di sviluppo per l'implementazione dei lettori, del lavoro di registrazione cartacea e del lavoro di data entry. In base alla distanza nel tempo di tale pareggio si può decidere l'implementazione degli automatismi di registrazione in base alla graduatoria dei punti calcolati per le singole funzioni del processo che si intende controllare.

Altra considerazione da fare è la quantità di risorse da dedicare alle registrazioni. In base alla necessità di analisi e di archiviazione bisogna decidere la sequenza delle attività dei processi che gradualmente passeranno da una archiviazione cartacea ad una informatica. Prima di tutto vanno registrati digitalmente i processi che richiedono una reperibilità immediata delle informazioni, poi quelli che richiedono attività di analisi frequenti o onerose, infine le attività che danno indicazioni sullo stato del processo in tempo reale e che conviene avere sempre sott'occhio.

2.4.3 La scelta degli strumenti

La raccolta delle proposte commerciali e breve analisi. Esistono innumerevoli software per la gestione della qualità, della produzione, delle attrezzature, generalmente composti in modo modulare. Toccano tutte le attività necessarie alle varie certificazioni organizzative, in modo da permettere all'utente un utilizzo immediato su uno strumento già ottimizzato per la gestione di processi simili in molte realtà produttive. La vastità del panorama rende impossibile la classificazione e catalogazione di strumenti. Vi sono infatti anche strumenti specifici per la gestione di realtà produttive come le fonderie, che tengono conto delle esigenze particolari che vi si trovano.

L'investimento necessario è funzione delle dimensioni della azienda, poiché l'ammortamento dell'investimento è funzione della capacità produttiva. Inoltre se la dimensione è piccola parte delle attività non è conveniente gestirle sistematicamente, poiché l'investimento iniziale è elevato. Se pensiamo ad esempio ad un SAP è naturale immaginare che il suo costo è molto elevato, poiché al suo interno già sono strutturate le attività più varie e l'apprendimento è lungo. Anche se la modularità di questi strumenti garantisce una certa flessibilità, non sempre le aziende si possono permettere investimenti per tutti gli aspetti della loro produzione, ma solo per quelli essenziali.

MSAccess come strumento

La scelta classica quando si decide un investimento è quella del "make or buy". Dipendentemente dalle risorse esistenti in azienda e dalla loro disponibilità è necessaria una

valutazione sui costi di sviluppo che si avrebbero nei due casi. I vantaggi principali di una soluzione che preveda lo sviluppo a carico di risorse interne sono

- la possibilità di effettuare un'analisi dei requisiti approfondita con costi contenuti
- la possibilità di sviluppare progressivamente a partire dalla progettazione del cuore del sistema per poi estendere successivamente ed in maniera costante
- la possibilità di correggere errori molto rapidamente per la presenza di competenze interne sempre a disposizione
- la possibilità di modificare il sistema a seconda delle condizioni alle quali si trova ad operare
- funzionalità certe, mirate e solo quelle necessarie

Gli svantaggi

- Incompletezza delle funzionalità
- Lunghi tempi di sviluppo
- Instabilità (anche se la sua gestione è facilitata dalla presenza di competenze interne)
- Gestione della complessità crescente
- Tecnologia inferiore ai prodotti di compera per l'utilizzo di soluzioni tecniche meno efficienti ed innovative.

La strategia migliore non è mai stabilita a priori, poiché in queste valutazioni rientrano come in tutte le scelte di investimento anche considerazioni finanziarie di breve e di lungo periodo. In ogni caso, come si spiegherà più avanti, esiste almeno un grossissimo vantaggio della soluzione a sviluppo interno, ovvero la disponibilità immediata dei dati archiviati.

Sviluppi

La necessità di gestire le informazioni in tempi brevi e in condivisione con molti utenti in contemporanea indica che la base dati deve essere migrata su supporti più completi e affidabili, come potrebbe essere PostgreSQL o MySequel o MSSequelServer, sempre in ambito Windows. In tal modo l'esecuzione delle query potrebbe essere eseguita in tempi rapidissimi e quindi l'utente otterrebbe uno strumento che risponde quasi istantaneamente alle sue richieste, poiché su tali software sia l'elaborazione che la gestione di utenze contemporanee è notevolmente migliore. Sarebbe opportuno quindi sviluppare la base dati direttamente con software dedicati alla gestione di una grande quantità di dati, ma secondo la numerosità dei dati si può scegliere di utilizzare uno strumento come MSAccess e poi migrare la base.

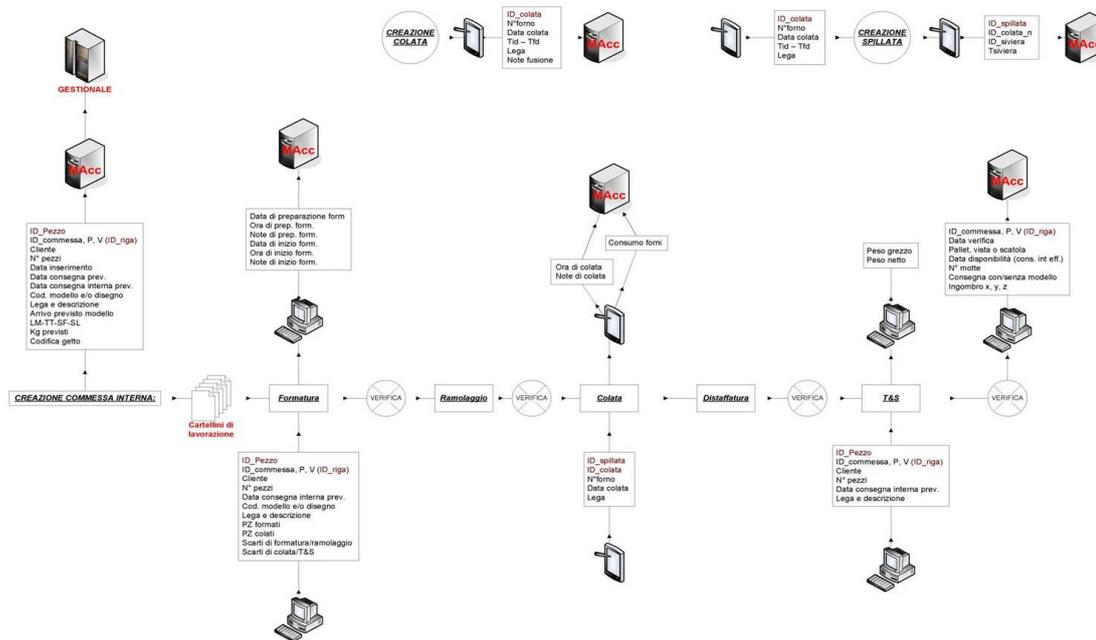


Figura 2.4 – Schema di flusso dei dati per evidenziare rilevazione e archiviazione

2.4.4 Lo sviluppo del flusso informativo e l'implementazione

Le priorità per un sistema informatico che comincia al di là del controllo amministrativo sono la gestione dei prodotti e della loro qualità e la gestione delle attrezzature coinvolte con i processi che influenzano la qualità, l'ambiente o la sicurezza. Le proposte per una base dati coinvolgono in primis dunque la produzione, ma in seconda battuta anche l'area della manutenzione. Per lo sviluppo della base dati è necessario stendere un diagramma di flusso per stabilire la circolazione delle informazioni nel processo e stabilire le necessità e poi un diagramma E-R per valutare la completezza della progettazione.

Per la gestione delle informazioni si impostano i diagrammi di flusso per ogni processo, nei quali si individuano i vari elementi che compongono le informazioni, dai requisiti ai punti di controllo. Il seguente flusso è stato sviluppato per la progettazione del sistema di gestione dei requisiti di ingresso nei processi e per la gestione dei punti di controllo. Vengono indicati inoltre gli strumenti utilizzati per la gestione informatica del flusso, in modo da avere chiaramente visibili le caratteristiche operative e quindi le competenze necessarie alla gestione della strumentazione. Si possono vedere in questo caso i tre flussi principali della produzione, rappresentati in maniera molto sintetica e funzionale alla gestione della sola informazione. Per una descrizione completa del processo, come già detto, si sono utilizzati i diagrammi di flusso fisico. In figura fig. 2.4 si rappresenta un esempio di come si possa stendere un diagramma di flusso dei dati. In verticale sono rappresentati i flussi di informazione da e dai vari componenti del processo di produzione, mentre in orizzontale è rappresentato il flusso fisico semplificato attraverso le varie fasi del processo produttivo. In ingresso alle varie fasi vengono visualizzati i dispositivi che si

utilizzano per ottenere le informazioni e in uscita i dispositivi utilizzati per l'inserimento. Sono elencati solamente i dati fondamentali raggruppati in tabelle. Gli attributi rossi rappresentano le chiavi.

Il database manutenzione

La manutenzione è la combinazione di tutte le azioni tecniche ed amministrative, incluse le azioni di supervisione, volte a mantenere o riportare l'attrezzatura in uno stato funzionale. La gestione della capacità produttiva tramite la gestione delle macchine è fondamentale, per poter garantire l'operatività delle attrezzature. Nulla serve infatti gestire la produzione informaticamente cercando una razionalizzazione delle informazioni se non si applica la stessa strategia alla gestione degli strumenti necessari alla produzione stessa. Tramite la rilevazione dei dati di manutenzione è possibile fare stime sui tempi caratteristici del funzionamento delle macchine. Essi sono:

Affidabilità: probabilità che una macchina assolva le sue funzioni ininterrottamente in un dato periodo e in date condizioni di lavoro

MTTF: tempo medio di lavoro tra due guasti

MTTR: tempo medio di riparazione dei guasti

Disponibilità: probabilità che ad un certo istante la macchina sia in funzione.

Il database manutenzione deve gestire gli interventi sugli impianti e sulle macchine. Le funzioni implementate devono fornire almeno un supporto per la programmazione periodica degli interventi e la registrazione di interventi ordinari e straordinari. Tramite l'analisi dei valori dei tipici parametri sopra descritti, a partire dalle registrazioni dell'attività di manutenzione, è possibile stabilire i margini di sicurezza necessari.

Le funzioni più sofisticate di manutenzione predittiva, analisi dei modi di guasto, calcoli sul ciclo di vita hanno bisogno di un'attività di registrazione abbastanza onerosa.

Il database di produzione

Il database di produzione gestisce le informazioni che provengono dall'ufficio commerciale in modo da fornire al reparto gli ordini di produzione. Per ogni commessa interna devono essere presenti e gestiti tutti i requisiti necessari (codice del modello, data di consegna, codifica commerciale, lega. . .).

Oltre a fornire le indicazioni necessarie al reparto, deve gestire anche le informazioni che servono al commerciale per gestire la chiusura degli ordini, come l'avanzamento dei lavori, il peso dei getti, le misure dei colli e molto altro. È consigliabile l'implementazione di molte altre funzioni, come gestione dei difetti, magazzino o prove interne. Le funzionalità che si consiglia di implementare sono le seguenti:

1. Gestione delle commesse interne

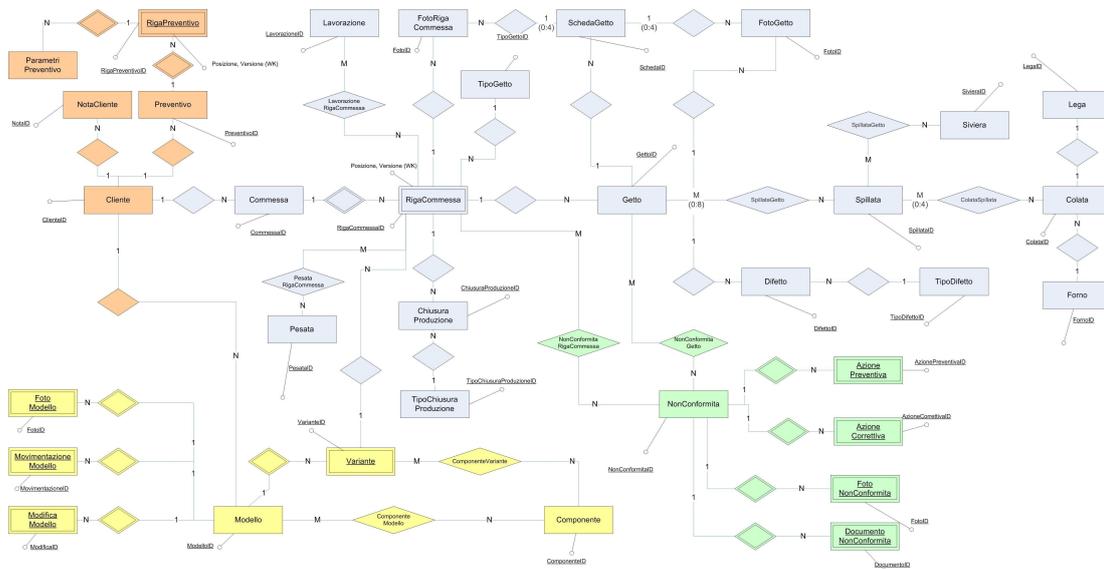


Figura 2.5 – Schema E-R della base dati minima per la gestione delle informazioni di produzione in fonderia

2. Gestione della consegna interna
3. Tracciabilità di prodotto
4. Gestione del processo di colata
5. Gestione dell'archivio fotografico
6. Gestione del magazzino prodotti
7. Gestione del magazzino modelli
8. Gestione dei disegni
9. Statistiche di produzione
10. Gestione della preventivazione
11. Gestione della difettologia e delle Non-conformità
12. Gestione dei metodi di produzione
13. Gestione delle lavorazioni esterne
14. Reportistica
15. Gestione dei controlli di prodotto e di approvvigionamento

La base di dati che permette la gestione di tutte queste caratteristiche è schematizzata in figura fig. 2.5. Le relazioni strutturate in questo modo permettono la gestione degli aspetti di fonderia principali. I colori evidenziano l'appartenenza dei dati ai vari processi. Il cuore è costituito dalle relazioni che legano la commessa ai getti da una parte e i getti e il processo di fusione dall'altro. In questo modo è possibile tracciare tutte le informazioni riguardo alla produzione di un particolare, che vanno dal tipo di siviera utilizzato per la colata, al tipo di finitura richiesta dal cliente. Tramite la gestione del magazzino modelli e dello storico con la scheda tecnica del getto è possibile gestire gran parte delle informazioni necessarie alla produzione dei componenti senza che ad ogni riordino del cliente ci sia una attività di progettazione tecnica o industrializzazione necessaria alla realizzazione del prodotto.

La tracciabilità interna

Il requisito di implementazione di un sistema di tracciabilità interna è presente sulla norma UNI EN ISO 9001:2000, che specifica che l'identificazione dei prodotti deve essere sempre possibile. Vi sono inoltre altre innumerevoli norme che richiedono l'identificazione dei prodotti o dei lotti, come ad esempio le norme per l'automotive. In generale dove vi sono problematiche di sicurezza è richiesta la tracciabilità dell'intera filiera produttiva.

Nella figura fig. 2.6 si vede un esempio di come possa essere strutturato un cartellino per la tracciabilità di prodotto in fonderia. Ogni getto dovrebbe essere identificato in maniera univoca. Se infatti si considera una produzione di getti di grandi dimensioni e piccole quantità è evidente che la gestione "One Piece Flow" suggerita dalle filosofie della Produzione Snella deve essere assolutamente implementata, poiché i vantaggi sulla tracciabilità di prodotto sono enormi. Una gestione per lotti fatta in una produzione su grandi numeri è una semplificazione necessaria vista la grande quantità di cartellini e di documenti necessaria; si immagina facilmente quindi che tracciare pezzo per pezzo una produzione di bulloneria è impossibile, mentre tracciare una produzione di teste di motore è essenziale. Se poi si considera anche di entrare in mercati complessi e difficili come l'aeronautico, l'automotive o l'energetico (chi più ne ha ne metta) la tracciabilità di prodotto è fondamentale.

La scelta dunque è intelligentemente obbligatoria, dunque ogni getto ha un numero non di serie, ma bensì un numero di identificazione univoco, in modo da poter stabilire anche dopo un periodo di servizio molto lungo le caratteristiche che il processo produttivo avesse nel momento della sua produzione. Per poter giungere ad una certificazione secondo la 9001 (che prevede la tracciabilità ove possibile) o secondo ad esempio le norme TS (che

Figura 2.6 – Esempio di cartellino di identificazione del getto

la prevede per forza almeno per lotti) è necessario studiare un metodo per l'identificazione interna reparto per reparto dall'inizio delle fasi produttive fino al loro termine: vi è la necessità di ottenere informazioni certe sui WIP presenti. La soluzione adottata generalmente è quella della tecnica dei cartellini. Sul cartellino sono presenti le informazioni necessarie agli operatori, (come il tipo di lega, il peso previsto, le lavorazioni da effettuare. . .). Per poter arrivare ad identificare il prodotto sino alla fine della produzione la soluzione più efficiente e meno costosa è quella che usa particolari cartellini con etichette ed un sistema di targhe in rilievo che permettono di identificare i getti anche all'interno di una stessa forma.

Infatti in una fonderia esiste il problema del superamento della fase di distaffatura per tre ragioni. La prima è che il cartellino deve essere applicato sul getto, mentre prima lo era sulla forma. La seconda è che nella forma possono essere presenti più getti. La terza è la temperatura del getto che potrebbe richiedere adesivi speciali con colle speciali. La soluzione proposta utilizza un cartellino da applicare sulla forma con un tassellino che si inserisce nella superficie della sabbia appena depositata, che si sta indurendo. Fino alla fase di sterratura è il cartellino che identifica il contenuto della sabbia. Durante la fase di serratura il cartellino viene rimosso e le etichette adesive presenti vengono separate e applicate al getto che esce dalla fase. Particolare cura dovrà aversi nella scelta del materiale delle etichette e nella scelta della colla. Infatti la temperatura di uscita in distaffatura potrà essere un parametro molto critico per la riuscita del progetto di identificazione dei getti. Esistono in commercio comunque etichette molto sofisticate, che garantiscono tenute anche sui getti ferrosi che passano un trattamento termico, quindi molto resistenti alle sollecitazioni termiche.

La presenza di più getti per forma impone un sistema aggiuntivo per l'identificazione. Se infatti più cartellini sono allegati alla forma, non si possono più distinguere i getti univocamente al suo interno. A meno che non abbiano nomi o caratteristiche diverse e siano facilmente riconoscibili uno dall'altro, i getti dovranno avere un'appendice con un numero identificativo stampigliato che sarà riportato sul cartellino corrispettivo.

La rilevazione automatica

La lettura tramite codici a barre è la soluzione più affidabile di un sistema che aggiorni in modo automatico ed in tempo reale le informazioni dei vari processi, in modo da fornire istante per istante l'andamento effettivo delle attività. Sui cartellini introdotti in Figura 37 sono presenti dei codici a barre che indicano il numero identificativo del getto. Tramite la lettura di tale codice su pagine specifiche del software presente sui lettori di codice a barre è possibile effettuare diverse operazioni. Si può registrare in tempo reale i parametri di colata, le attrezzature utilizzate ed i getti colati. Inoltre si possono registrare i controlli di qualità, il peso dei getti e la presenza di difetti. La macchina scelta è inoltre predisposta per la gestione delle fotografie, che possono essere scattate direttamente dall'operatore per registrare il tipo di tecnologia scelto per produzione del getto (come il sistema di colata, la posizione delle materozze, la posizione dei raffreddatori e dei filtri. . .).

Approcci al miglioramento della qualità in fonderia

3.1 Casi di studio

La qualità in fonderia è prima di tutto legata al “core” dell'attività, ossia la qualità metallurgica del prodotto. In funzione sempre dei requisiti del cliente, che possono essere più o meno restrittivi, la qualità dei getti è legata principalmente alla presenza di inclusioni, porosità e affinamento del grano primario ed eutettico. Le caratteristiche derivano dal processo utilizzato, che in fonderia di alluminio in sabbia possono in gran parte attribuirsi al processo di fusione e al processo di formatura.

Il primo, considerando l'intero flusso dalla fusione alla colata, influisce sulla qualità del prodotto attraverso molti parametri: qualità della carica, qualità dei depuranti e del degassaggio, tempi e procedure di spillata e colata, temperature di processo e conduzione dei forni.

Il processo di formatura influisce sulla qualità metallurgica per la distribuzione delle materozze e dei raffreddatori e per il tipo di sistema di colata, presupponendo la corretta realizzazione della forma, che non comporti inclusioni esogene o rotture della sabbia.

Lo studio si è concentrato sull'individuazione dei parametri che sono determinanti nel sistema di colata e nel posizionamento delle materozze, ovvero i due principali fattori del processo di formatura.

Il sistema di colata può risultare direttamente dalla formatura del modello o può venire realizzato con modelli speciali di portafiltri aggiunti prima della formatura e con la realizzazione dei canali in ramolaggio. In ogni caso la determinazione delle velocità nei condotti

è fondamentale per stabilire degli standard sulla realizzazione del sistema che garantisca le condizioni per la buona riuscita del getto; verranno trattati dei modelli idraulici che forniscono le stime della velocità del metallo nelle varie sezioni del sistema di colata.

Il posizionamento delle materozze dipende dalla distanza alla quale la materozza riesce a fornire lega liquida fino alla solidificazione completa. La determinazione di questa distanza si realizza da un lato con il calcolo dei moduli, che garantisce l'assenza di ritiro nel caso in cui siano presenti punti caldi per variazioni geometriche, e dall'altro dal calcolo della distanza di alimentazione nel caso ideale, ovvero senza punti caldi, che dà una indicazione sulla quantità di materozze necessarie per ottenere un getto privo di microritiri.

Lo studio di questi due sistemi e la ricerca dei parametri fondamentali che governano gli effetti che hanno sul prodotto e sul processo è l'oggetto dell'analisi dei prossimi paragrafi.

3.2 Ottimizzazione dei sistemi di colata

L'ottimizzazione del sistema di colata è fondamentale per ottenere dei pezzi di buona qualità. Infatti a seconda delle condizioni all'interno del sistema variano il tipo e la quantità di inclusioni. Lo studio di un buon sistema di colata deve cominciare dall'individuazione delle grandezze impiantistiche del sistema per capire se sono all'interno di parametri critici. Successivamente può esserci un affinamento per ridurre ulteriormente attriti, turbolenze, tempo di realizzazione. . . La criticità nelle leghe di alluminio ed in tutte le leghe che hanno una notevole predisposizione alla formazione degli ossidi è la valutazione delle velocità massime, che devono avere un limite a seconda del luogo dove si presentino. Oltre alle turbolenze, tramite l'analisi delle velocità si può anche stabilire se vi siano le condizioni per l'integrità della forma, che non deve essere vittima di erosioni. Sicuramente il punto critico si trova sugli attacchi di colata, dove non vi è più un controllo dell'ossidazione essendo al di là di tutti i filtri. Il regime su queste sezioni deve essere per forza laminare ed inoltre generalmente si consiglia una velocità inferiore al mezzo metro al secondo. Lo scopo dello studio effettuato è la realizzazione di uno strumento di calcolo per l'ottimizzazione delle sezioni del sistema di colata. Non viene sviluppato semplicemente un modello matematico per lo studio idraulico dei sistemi, ma uno strumento a differenze finite per poter valutare con il tempo di riempimento il valore dei parametri introdotti.

Il sistema di colata porta la lega liquida dalla siviera al getto tramite vari passaggi, riempiendo progressivamente la forma. L'esigenza primaria di tali sistemi è quello di ridurre vortici non controllati (cercando anche di ottenere nelle varie condotte un regime laminare piuttosto che turbolento), ostacolare il passaggio di ossidi od inclusioni e disperdere meno calore possibile. Per ottenere questo si devono evitare spigoli, curve brusche, si devono differenziare le altezze e le larghezze dei canali, assottigliandoli, e considerare tutte quelle accortezze fluidodinamiche che avvicinano il flusso ad un comportamento laminare.

Lo studio effettuato tenta di fornire una stima delle velocità sulle varie sezioni del sistema di colata getto in modo da valutare se vi siano le condizioni sufficienti per poter ottenere un getto di qualità. Per poter effettuare la verifica delle grandezze che si ricavano, è

stato costruito un modello idraulico monodimensionale ad elementi finiti che può essere comparato in base al tempo di riempimento stimato e quello reale misurato durante le operazioni di colata. Tramite lo scostamento rilevato dal teorico al reale si ha una misura dello scostamento che si avrà sulle velocità stimate.

Di seguito verrà fatta una breve sintesi degli elementi principali di un sistema di colata adatto alla fonderia di alluminio in sabbia-resina a formatura manuale.

3.2.1 Elementi del sistema di colata

Il sistema di colata è costituito da una serie di elementi all'interno della forma che conducono il metallo liquido dalla siviera al getto. Vi sono molte tipologie di sistemi, ma noi esamineremo solamente quello della colata in sorgente, non quello di colata indiretta, pressoché inutilizzabile per getti a formatura manuale di grandi dimensioni.

Bacino di colata

Il bacino di colata è l'elemento che raccoglie la caduta di metallo dalla siviera e la direziona verso il colatoio. È generalmente composto da una vaschetta sul fondo della quale vi è un piccolo rialzo che confina l'inizio del colatoio, con lo scopo di mantenere le turbolenze della caduta al suo interno e mantenere uno strato di ossido protettivo al di sopra dell'ingresso in forma. Infatti bisognerebbe sempre mantenerlo pieno, in modo che il colatoio raccolga la lega nel punto più favorevole del bagno in bacino, lontano da turbolenze e lontano dal pelo del bagno.

In alternativa al bacino di colata si può utilizzare la coppa di colata, che è costituita da un semplice imbuto sul cui fondo si trova l'ingresso del colatoio. Anche in questo caso è bene mantenere l'elemento sempre pieno di lega liquida, in modo da mantenere lontana la superficie ossidata. Se si presentano difetti come giunti freddi questa soluzione è migliore, poiché il flusso di alluminio è più veloce e perde meno temperatura. Se invece si hanno problemi di inclusioni di ossidi è meglio utilizzare il bacino.

Per entrambe le soluzioni una regola valida è quella di evitare vortici, per cui le sezioni orizzontali a forma rettangolare sono in genere da preferire.

Colatoio

Il colatoio ha lo scopo di portare la lega liquida dal bacino, che si trova all'altezza massima della forma, al distributore, che si trova all'altezza dei canali. È un elemento abbastanza critico, poiché è quello che più genera più intrappolamenti ed inclusioni di tutti gli altri. Per minimizzare i comportamenti anomali deve essere conico per compensare l'accelerazione della lega in fase di caduta e deve essere riempito quanto prima.

Distributore

Ha il compito di connettere la mandata del colatoio con gli attacchi. Possono esserci più attacchi per ogni distributore presente, ma un solo colatoio al di sopra di esso. Anche in questo caso l'analisi della dinamica dei fluidi al suo interno è importante al fine di posizionare gli ingressi dei canali in modo da tenere lontano scoria ed ossidi. Non si può escludere a priori in questo caso la scelta di una sezione rotonda, che porti al centro le parti più leggere con un movimento vorticoso, come quello che potrebbe essere presente in un filtro a ciclone, e lasci all'esterno la lega buona che passa ai canali.

Canali di colata

I canali di colata cominciano sul distributore e lungo di essi si trovano i vari attacchi di colata. Finiscono generalmente al di là dell'ultimo attacco con un piccolo bacino che ha lo scopo di raccogliere ed intrappolare la prima parte sporca della colata. Inoltre questo artificio evita il colpo d'ariete sull'ultimo attacco di colata. La sezione, per lo stesso principio del colatoio, dovrebbe essere variabile a seconda della portata che rimane dopo ogni passaggio su un attacco. Presumendo che le velocità sugli attacchi siano volutamente simili, il canale dovrebbe avere una sezione convergente (dovrebbe poiché tale geometria è facilmente realizzabile con un modello del sistema di colata, ma per praticità o per difficoltà di realizzazione del modello a volte il canale è scavato direttamente in forma). Per ottenere basse velocità di ingresso in attacco si può pensare ad un sistema divergente, ma se si posizionano per ogni distributore più canali e per ogni canali più attacchi naturalmente le sezioni del fluido metallico sono già divergenti. Per la riduzione della turbolenza si possono realizzare canali di sezione rettangolare allungata, in modo da avvicinare ogni parte del flusso all'influenza delle perdite in parete piuttosto che all'energia inerziale al che si trova al centro dei condotti.

Attacchi

L'attacco di colata è l'elemento che connette i canali con il getto. Possono esserci molti attacchi per ogni getto, posizionati in modo opportuno. La priorità è quella di avere una velocità di ingresso più ridotta che si riesce compatibilmente con l'esigenza di riempire velocemente il getto per evitare giunti freddi. Più numerosi sono meglio è, compatibilmente con le esigenze di direzionalità del campo termico (e cioè della direzionalità della solidificazione).

Filtri

La filtrazione della lega che percorre il sistema di colata è assolutamente necessario. Sicuramente vi sarà un'inclusione di ossi o peggio di sabbia, che non dovrà per nessuna ragione raggiungere il getto. Possono essere posizionati in serie con varie capacità filtranti, dalla più grande alla più sottile. Vi possono essere i filtri all'ingresso del distributore e

subito prima dell'attacco di colata, ma esistono comunque moltissime soluzioni. Possono essere posizionati verticalmente od orizzontalmente.

L'inserimento di un filtro a schiuma ceramica immediatamente dopo il piede della discesa di colata modifica radicalmente i modelli di flusso. Poiché il filtro richiede una certa quantità di pressione e di tempo per attivarsi, il metallo viene temporaneamente fermato nei pressi del filtro stesso. Questo consente alla discesa di colata di riempirsi da dietro, escludendo l'aria dal metallo in arrivo.

Oltre ad avere le classiche proprietà filtranti, hanno anche lo scopo di portare il fluido da un regime turbolento ad un regime laminare, regolarizzando la portata anche tramite il loro effetto resistivo. In effetti, è lì che si possono concentrare le perdite nei modelli classici monodimensionali degli impianti a fluido, poiché la loro resistenza è molto superiore alla resistenza nei canali.

Trappole

Le trappole hanno lo scopo di arginare le parti più leggere come la scoria ed impedire loro di proseguire verso il getto, lasciando il passaggio solo alla lega pulita. Ne esistono di vari tipi, secondo il tipo di sistema di colata.

Materozze

Le materozze generalmente non fanno parte del sistema di colata, ma a volte, invece di essere posizionate al di sopra del getto (materozza fredda), possono essere frapposte tra l'attacco di colata ed il distributore, in modo da realizzare una materozza laterale ed andando a costituire un componente del sistema. Questa soluzione garantisce che la materozza sia più calda del resto del getto, poiché si è preriscaldata con il passaggio di tutto l'alluminio necessario a riempire il getto, trovandosi così riempita della parte di colata più calda (materozza calda). Le materozze possono essere ricavate direttamente sulla sabbia o possono essere ricavate includendo nella forma maniche isolanti.

3.2.2 Regole pratiche per il posizionamento degli attacchi nella fonderia in sabbia

Ci sono alcune regole pratiche per il posizionamento degli attacchi che derivano dall'ottimizzazione di prassi produttive o dai risultati derivanti dall'analisi numerica. Per la fonderia in sabbia i consigli sui sistemi di colata sono di seguito riassunti[2].

1. Se si utilizzano gli alimentatori, la loro efficienza può essere migliorata se si collegano, ove è possibile, direttamente agli attacchi. Inoltre così facendo diminuisce il numero di elementi che devono essere staccati dal getto nella fase di finitura.
2. La posizione migliore per posizionare gli attacchi dopo gli alimentatori sono le sezioni spesse, che permettono di distribuire il metallo fuso alle altre sezioni con il

minimo raffreddamento. In tal modo si prevencono le rotture occasionali durante la fase di asportazione degli attacchi. Inoltre si può utilizzare questo tipo di approccio al posizionamento per controllare i gradienti termici e quindi la direzione della solidificazione.

3. Nei getti in sabbia, il metallo fuso dovrebbe fluire all'interno dello stampo con la minima resistenza e senza subire rapidi cambi di direzione onde evitare l'insorgere di turbolenza, che previene la rottura del film di ossido superficiale, l'intrappolamento di gas e dunque l'inclusione di ossidi.
4. Gli attacchi vanno posizionati in modo tale da minimizzare l'altezza di caduta del metallo all'interno della cavità del getto; ciò per evitare fenomeni di ossidazione e di erosione della sabbia nel punto di caduta.
5. Il numero degli attacchi deve essere in un numero sufficiente tale che il metallo possa raggiungere ogni parte del getto senza sacrificare la propria fluidità.
6. Il sistema dovrebbe essere progettato in modo da riempire quanto prima il colatoio, in modo da concentrare nelle prime fasi della colata le eventuali impurità che genera la primissima parte di lega liquida gettata.

3.2.3 Rapporto fra le sezioni

Spesso il sistema di colata viene descritto sinteticamente mediante una proporzione che lega l'area della sezione di strozzatura, con le rimanenti sezioni. Tale proporzione è definita come $A_S : A_R : A_I$, rispettivamente l'area delle sezioni dell'uscita del canale di colata (Sprue), del canale di alimentazione (Runner) e degli attacchi di colata (Ingate). Se sono presenti più canali di alimentazione e più attacchi alimentati dallo stesso canale di colata, si considera la loro area totale.

Un sistema divergente (o non pressurizzato), esprimibile come $A_S < A_R < A_I$, dove l'area degli attacchi è maggiore dell'area del canale di colata, assicura una velocità ridotta ed un moto quasi laminare della vena fluida sugli attacchi; è particolarmente indicato per leghe che formano ossidi e scorie, come l'alluminio. Esempio di sistema divergente può essere l'1:2:2 per metalli ferrosi e l'1:4:4 per metalli non ferrosi. Valori più elevati relativi all'area degli attacchi, come 1:4:8, servono per ridurre ulteriormente la velocità. In questo caso la strozzatura fluidodinamica generalmente si trova sul distributore, alla fine del colatoio o all'inizio dei canali di colata[13]. Il sistema convergente (o pressurizzato) è caratterizzato da una relazione $A_S > A_R > A_I$, tipicamente 4:3:3 o 4:3:2, che evita il distacco della vena fluida dalle pareti del canale di colata con il conseguente risucchio di aria. In questo caso la resistenza fluidodinamica si trova generalmente sul filtro dell'attacco di colata. Alcuni però sconsigliano vivamente l'utilizzo di canali pressurizzati per colare leghe non ferrose[9].

Quando la cavità dello stampo presenta un singolo attacco di colata, l'uso di un sistema

divergente o convergente risulta quasi indifferente, con una lieve preferenza per quest'ultimo data dalla maggior semplicità realizzativa. Quando il getto necessita di un numero maggiore di attacchi, il metallo fluisce da ognuno di questi, con una portata proporzionale alla somma delle sezioni. L'uso di un sistema convergente risulta in questo caso svantaggioso in quanto la condizione in cui la somma delle aree di uscita degli attacchi è inferiore alla sezione del canale di alimentazione, comporta canali pienamente utilizzati, con velocità di deflusso eccessive. La qualità del metallo risulterà quindi compromessa dalle eccessive turbolenze.

Usando un sistema divergente le velocità risultano simili tra loro e sensibilmente moderate, fatto che implica minori turbolenze ed inclusioni. Da notare che il dimensionamento inizia sempre dalla sezione minima; uscita del canale di colata per il sistema divergente e attacco di colata per il sistema convergente.

3.2.4 Filtrazione

La velocità di deflusso attraverso i filtri può variare durante la colata in funzione della necessità di non avere turbolenza soprattutto all'inizio, a causa del rischio di bagnare il filtro con gocce fredde prima che il canale sia riempito completamente. Inoltre la temperatura dei filtri aumenta durante la colata.

3.2.5 Parametri

Tempo di riempimento, massa e densità

È il tempo di riempimento del getto comprensivo dell'alimentazione e del sistema di colata. Tenendo presente che il riempimento della forma deve avvenire in modo lento ed uniforme compatibilmente però con le variazioni necessarie alle esigenze di filtrazione e di qualità del getto, il tempo di riempimento (*Pouring Time* t_P) è generalmente una funzione con andamento radicale: Il tempo varia con la radice della massa da gettare. In genere K_P è circa 8 per l'alluminio. La massa m è data dalla somma della massa netta del getto (m_C) con la massa del sistema di alimentazione (m_S). È importante precisare che la massa del sistema di colata va valutata senza considerare il bacino (il sistema non tiene in considerazione le dimensioni del bacino di colata, che è fuori trattazione). Generalmente il peso totale (ma spesso anche quello netto del getto) è sconosciuto; si può stimare iterativamente o da dati storici, che possono fornire il peso netto e le percentuali di materozzamento (R_F). Nel modello è considerata la densità ρ_L^{ME} dell'alluminio liquido, che è circa 90% della densità ρ_S^{ME} della fase solida.

Altezze di colata

L'altezza finale h è la coordinata verticale che misura l'altezza del liquido all'interno della forma. L'altezza iniziale di colata h_I è la distanza verticale che intercorre tra il pelo libero del metallo presente nel bacino ed il punto più basso del getto; ponendo l'origine

delle altezze sul piano di divisione, normalmente $h_I = 0$. L'altezza di bacino h_B serve a determinare la velocità all'ingresso del canale di colata. Una delle differenze del metodo di colata in sorgente da quello della colata diretta si individua nell'andamento della velocità di colata. Nel primo caso la differenza di altezze del livello in bacino e del livello istantaneo in forma determina la velocità all'interno del sistema di colata. L'altezza istantanea h andrà progressivamente da $h_I = 0$ a h_F rallentando la sua velocità a cominciare dalla massima, spinta con battente h_F . Nel secondo caso la velocità sarà costante, poiché al riempimento del canale di colata, governato dalla resistenza del sistema, la pressione sarà sempre massima e pari a quella fornita dal battente massimo.

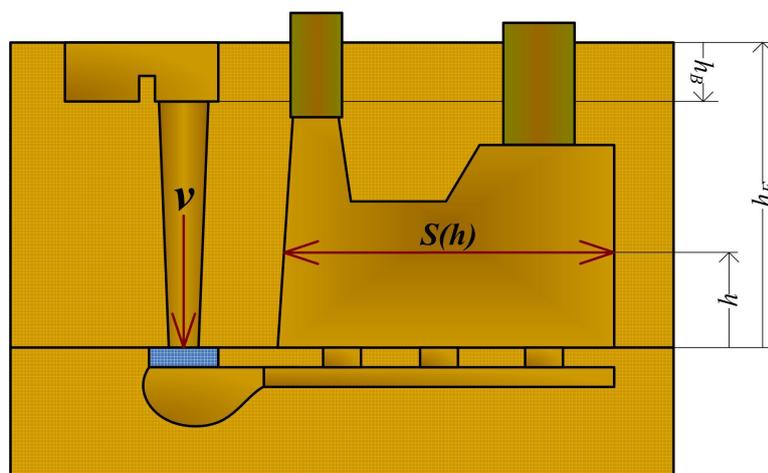


Figura 3.1 – Altezze caratteristiche di una forma

Parametri caratteristici dei canali di colata e d'alimentazione e degli attacchi

d_{RE} è la lunghezza dell'estensione del canale di alimentazione (*Runner Extension*), che garantisce che il primo fronte non entri direttamente nel getto ma venga intrappolato; inoltre assorbe l'onda di pressione del primo flusso che arriva in canale e confina anche il fenomeno del *Back Filling*. v_I è la velocità di ingresso nel getto, ossia sulla sezione di uscita degli attacchi di colata (*Ingate*). Generalmente nella pratica della fonderia di alluminio tale valore non deve superare i 0.5 m/s . R_S e R_R sono i rapporti fra le dimensioni delle sezioni rispettivamente del canale di colata (*Sprue*) e del canale di alimentazione (*Runner*). Sono definiti come il rapporto fra la dimensione maggiore e la dimensione minore della sezione. Se tali rapporti sono alti indicano che le sezioni sono sottili (favorendo il regime laminare e evitando il fenomeno del *Back filling*).

3.2.6 La fluidodinamica nel sistema di colata

Generalità: conservazione della massa e dell'energia

La portata massica e volumica medie del sistema sono così calcolate:

$$Q = \frac{m_C + m_S}{t_P} \quad (3.1)$$

$$Q_V = \frac{m_C + m_S}{\rho_L^{me} t_P} \quad (3.2)$$

m_S comprende sia la massa delle materozze che la massa propria del sistema di alimentazione, dal bacino agli attacchi di colata. Istante per istante, se le sezioni dei canali di colata sono identiche fra loro, se le sezioni degli attacchi sono identici fra loro e se le condizioni fluidodinamiche sono simmetriche nel pozzetto, si può vincolare la progettazione del sistema alla relazione che si ha fra le varie portate nei canali di alimentazione e negli attacchi secondo l'equazione:

$$Q(t) = \sum_{r=1}^R Q_r(t) = \sum_{r=1}^R \left(\sum_{i=1}^I Q_i(t) \right) = n_R n_I a_I v_I(t) dt = a_S v_S(t) dt \quad (3.3)$$

Essendo n_R il numero di canali di colata (Runners) e n_I il numero degli attacchi di colata per ogni canale (Ingates); v_S è la velocità sulla sezione di uscita del canale di colata. Il principio di conservazione dell'energia tra due sezioni (1 e 2) di un canale applicata ad un fluido incomprimibile fornisce la seguente equazione:

$$\Delta h + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma y \quad (3.4)$$

L'ultimo termine del secondo membro quantifica le perdite non conservative del sistema (turbolenza e viscosità), mentre il primo membro è il carico idraulico applicato. Il risultato della conservazione dell'energia (in condizioni di pressione atmosferica in ingresso ma anche in uscita) è all'istante t:

$$h(t) + \frac{v_S^2(t)}{2g} = \Sigma y \quad (3.5)$$

Equazioni per il sistema di colata

Le perdite sono costituite da una resistenza che determina un salto di pressione. Il salto di pressione, sebbene sia distribuito in 2 sezioni, sul filtro al distributore e sulla serie di filtri agli attacchi, si considera concentrato su un punto solo. Si può stimare mediante la pressione di Forcheimer:

$$\Delta p_F = s_F \left(\frac{\mu v_S(t)}{k_1} + \frac{\rho v_S^2(t)}{k_2} \right) \quad (3.6)$$

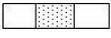
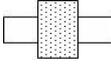
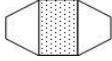
$c_T = 1$	$c_T = 0.7$	$c_T = 0.5$
		
$c_P = 0$	$c_P = 1$	$c_P = 1.3$
Senza sistema filtrante	Con filtro sul pozzetto o sugli attacchi	Con filtri sia sul pozzetto che sugli attacchi

Tabella 3.1 – Coefficienti per la determinazione delle resistenze concentrate a seconda della forma della sede del filtro e a seconda della serie che la lega attraversa

Nella conservazione dell'energia è tutto espresso in altezza. Vi sarà dunque un'altezza istantanea resistiva da vincere per colare pari a:

$$h_R(t) = s_F \left(\frac{\mu v_S(t)}{k_1} + \frac{\rho v_S^2(t)}{k_2} \right) \frac{1}{\rho g} \quad (3.7)$$

Si introducono dei parametri correttivi a seconda del tipo di alloggiamento del filtro, per compensare gli allargamenti di sezione introdotti per rallentare il flusso e per compensare la presenza di due sezioni filtranti, a seconda che vi siano o non vi siano filtri, che ve ne siano sulla sezione d'uscita del colatoio, che ve ne siano anche sulla sezione degli attacchi di colata. L'altezza resistiva diventa allora:

$$h_R(t) = \frac{s_F c_T c_P}{\rho g} \left(\frac{\mu v_S(t)}{k_1} + \frac{\rho v_S^2(t)}{k_2} \right) \quad (3.8)$$

I parametri c_T e c_P sono valutati in 3.1. Il risultato delle ipotesi sulle resistenze dà l'opportunità di scrivere l'equazione che governa il modello in funzione della velocità all'uscita del colatoio e dell'altezza raggiunta, entrambi in funzione del tempo.

$$h(t) = h_l - \frac{s_F c_T c_P}{\rho g} \left(\frac{\mu v_S(t)}{k_1} + \frac{\rho v_S^2(t)}{k_2} \right) - \frac{v_S^2(t)}{2gc^2} \quad (3.9)$$

$$h(t) = A v_S^2(t) + B v_S(t) + C \quad (3.10)$$

3.2.7 Soluzione numerica

Curve di velocità e di riempimento

La soluzione dell'equazione sopra è molto più semplice per via numerica che per via analitica, in quanto richiederebbe la soluzione di un'equazione differenziale. L'equazione delle differenze risulta invece molto semplice da implementare su foglio di calcolo:

$$h_{t+\Delta t} - h_t = 2A v_t (v_{t+\Delta t} - v_t) + B (v_{t+\Delta t} - v_t) \quad (3.11)$$

La portata volumica istantanea è dedotta dalla conservazione della massa nella seguente relazione:

$$S_h(h_{t+\Delta t} - h_t) = a_s v_t dt (v_{t+\Delta t} - v_t) \quad (3.12)$$

Si arriva ad una velocità all'istante $t + \Delta t$ pari a:

$$v_{t+\Delta t} = \frac{v_t}{2Av_t + B} \left(\frac{a_s dt}{S_h} + B + 2Av_t^2 \right) \quad (3.13)$$

Conoscendo la velocità iniziale dalle condizioni al contorno si ricava il profilo di velocità e di riempimento nel tempo. Si noti come S_h sia una funzione dell'altezza da esprimere come funzione del tempo nel foglio di calcolo: è necessaria la sezione del getto ad un determinato istante, ricavato dall'istante in cui quella altezza è raggiunta. Per ricavare l'altezza all'istante t si utilizza la:

$$h_{t+\Delta t} = v_t \frac{a_s}{S_h} + h_t \quad (3.14)$$

Uguualmente si possono tracciare le resistenze e le velocità sulla sezione dei canali di colata e sugli attacchi. La soluzione della equazione generale per $h=0$ fornisce la velocità iniziale. Il dislivello varia quindi dalla linea di partizione del getto fino al livello del bacino di colata, ovvero quando i due livelli sono uguali, in quanto esiste sempre una materozza aperta sulla cima della forma. Inoltre vi è una correzione da fare, in quanto senza l'esistenza di un bacino di colata l'energia in discesa dalla siviera si riversa senza perdite nel colatoio e quindi bisogna variare l'altezza iniziale aggiungendo la differenza di altezza della bocca di siviera rispetto al livello teorico:

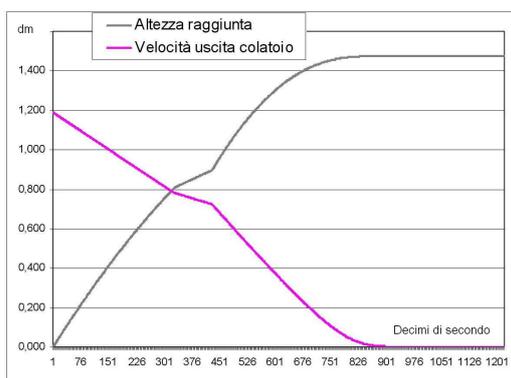
$$h'_F = h_F + h_L \quad (3.15)$$

Questo comportamento si ha all'inizio della colata, quando le velocità sono elevate. Da un certo punto in poi la differenza non esiste più, poiché il livello del liquido sulla tromba del colatoio è al suo massimo ed il salto dalla siviera in condizioni di scarsa portata è disperso. Vi sarà quindi una sottostima delle condizioni all'inizio ed una sovrastima alla fine.

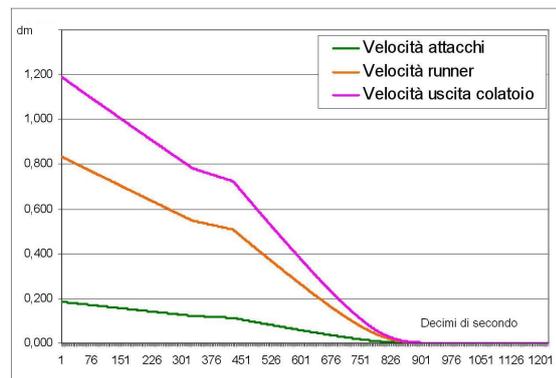
Per poter fornire dati attendibili è necessario avere un parametro misurabile facilmente: la soluzione più percorribile è quella di ottenere dal modello il tempo di colata in modo da poterlo confrontare con la misura effettuata sulla colata del getto reale. Per ottenere questo nel modello è stato introdotto il valore della sezione in funzione dell'altezza del getto sotto studio. Così facendo il risultato del modello è stato verificato sperimentalmente tramite la rilevazione del tempo di colata di una piccola serie di getti, che sono componenti rotazionali per il settore energetico; il peso, al netto della materozzatura e del sistema di colata, è di 70 chilogrammi ed è fotografato in fig. 3.2. È stata ricavata la superficie della sezione orizzontale in funzione dell'altezza in base al disegno, in modo da fornire al modello la misura della superficie per ogni incremento di altezza pari a 10 mm, permettendo così il calcolo del riempimento in funzione del tempo. I tempi di colata rilevati nel pro-



Figura 3.2 – Il getto sul quale sono stati calcolati i tempi di riempimento teorici e misurati i tempi di colata reali è del tipo rotazionale per il settore energetico.



(a) Velocità all'uscita del colatoio e altezza raggiunta del pelo libero



(b) Velocità all'uscita del colatoio, nei distributori e sugli attacchi di colata

Figura 3.3 – Risultati del modello numerico

cesso reale sono riportati in tabella 3.13. Nella figura fig. 3.3 vengono riportate le curve delle velocità critiche in funzione del tempo per la geometria dello stesso getto. Sono indicati in ascissa i decimi di secondo ($\Delta t = 0, 1$): il passo temporale del modello è variabile.

Getto 1	85 sec
Getto 2	95 sec
Getto 3	79 sec
Media	86 sec
Varianza	6 sec

Tabella 3.2 – Tempi rilevati per tre getti identici a quello per cui sono state calcolate le curve in figura fig. 3.3

L'altezza iniziale è di 1220 mm a cui si aggiungono 100 del salto tra l'ingresso del colatoio e la bocca della siviera. Il modello potrebbe essere corretto per variare nel tempo l'altezza di colata. I coefficienti correttivi sono calcolati per il caso di una filtrazione su due livelli, il coefficiente di perdita globale è $c = 0,7$.

Le sezioni dell'ingresso del colatoio sono ricavate secondo le modalità descritte in seguito; le altre sezioni secondo i bilanci di massa precedentemente illustrati. Il risultato delle operazioni effettuate sul getto di esempio ha fornito la serie di sezioni visibile in figura fig. 3.4. La sezione che fornisce la portata per il calcolo del riempimento e che è condizione al contorno del modello è la sezione di uscita del colatoio. Poiché la velocità su tale sezione è determinata dal salto che compie l'alluminio, la portata iniziale è nota, dal momento che il salto è massimo all'inizio del processo di colata. La sezione di ingresso del colatoio è ricavata uguagliando le portate ai due estremi, in modo da ottenere un condotto verticale convergente che è obbligatorio nel caso in cui non si vogliono intrappolamenti d'aria. Le sezioni dei runners e degli ingates deriva dall'eguaglianza delle portate come in equazione 3.8.

Il modello ha come condizioni al contorno la velocità all'uscita del colatoio calcolata come nell'equazione 3.16, la sezione in funzione dell'altezza del getto di cui si stanno calcolando le velocità e la sezione di uscita dal colatoio. A cominciare dalla velocità iniziale passo dopo passo viene calcolato il volume che viene riempito e di conseguenza, conoscendo la sezione del getto, si ricava l'incremento di altezza, come spiegato in precedenza. In base al livello raggiunto dal pelo libero del metallo liquido all'interno della

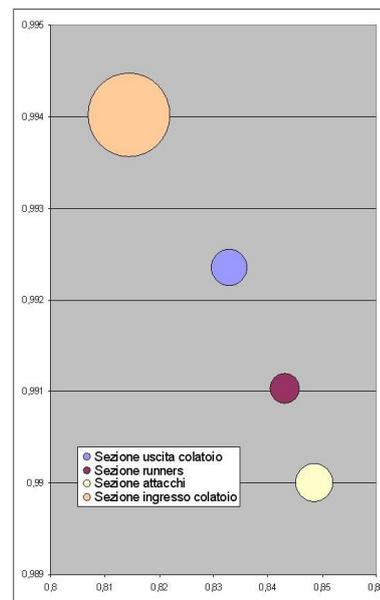


Figura 3.4 – Sezioni caratteristiche del sistema di colata. La sezione di ingresso del colatoio è ricavata in base alla sezione sul pozzo

forma si calcola il battente che spinge l'alluminio attraverso il sistema di colata. Mano a mano che si procede con la colata le velocità diminuiscono in modo proporzionale al livello raggiunto. Le variazioni di sezione del getto inducono delle diminuzioni più o meno marcate delle velocità; come si vede in figura ad un certo punto del riempimento si ha una diminuzione della derivata (valore assoluto) delle velocità e dell'altezza del pelo libero nella forma. Questo indica un allargamento della superficie della sezione orizzontale del getto. Al contrario successivamente si nota un rapido incremento del livello ed un rapido decremento delle velocità, in corrispondenza di una riduzione della sezione orizzontale. Questo accade al raggiungimento del bordo inferiore della materozza.

Non è stata fatta una taratura delle costanti c_P che corrispondono alle resistenze concentrate sui filtri, ma risulta in questo modo abbastanza agevole tale operazione, anche se per determinare esattamente le condizioni sulle serie di filtri occorrerebbe misurare il tempo di colata di un getto che sia filtrato solo una volta sola, prima con i filtri sul distributore e poi con i filtri sugli attacchi.

Analisi del bacino e del pozzo

L'analisi dei sistemi di colata non è completa, in quanto sono stati trascurati nel modello i dimensionamenti del bacino e del pozzo. Questi infatti sono ricavate semplicemente dall'esperienza di fonderia. Il bacino di colata è semplicemente un serbatoio a pelo libero con un foro sul fondo. Per questo la pressione p_1 è uguale alla p_2 , v_1 è nulla e la differenza di altezza dal pelo libero alla sezione di uscita del bacino è h_B . La condizione (12) esplicitata per ricavare la velocità di uscita v_B dal bacino diventa perciò:

$$v_B = \sqrt{2g(h_B - \Sigma y)} \quad (3.16)$$

Si possono raccogliere i termini in modo opportuno per far sì che risulti una funzione del coefficiente di scarico del bacino c_B :

$$v_B = c_B \sqrt{2gh_B} \quad (3.17)$$

L'analisi del pozzo si limita ad un dimensionamento che non dipende da modelli fluidodinamica, ma che dipende da regole empiriche sulla base delle grandezze della sezione orizzontale di ingresso a_S (se di sezione quadrata $a_S = x_S y_S$, se circolare $a_S = \pi r S_2$) e della sezione d'uscita a_W . Il diametro d_W e l'altezza h_W di un pozzo cilindrico si possono esprimere come[9]:

$$d_W = \max \{x_S, y_S, x_W\} \quad (3.18)$$

$$h_W = 2y_W \quad (3.19)$$

Per stimare una velocità media che si possa utilizzare per la progettazione del sistema di colata si può anche utilizzare la seguente:

$$h_m = \left(\frac{\sqrt{h_I} + \sqrt{h_F}}{2} \right)^2 \quad (3.20)$$

Così, utilizzando l'altezza h_m invece della h_F , si ottiene un sistema correttamente dimensionato di tutto il sistema di colata, invece di uno sotto-dimensionato.

Un'altra considerazione che si può fare sul pozzo è sulla geometria e la disposizione. È infatti difficile dedurre quali siano le condizioni per un buon flusso laminare all'interno. Per valutare esattamente il campo tridimensionale è necessario un modello ad elementi finiti, ma vista la difficoltà di implementare un sistema del genere che tenga in considerazione tutte le variabili fluidodinamiche e metallurgiche all'interno del pozzo si possono assumere valide le seguenti considerazioni:

- Il flusso deve essere sempre laminare per quanto possibile, evitando rotori che possono derivare da un pozzo di colata di forma sferica; la forma migliore come già detto è quella con facce parallele ed un minimo raccordo sui lati.
- Il primo filtro deve essere posizionato tra il colatoio ed il pozzo, in modo da omogeneizzare le velocità in entrata evitando picchi che possono trascinare ossidi e impurità. Inoltre in questo modo si riempie prima il colatoio che, come già detto, dovrebbe riempirsi al più presto.

3.2.8 Considerazioni conclusive

Applicando i modelli monodimensionali della fluidodinamica al sistema di colata si ottengono le equazioni differenziali che governano le grandezze come pressioni, portate e altezze. La risoluzione delle equazioni è possibile in funzione dell'altezza raggiunta, ma non esiste nessun legame con il tempo, poiché queste non tengono in considerazione la geometria del getto che va realizzandosi nella forma e che determina il riempimento in funzione del tempo. Per lo studio delle condizioni critiche sarebbe sufficiente considerare l'istante iniziale dove il battente è maggiore e dunque le velocità sono massime. Senza però verificare che i parametri siano abbastanza vicini alla realtà non è possibile ottenere una stima adeguata delle velocità del metallo nella forma e quindi una stima della criticità delle condizioni metallurgiche. La verifica dei parametri del modello non è dunque possibile poiché bisognerebbe determinare ad un certo istante le velocità nei condotti del sistema di colata. Una strada alternativa è quella di risolvere numericamente le equazioni differenziali ed introdurre la geometrie del getto per stabilire una relazione tra il battente ed il tempo, in modo da verificare che quando il battente è nullo, ossia quando la colata è completata, il tempo fornito dal modello coincida con il tempo di colata reale misurato durante il processo.

È stato dunque realizzato un modello che permette di determinare in base alle equazioni

dell'idraulica e alla geometria del getto l'istante teorico in cui la colata termina. Potendo confrontare il dato teorico con quello reale si possono ottenere stime sulle velocità del sistema che sono molto vicine alle condizioni reali; se il tempo di colata risulta molto diverso è comunque possibile modificare i parametri del modello per adattarli a quelli reali. In questo modo si è realizzato un modello che potendo adattarsi alle condizioni reali molto facilmente può dare indicazioni sulla qualità del sistema di colata che siano sufficientemente attendibili per poter modificare con successo la disposizione dei canali, il loro numero, la disposizione ed il tipo di filtri e verificare che le velocità del fluido siano entro i limiti. Lo strumento è quindi molto utile per verificare ad esempio se un sistema di colata è sovradimensionato, oppure per stabilire altri requisiti sulle velocità verificando la qualità del getto dopo la colata.

3.3 Riduzione ed ottimizzazione della materozzatura

La materozzatura di un getto è necessaria per compensare il ritiro in solidificazione con nuovo metallo di apporto e direzionare la solidificazione in modo da mantenere la materozza che serve da alimentazione sempre liquida. La materozza fornisce i giusti gradienti termici (assieme ai raffreddatori) per impedire di avere zone che solidificano isolatamente, sia macroscopicamente che microscopicamente. Il primo aspetto dipende da variazioni geometriche del getto che genera punti caldi. Infatti una barra a sezione costante con una materozza al centro non presenterà ritiri nemmeno se idealmente fosse di lunghezza infinita. Al limite potrebbero presentarsi dei ritiri sul bordo esterno inferiore della materozza. Il secondo aspetto del ritiro, ovvero la formazione del microritiro, è legata alla difficoltà di alimentazione di questa barra ideale attraverso il progressivo chiudersi delle dendriti lungo l'asse di simmetria. Per ottenere un getto sano sarebbe necessario esercitare una pressione sul pelo libero della materozza in modo da forzare il passaggio di liquido attraverso le dendriti in tutti i punti del getto.

Nelle prossime due sezioni verranno individuate le condizioni per la solidificazione del getto e l'alimentazione su due ordini di grandezza. Il ritiro dipende dalle differenze tra i moduli delle varie parti del getto, quindi lo si evita valutando bene il rapporto che c'è tra i moduli dei vari componenti del getto e della materozzatura. La valutazione della tendenza al microritiro invece avviene valutando localmente le condizioni del campo termico, che predice le condizioni di microalimentazione dei ritiri interdendritici.

3.3.1 Criteri di progettazione per ottenere l'assenza Il ritiro

Il ritiro e la regola di Chvorinov

La stima del carico da aggiungere ad un getto può essere ottenuta valutando i moduli per i vari componenti della forma. Infatti stimando il tempo di solidificazione di un getto e della sua materozza si può imporre variando i parametri quale sia il primo a solidificare. Senza

k_{mo}	0,63 W/mK
ρ_{mo}	1450 kg/m ³
c_p^{mo}	1050 J/gK
c_p^{me}	1000 [J/Kg°C]
ΔH	480 [KJ/Kg]
ρ_{me}	2,7 [Kg/Lt]

Tabella 3.3 – Parametri termodinamici dell'alluminio e della sabbia silicea per il calcolo della costante di Chvorinov

considerare l'evaporazione di leganti della forma si può utilizzare la regola di Chvorinov[3]:

$$t = C_C \left(\frac{V}{A} \right)^2 = C_C M^2 \quad (3.21)$$

Dove la costante C_C è esprimibile come:

$$C_C = \frac{\pi}{4} \frac{\rho_{me}^2 (-\Delta H)^2}{(T_i - T_0)^2 k_{mo} \rho_{mo} c_p^{mo}} \quad (3.22)$$

Bisogna considerare per lo spostamento dei getti un tempo superiore, in quanto vi è la necessità di non deformarli e quindi di distaffarli quando la temperatura è sufficientemente bassa da consentire una rigidità sufficiente a resistere alle sollecitazioni della distaffatura. Al tempo che ci fornisce la regola di Chvorinov è quindi necessario aggiungere il tempo sufficiente per portare il getto ad una temperatura che si può stimare inferiore ai 300 °C. La costante C_C diventa quindi:

$$C_C = \frac{\pi \rho_{me}^2 (-\Delta H - c_p^{me} \Delta T)^2}{4 (T_i - T_0)^2 k_{mo} \rho_{mo} c_p^{mo}} \quad (3.23)$$

I valori per il calcolo per un getto di alluminio in una forma in sabbia sono riportati in tabella 3.3. Un'ulteriore semplificazione per trattare il problema secondo queste equazioni deriva dall'ipotesi che il getto non perda il contatto con la forma. Altrimenti sarebbe necessario considerare la trasmissione del calore del *gap* gassoso tra forma e metallo appena solidificato.

Vincoli geometrici tramite la regola di Chvorinov

Affinché una materozza possa funzionare, deve mantenersi liquida più a lungo del getto, in modo da poter alimentare di liquido fino alla completa solidificazione. La condizione per tale comportamento è quella di avere un tempo di solidificazione della materozzatura inferiore a quella del getto. Per la materozza singola il volume necessario è derivato dall'uguaglianza dei moduli del getto e dei moduli della materozza ($M_C = M_F$). Tenendo conto del ritiro in solidificazione β [4]:

$$V_F = V_c \frac{\frac{A_F}{A_C} \sqrt{\frac{C_C}{C_F}} + \beta}{(1 - \beta)} \quad (3.24)$$

Buona norma sarebbe progettare cautelativamente la materozza più grande di quella che ci fornisce la semplice uguaglianza, poiché la materozza deve essere l'ultima a solidificare. Se il tempo di solidificazione segue la legge espressa nell'equazione 3.21, la materozza dovrebbe solidificare dopo risultando in una proporzione empirica tra i tempi e quindi tra i moduli, ovvero rispettando la proporzione: $M(F) = 1.2M(C)$. L'efficienza della materozza è misurata come:

$$\varepsilon_F = \frac{V_{UT}}{V_F} \quad (3.25)$$

Cioè come il rapporto tra il volume utile, cioè quello che dalla materozza è andato ad alimentare il getto, e il volume della materozza. Il volume utile è la differenza tra i volumi della materozza liquida e della materozza solida. Sarebbe ideale la condizione in cui la materozza è completamente svuotata, ma la condizione reale migliore è quella in cui il cono di ritiro non oltrepassa il collo della materozza.

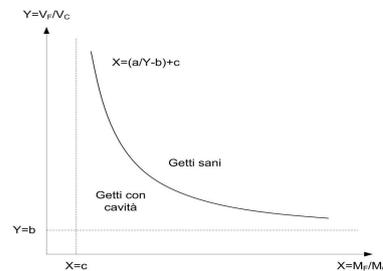


Figura 3.5 – Rappresentazioni delle soluzioni per il dimensionamento del carico di alimentazione in funzione dei moduli e dei volumi relativi

Il diagramma di Caine

Il diagramma di Caine (Figura fig. 3.5) è utile in quanto fornisce un semispazio per le soluzioni della progettazione della materozzatura; infatti la pratica di moltiplicare per 1,2 il modulo del getto si trova come un punto sulla curva. Risulta a colpo d'occhio che il risultato della progettazione dovrebbe stare sul confine della curva, poiché al di sopra aumenta il rapporto tra il volume della materozza e quello del getto. La curva è descritta dalla seguente equazione:

$$Y = \frac{\beta X}{(1 - \beta)X - \frac{C_C}{C_F}} \quad (3.26)$$

3.3.2 Metodi per la valutazione della porosità da microritiro

Oltre ad evitare il fenomeno del ritiro, bisogna garantire un getto privo di porosità. Per valutare la presenza di microritiro è necessario conoscere il campo termico in funzione del tempo punto per punto. Lo studio e la prova di seguito effettuata ha lo scopo di valutare tramite la rilevazione delle porosità di un getto di prova la correlazione che c'è tra il campo termico locale ed il microritiro. Poiché il campo termico è determinato per un dato getto dalla localizzazione delle alimentazioni e dei raffreddatori, l'analisi delle distanze dalla materozza alle quali si comincia ad avere porosità permette una valutazione molto semplice della soluzione al problema della progettazione. In altre parole una volta determinata la correlazione tra gradiente termico e porosità e tra gradiente termico e distanza dalla materozza, la relazione che la progettazione deve tenere in considerazione è quella che fornisce la distanza di alimentazione.

Tramite la realizzazione di un getto di prova come in Figura 44 si può valutare quale sia la distanza di alimentazione di una determinata materozza per una geometria molto allungata (monodimensionale). Tramite considerazioni geometriche è possibile dedurre le proprietà nel caso bidimensionale della lastra ed il caso tridimensionale di un getto massiccio. Lo scopo dell'esperimento è quindi valutare quali sono le condizioni locali per la comparsa del microritiro e quindi stimare la distanza di alimentazione monodimensionale per una data materozza come punto più distante che presenti una porosità accettabile.

Distanza di alimentazione

Le linee di solidificazione all'interno del getto cominciano dai punti di prima solidificazione, passano nelle zone intermedie e terminano sulle zone che rimangono liquide fino alla fine. L'alimentazione della solidificazione invece segue il percorso opposto, dalle regione ad alta temperatura a quelle adiacenti al fronte di solidificazione. Tale percorso si chiama percorso di alimentazione e risulta evidente come una linea qualsiasi termini su un solo punto ad alta temperatura, che alimenta tutti i percorsi che vi terminano. Idealmente tutti i punti caldi devono trovarsi all'esterno del getto, negli alimentatori. La distanza dal punto caldo al punto più lontano che esso alimenta è chiamata distanza di alimentazione. Come nel disegno in figura fig. 3.6, la distanza di alimentazione è definita come la distanza alla quale una materozza riesce ad alimentare il getto, ossia quando non sono presenti microritiri, o al limite ritiri in zone centrali (scure in figura). L'alimentazione della manica riuscirà ad impedire micro-ritiri fino ad una certa distanza A, oltre la quale i microritiri non avranno l'opportunità di essere alimentati. Gli effetti del campo termico inducono anche ad una alimentazione "al contrario", ossia l'effetto punta dissiperà calore più velocemente (a causa del modulo minore) e vicino alle estremità non ci sarà quindi ritiro fino ad una certa distanza E. Utilizzando un raffreddatore si otterrà un aumento della alimentazione a causa dell'aumento del modulo (si può immaginare un aumento fittizio di superficie a causa del raffreddatore). Nel caso il canale sia orizzontale il sistema ha simmetria radiale,

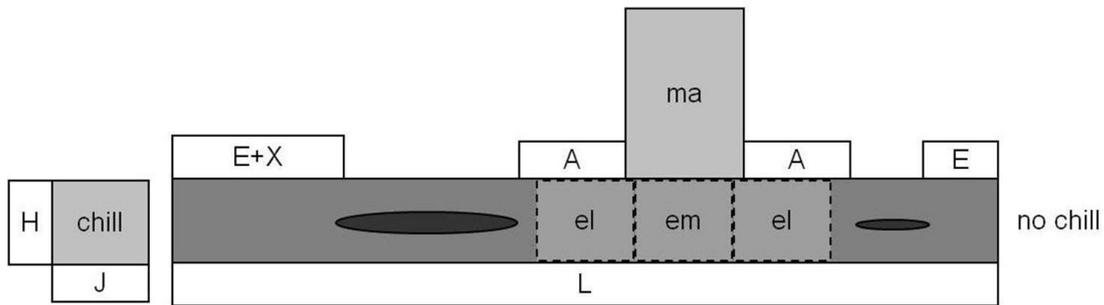


Figura 3.6 – Indicazione sulle alimentazioni derivanti dalla materozza e dalla punta; si vedono le sezioni longitudinali e trasversali. Il provino sperimentale non contiene alcun raffreddatore ed è molto più allungato.

nel caso il canale sia verticale vi è una differenza tra zona di influenza sopra la materozza cieca e la zona sotto.

3.3.3 Criterio di Niyama e la previsione della porosità

Le porosità nelle leghe d'alluminio possono essere identificate prevalentemente come derivate da fenomeni di ritiro o come intrappolamento di gas; il criterio di Niyama per la previsione delle porosità si riferisce solo a quelle dovute alla conseguenza del ritiro in solidificazione.

Il ritiro che le leghe generalmente presentano deriva dalla diminuzione di volume che si presenta durante i cambiamenti di fase e dall'impossibilità del liquido di raggiungere zone del getto che sono isolate dalla progressione della solidificazione. Infatti durante la solidificazione con presenza di diminuzione di volume, il liquido residuo deve andare a riempire il volume che non è più occupato dal momento che la lega solidifica e ritira. Generalmente i ritiri di grandi dimensioni si formano dove la solidificazione presenta un ritardo rispetto alle zone circostanti e dunque nelle zone che rimangono liquide ed isolate; la genesi dell'isolamento dipende dal campo termico, che presenta "punti caldi" attorno ai quali la lega tarda a solidificare. Questi punti caldi dipendono o da variazioni delle proprietà dei materiali come la conduttività e la capacità termica o da variazioni geometriche che alterano il rapporto tra i moduli delle varie zone. Questo tipo di ritiri è sempre causato dalle condizioni del campo termico e non dalla presenza di gas.

La presenza di gas invece genera piccoli vuoti di forma generalmente regolare. Si è rilevato che nel processo utilizzato per colare i getti di prova la concentrazione di gas è molto piccola e la presenza di effervescenza da gas è rara ed occasionale. Si può quindi ipotizzare che la presenza di porosità sia generalmente da ricercare altrove e che nella predizione del fenomeno essa abbia un effetto trascurabile.

La porosità dunque può avere una causa prettamente metallurgica. Il fenomeno si manifesta perché in alcune zone molto piccole la lega liquida rimane isolata. Questo può accadere solamente se la crescita del fronte solido non è cellulare ma dendritica, cosic-

ché le zone alla radice della dendrite rimangono isolate a causa della crescita dei bracci secondari. Tanto più si passa dalla morfologia cellulare alla dendritica tanto più saranno presenti delle micro-zone che non saranno alimentate. È intuitivo dedurre che più la dendrite è allungata più il getto sarà poroso e le dimensioni dei pori saranno grandi. Le dendrite si presenteranno allungate nei seguenti casi:

- L'intervallo di solidificazione è ampio.
- La temperatura diminuisce lentamente.
- Sono presenti di elementi basso-fondenti.
- Il gradiente del campo termico è basso.

Esistono vari modelli di predizione del fenomeno delle porosità, che includono l'influenza dei gas disciolti. Essi sono divisi in più categorie:

- Soluzioni analitiche
- Modelli con criterio empirico
- Soluzioni numeriche derivate dalle equazioni di fluidodinamica (equazioni di Darcy) che considerano l'equazioni di continuità dell'energia e della massa
- Modelli che inglobano i modelli di diffusività dei gas di Flick.
- Modelli a previsione stocastica che considerano la nucleazione di pori e grani, combinando le leggi di diffusività e le interazioni tra porosità e microstruttura[12].

Il criterio di Niyama è un modello semplificato per la determinazione della porosità dei getti che dipende dal microritiro e non dalla presenza di gas. Tale criterio è derivato dalla legge di Darcy. Il principio su cui basa le sue predizioni è la misura dell'accrescimento dendritico e la valutazione dell'alimentazione delle zone liquide più in ritardo. Infatti, più la dendrite è allungata e più il materiale presenterà microritiri dovuti all'impossibilità di alimentare la solidificazione nella parte più vecchia della dendrite. Tale criterio si può estendere per la individuazione dei macroritiri, ma allo stato attuale della trattazione verrà utilizzato solo per la determinazione del grado di porosità.

La lunghezza delle dendrite è esprimibile in funzione del gradiente termico spaziale e della ampiezza della solidificazione secondo la:

$$l_d = \frac{T_L - T_S}{G} \quad (3.27)$$

Il tempo locale di solidificazione è invece esprimibile come:

$$t_S = \frac{T_L - T_S}{G v_d} \quad (3.28)$$

Il criterio di Niyama afferma che oltre un certo valore del parametro N non si presentano porosità. In seguito a questo ha impostato una relazione che esprime la porosità in funzione di N ; il prodotto avrà una classe di accettabilità per le porosità che determinerà un valore del parametro. Tale valore è determinato sperimentalmente in funzione delle leghe ed in funzione della morfologia del campo termico. il parametro di Niyama è:

$$N = \frac{G}{\sqrt{T}} \quad (3.29)$$

e deve essere sotto un certo valore critico per impedire la formazione di porosità. Analizzando l'equazione 3.29 si nota come il parametro N sia funzione dei due parametri a secondo membro, dunque lo è anche la profondità della zona mista da cui dipende la formazione del microritiro. La condizione critica di crescita colonnare è infatti è[7]:

$$\frac{Gmc_0}{T(k-1)D} \quad (3.30)$$

Dove m è la pendenza della linea di solidus, c_0 è la composizione della lega, k il rapporto tra le frazioni (*Equilibrium Distribution Coefficient*), D la diffusività. Il significato fisico della relazione di Niyama si può intuire facendo le seguenti considerazioni:

- Gradienti termici spaziali meno accentuati inducono lunghezze della dendrite maggiori
- Lunghezze maggiori della dendrite significano più difficoltà di riempimento delle radici di dendrite (vicino al punto di solidus)
- Velocità maggiori di solidificazione ostacolano il riempimento delle radici

Considerando il salto di pressione idraulica resistiva che risulta lungo la dendrite si possono scrivere le seguenti relazioni:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{\mu f_L}{K} v \quad (3.31)$$

Che con le opportune sostituzioni diventa:

$$\Delta P = \frac{M}{N^2} \quad (3.32)$$

Si vede quindi che all'aumentare del coefficiente di Niyama aumentano le resistenze fluidodinamiche da vincere per avere una corretta alimentazione.

In letteratura[7] si stabilisce che se $N < 0.25 \div 0.30$ nelle leghe d'alluminio si formeranno microritiri. Il parametro si alzerà se il gradiente locale spaziale di temperatura si alza o se il gradiente temporale si abbassa, in buona sostanza se lo scambio termico aumenta. Infatti in questi casi la dendrite diventerà più corta e sarà possibile l'alimentazione verso la sua base. Inoltre N dipende dall'intervallo di solidificazione, e se più alto allunga le dendriti.

G	Bishop et al.	1951
$\frac{G}{v_d}$	Davies	1975
$\frac{1}{v_d^n}$	Khan	1980
$\frac{G}{\sqrt{T}}$	Niyama et al.	1982
$\frac{G}{v_d}$	Lecomte-Beckers	
$\frac{G^{0.33}}{v_d^{1.67}}$	Lee et al.	1990
$\frac{G^{0.38}}{v_d^{1.62}}$	S. T. Kao et al.	1994
$\frac{1}{t_s^m v_d^n}$	F. Chiesa	1998
$0,152432 \cdot N^{-0,604331}$	F. Syvertsen	1998

Tabella 3.4 – Criteri di valutazione delle porosità da ritiro

Ci sono molte specificazioni sul tipo di alimentazione interdendritico; il campo di interesse della prova sperimentale non è però capire nel dettaglio il tipo di alimentazione, ma fornire un criterio per la previsione della comparsa dei microritiri, qualunque sia il tipo di alimentazione, quindi con validità approssimativamente generale, cercando cioè la correlazione numerica influenzata dai vari fattori metallurgici tutti allo stesso tempo. Una approssimazione è sicuramente quella che si assume verso la fine della solidificazione, per l'indifferenza al deterioramento dei coefficienti di trasmissibilità del calore del getto e della forma. Ci sono anche molti altri criteri per la predizione del microritiro[7]: tutti i criteri in tabella 3.4 sono riducibili alla forma più generale G^x/v_d^y . Sebbene molte pubblicazioni si riferiscano alla alimentazione di piastre, per ridurre la complessità si è pensato di studiare l'alimentazione ed il microritiro su una barra a sezione quadrata.

Considerazioni sull'influenza della temperatura di colata

La dipendenza del campo termico dalla temperatura di colata è in ragione del fatto che con temperature di colata più alte, rimanendo invariati gli altri parametri, si hanno i seguenti risultati:

- La forma ha più calore da smaltire ed il raffreddamento del getto è più lento, una volta raggiunti i punti di solidificazione, che sono comunque raggiunti prima a causa dell'avvicinamento alle condizioni teoriche di equilibrio dei diagrammi di stato, la struttura dendritica diventa più grossolana.
- Sebbene le proprietà meccaniche possano peggiorare a causa di una grana di dimensioni superiori, si nota una diminuzione del fenomeno del microritiro, poiché è più facile alimentare le cavità interdendritiche.

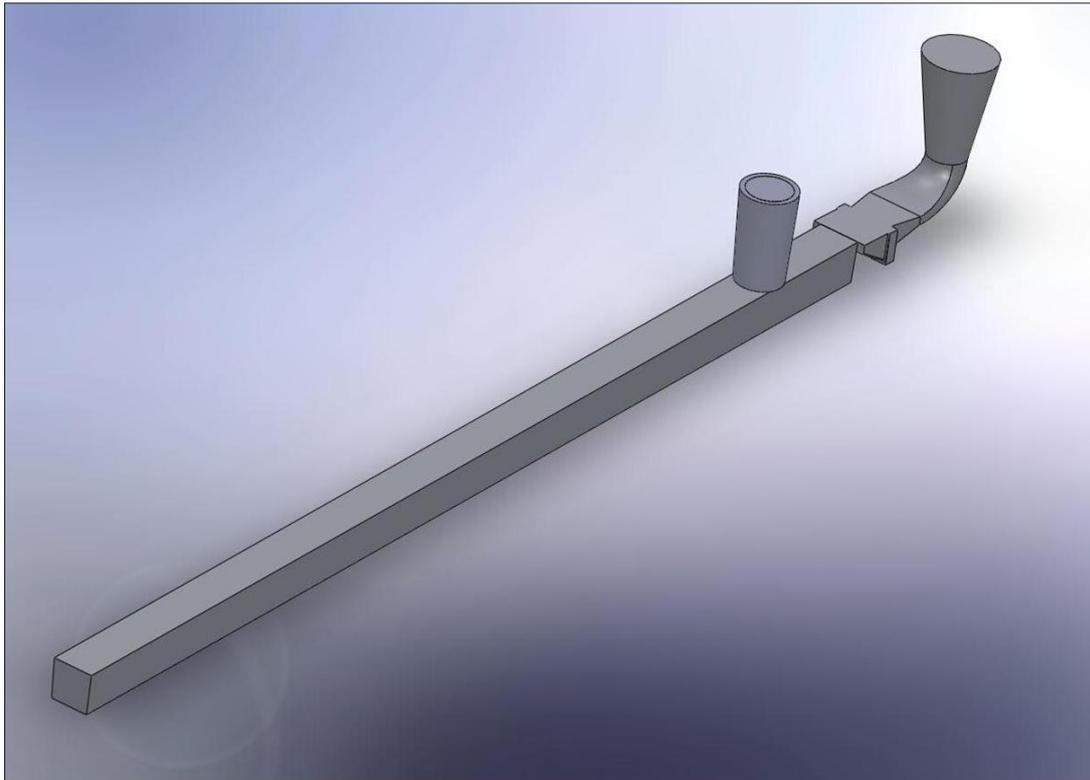


Figura 3.7 – Barra di test sulla distanza di alimentazione; le dimensioni sono 1500x44x44 mm; la materozza è posta a 150 mm dall'estremo ove ha sede l'attacco con filtro. LA materozza ha un diametro di 60 mm ed un'altezza di 150mm.

- Per le leghe Al-Si, a cuore la struttura potrebbe comunque risultare più resistente meccanicamente, a causa dell'assenza di enucleazione eterogenea durante l'operazione di colata, che causerebbe un eccessivo ingrossamento dei grani interni per un tempo di crescita del grano eccessivamente lungo[12].
- A causa del raffreddamento più lento le condizioni metallurgiche sono più vicine al diagramma di stato, con sottoraffreddamenti e solubilità inferiori.

La progettazione del campione di prova con il calcolo dei moduli

Per poter studiare il parametro di Niyama è necessario possedere le informazioni sul campo termico. La rilevazione dell'andamento delle temperature nell'arco del tempo e in punti diversi permette con geometrie semplici di ottenere queste informazioni, elaborate successivamente con l'analisi termica. L'analisi termica è l'elaborazione dei dati della curva di raffreddamento con lo scopo di ottenere informazioni sulle modalità di solidificazione di un metallo. La curva di raffreddamento è la curva che traccia la temperatura in funzione del tempo, presa dall'istante in cui la lega è completamente liquida fino al termine di tutte le trasformazioni di fase. Mediante lo studio delle derivate è possibile identificare tutti

i passaggi di fase caratteristici della solidificazione di una certa lega. In questo modo si ricavano tutti i parametri termodinamici necessari alla caratterizzazione completa della solidificazione punto per punto. Tramite l'acquisizione e l'analisi termica successiva si possono identificare le grandezze necessarie alla costruzione del parametro di Niyama per i vari punti rilevati. Le attività per realizzare la prova sono dunque costituite da:

1. progettazione del campione,
2. la realizzazione del modello,
3. formatura e ramolaggio con inserimento delle termocoppie,
4. colata con campionamento delle temperature sui sensori,
5. analisi termica ed elaborazione dei dati,
6. rilevazione quantitativa delle porosità,
7. valutazione di Niyama e della distanza di alimentazione.

L'alimentazione della barra è stata progettata con i criteri già espressi al paragrafo in cui si parla dei criteri di progettazione per ottenere l'assenza di ritiro (cfr. 3.3.1). In figura fig. 3.8 è rappresentato un getto di prova che garantisce a causa dell'aumento del modulo verso la materozza una solidificazione progressiva da sinistra a destra. Si intuisce facilmente da una simile geometria che per progettare l'assieme delle materozze è utile suddividere il getto in parti, su ciascuna delle quali si potrebbe posizionare una materozza,

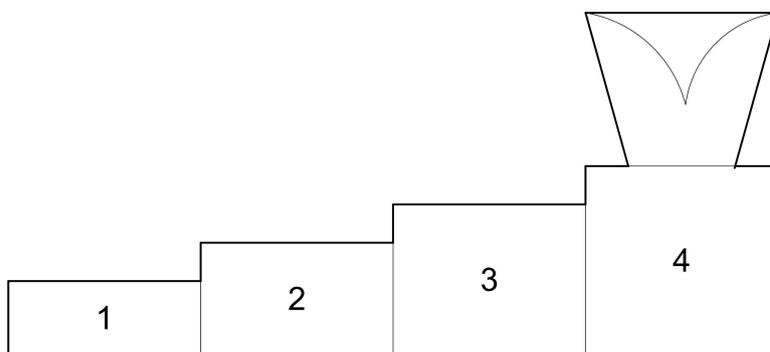


Figura 3.8 – Esempio di corretto dimensionamento dei moduli per un getto di prova a gradini: i moduli delle varie sezioni sono decrescenti in modo da portare la solidificazione da sinistra a destra e localizzare il ritiro in solidificazione tutto in materozza.

in base alla distanza di alimentazione. Si calcola poi il modulo di ciascuna parte e si cerca di ottenere una sequenza di parti in modo che il modulo cresca, al fine di alimentare una parte con la successiva fino all'ultima, che è alimentata dalla materozza. In figura il modulo delle varie sezioni cresce fino all'ultima, dove vi è la materozza. Di conseguenza la solidificazione comincia nella sezione più stretta e l'alimentazione della sezione 1 avviene

Dimensioni materozze	d60 x h150
Modulo materozza	1.75
Modulo sezione sottostante la materozza	1.46
Modulo elementi intermedi	1.10
Sezione quadrata risultante: H = J	44

Tabella 3.5 – Risultato del calcolo del modulo della materozza e degli elementi vicini

tramite la 2 e così via.

Per semplificare l'esecuzione delle prove è stato realizzato un modello a sezione quadrata al posto della sezione circolare, sebbene quest'ultima sia più semplice per lo studio del profilo di temperatura. Sono stati calcolate le distanze di alimentazione secondo le seguenti formule[4] il cui calcolo va effettuato usando i centimetri come unità di misura:

$$A = FD1,5t \quad (3.33)$$

$$E = FD(6\sqrt{t} - 1,5t) \quad (3.34)$$

$$X = FDt \quad (3.35)$$

Il parametro t è la sezione della barra quadrata. Il parametro F_D è variabile secondo la lega, ma per il calcolo delle lunghezze necessarie a presentare ritiri è stato preso cautelativamente pari al massimo risultante, cioè pari a 2,5. Il calcolo dei moduli è avvenuto a ritroso supponendo di utilizzare un certo tipo di manica[5] (la cui misura è data ed è d60 x h150) e ottenendo dai moduli risultanti le sezioni appropriate dalla condizione che il rapporto tra i moduli sia 1,2, in particolare il modulo M_{ma} è 1,2 volte quello di M_{em} . Il modulo degli elementi vicini è chiaramente vincolato, in quanto la barra ha una sezione costante. In tabella 3.5 è stato inserito il risultato del calcolo relativo ai moduli, dove l'unica incognita è la sezione.

Nella figura fig. 3.6 sono rappresentate le distanze caratteristiche di alimentazione in una barra. Le zone scure sono le zone che presenteranno microritiri. La presenza di ritiri, come si è già spiegato nelle sezioni dei difetti, è legata alla presenza di deviazioni del campo termico generata da configurazioni geometriche. In questo caso dunque non si manifesterà alcun ritiro nelle zone centrali, ma semplicemente della porosità.

Le distanze visibili in figura sono definite come le distanze alle quali non si troverà presenza di porosità da microritiri. La distanza E è quella che risulta dal contributo al campo termico della punta della barra. La componente X è la risultante dell'effetto di raffreddamento provocato da una conchiglia. Le distanze A sono invece i contributi alla direzionalità del campo termico che nascono dalla presenza della materozza. In tabella 3.6 sono riportate

A	E	X	A+E	A+E+X	L_{min} barra	L campione
16,5	15,0	11,0	31,5	42,5	73,9	1500

Tabella 3.6 – Risultato del calcolo teorico delle distanze di alimentazione secondo le equazioni 3.34, 3.33 e 3.35 con una sezione del provino di 44 mm di lato

le misure ricavate per il dimensionamento del provino, che ha una sezione quadrata di lato 44 mm, come riportato in tabella 3.5.

Per cautelarsi dalle normali variazioni del processo di fonderia, si è approssimativamente moltiplicato per due la lunghezza risultante dalla somma $L_{min} = A + E$, cioè sul lato della barra opposto all'attacco di colata. Il risultato è una barra come quella di figura fig. 3.8 che studia la lunghezza di alimentazione e l'effetto punta cercando di evidenziare le porosità con un allungamento pronunciato. Si è fatta l'ipotesi semplificativa che le deformazioni del campo termico lungo la lunghezza, introdotte dalla presenza del canale di colata (e quindi di un punto caldo) da un lato della materozza, siano trascurabili oltre la materozza dall'altro lato.

Posizionamento delle termocoppie

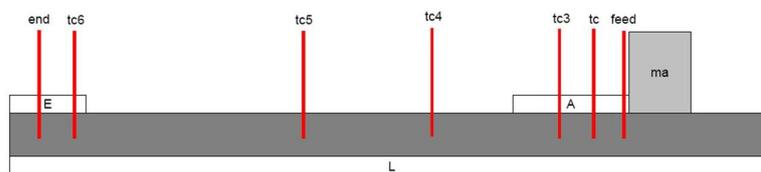


Figura 3.9 – Schema di applicazione delle termocoppie sul provino.

Per la determinazione di N tramite la rilevazione della temperatura nello spazio e nel tempo sono state inserite 7 termocoppie la cui punta è stata posizionata sull'asse centrale longitudinale del getto, per stabilire l'andamento del campo termico sulla linea centrale lungo il percorso che l'alimentazione si suppone faccia in ultimo. Su tale sezione longitudinale si dovranno rilevare i valori di G , che sarà quindi diretto teoricamente dalla materozza verso la punta e dunque secondo la direzione di alimentazione. Per ogni termocoppia inserita sono stati rilevati gli andamenti nel tempo. Inoltre è stata calcolata la curva di temperatura su tale linea e ricavata tramite interpolazione curvilinea (l'equazione di trasmissione del calore ci fornisce l'andamento) e quindi G si conosce G in ogni punto. Il terminale delle 7 termocoppie è stato posizionato lungo l'intersezione dei piani di simmetria anche se in realtà è stato dato uno sforno di 2° al modello per l'estrazione dalla forma.

In tabella 3.7 ed in figura fig. 3.9 sono riportate le posizioni e le distanze dal centro della

Feed	Tc1	Tc2	Tc3	Tc4	Tc5	End
50	110	160	390	910	1180	1260

Tabella 3.7 – Distanze espresse in mm delle termocoppie dall'asse centrale della manica

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn
8,84	0,575	0,965	0,2505	0,3985	0,0305	0,2515

Tabella 3.8 – Analisi chimica della lega utilizzata per la prova

materozza alle quali sono state inserite le termocoppie attraverso la semiforma superiore; sono state protette con un guscio di ferro, fissato alla sabbia con cordini e colla speciali per fonderia in sabbia.

Lega utilizzata

La lega utilizzata per eseguire la prova sperimentale è la AB-46400 (AlSi9Cu1Mg). Il bagno liquido ha subito i processi di degasaggio con flussaggio di Argon e di affinazione al boro-titanio, ma nessuna modifica è stata fatta dopo la spillatura. L'affinazione del grano tramite TiB_2 sicuramente influenza la quantità e la dimensione dei microritiri, in quanto aumenta il numero di dendriti presenti. Tutti i calcoli effettuati successivamente non sono numericamente validi per leghe non affinate.

È stata eseguita l'analisi chimica della lega utilizzata dopo la colata nella forma. Lo scopo dell'analisi è il calcolo della temperatura teorica di eutettico. I valori principali rilevati tramite "Spectromaxx" sono riportati in tabella 3.10. Il calcolo del valore di temperatura dell'eutettico teorico dà un risultato di 568.26, che non è tanto attendibile o per lo meno risulta inferiore a quello misurato (come si risulterà nella sezione 3.3.3), fisicamente impossibile se si tiene conto della deviazione del diagramma di stato per la velocità della trasformazione.

Realizzazione della prova e delle misure

La realizzazione del campione ha seguito le normali procedure di produzione, con l'aggiunta delle termocoppie in fase di ramolaggio. La colata è stata fatta ad una temperatura di 756 °C; all'analisi micrografica successiva non si sono notati porosità dovuti a presenza di gas. Come suggerito da Overfelt[10] la presenza di porosità dovute a presenza di gas o la presenza di ossidi rende le previsioni dei modelli di comportamento del microritiro inaffidabile. Lo studio qui compiuto non considera infatti i modelli che predicano l'evoluzione dei gas discolti in bagno, come quelli ad esempio fatti da Minami[11]. In ogni caso il processo

utilizzato per la prova ha la capacità di ridurre notevolmente la quantità di gas disciolti. Dopo la sterratura il campione è stato sezionato in spezzoni da 60 mm, che sono stati successivamente tagliati lungo l'asse centrale e lucidati fino al panno da 1 μm . Di seguito vedremo le misure rilevate delle temperature, dello SDAS e della porosità

Curve T-t

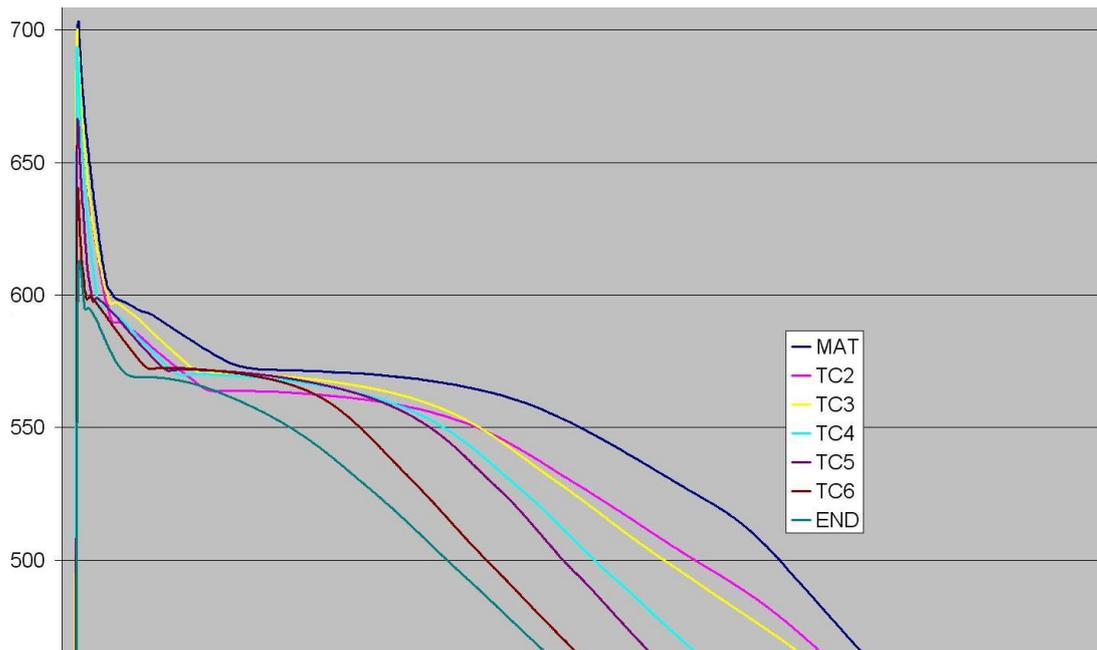


Figura 3.10 – Andamento nel tempo per i sette punti misurati.

Il risultato della campionatura delle temperature lungo la barra ha prodotto le curve di raffreddamento dei punti in corrispondenza delle termocoppie. Poiché dall'osservazione della curva si nota che la termocoppia è arrivata oltre alla temperatura di liquidus si deduce che l'effetto raffreddante della termocoppia e del suo cappuccio sia trascurabile.

In Figura fig. 3.10 sono tracciati gli andamenti delle termocoppie così come sono stati campionati dal sistema. La rilevazione è cominciata contemporaneamente su tutte sette le termocoppie. Al momento della colata le temperature sono salite fino a raggiungere la temperatura della lega con cui erano a contatto, fino al picco massimo. Successivamente hanno seguito la temperatura del metallo con cui erano a contatto.

La temperatura del bagno in siviera misurata subito prima l'operazione di colata in forma ha rilevato una temperatura di 756°C. Si nota immediatamente come vi sia una notevole differenza tra le termocoppie; la più vicina all'attacco ha raggiunto tramite il continuo apporto di lega calda una temperatura di 703°C, mentre la più lontana (1210 mm oltre) un valore di 612°C, con una perdita di oltre 50°C nel sistema di colata ed una di oltre 90°C fino alla parte più lontana del getto.

Si nota come la temperatura non sia sempre decrescente. Con il calo di temperatura infatti, la lega raggiunge le condizioni del diagramma di fase in cui la condizione di equilibrio è quella solida. Poiché il diagramma di stato rappresenta le condizioni ideali per raffreddamenti molto lenti, il comportamento reale sarà influenzato dalla velocità di raffreddamento; tanto più è veloce tanto più la lega comincerà la solidificazione sotto la temperatura di equilibrio. Si presenta dunque il fenomeno del sottoraffreddamento, con la modifica dei diagrammi di stato secondo le condizioni dinamiche della trasmissione del calore. Quando la lega comincia a solidificare, il cambiamento di fase rilascia il calore latente di solidificazione, che rallenta o addirittura inverte l'andamento della temperatura nel caso in cui la dissipazione del calore sia inferiore all'apporto calorico: quest'ultimo caso è definito come fenomeno di ricalescenza. Le fasi che solidificano successivamente, come l'eutettico, si comportano in modo simile, presentando anch'esse un rallentamento od un riscaldamento della lega.

Nella figura fig. 3.11 a sinistra è stato ingrandito l'andamento della nucleazione, do-

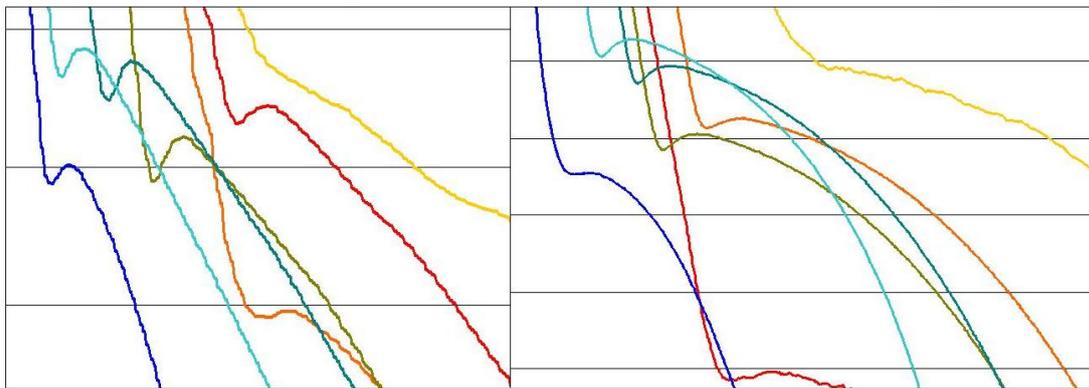


Figura 3.11 – A sinistra è stato riportato il dettaglio degli andamenti delle temperature in nucleazione; a destra c'è il dettaglio delle temperature durante l'inizio della solidificazione eutettica

ve si nota una ricalescenza su tutte le termocoppie tranne che su quella più vicino alla materozza, dove la quantità di calore emesso non è stata sufficiente a superare la dispersione. Nella produzione dei getti in alluminio è consigliabile ottenere una grana primaria più fine possibile. Poiché il numero di nuclei che si formano è funzione del sottoraffreddamento raggiunto, dove le dispersioni termiche sono elevate si ottiene una grana molto fine. Nei processi di fonderia in sabbia, con getti di grandi dimensioni la grana tenderà ad essere molto grossolana, a causa della bassa dispersione di calore e quindi di un andamento termico meno pendente dei getti colati ad esempio in conchiglia. Per queste ragioni è quindi necessario nei processi di fonderia introdurre sistematicamente l'affinazione del grano. Il trattamento di affinazione abbassa la barriera energetica necessaria al nucleo per germinare. Globalmente risulterà quindi un andamento termico con un minore sottoraffreddamento, e dunque dal suo andamento si possono dedurre le condizioni sull'affinazione della lega. Nel caso specifico, l'affinazione è avvenuta per l'introduzione in

bagno di barre contenenti TiB_2 .

Nella figura fig. 3.11 a destra è stato ingrandito l'andamento della solidificazione dell'eutettico. Anche nel caso di cambiamento di fase eutettica si ha un rilascio di calore. Per le leghe ipoeutettiche come quella utilizzata per la prova sperimentale si ottengono dei precipitati di silicio di forma aciculare e grossolani. Le dimensioni della grana silicea sono comunque funzione della dispersione termica. Nel caso della solidificazione eutettica, le proprietà meccaniche sono influenzate sia dalla dimensione dei cristalli di silicio, ma anche dalla loro forma. Inoltre la diversa morfologia del silicio implica anche una diversa lavorabilità in macchina per asportazione di truciolo. In particolare la modifica ha un effetto benefico sulle prestazioni in allungamento, rendendo la lega meno fragile. Con l'utilizzo dell'analisi termica, invece, il livello di modifica viene correlato direttamente alle curve di raffreddamento. Il parametro generalmente utilizzato è l'abbassamento della temperatura del plateau eutettico. Tale parametro viene correlato al grado di modifica ottenuto per vie tradizionali con l'analisi d'immagine. Maggiore è il valore di tale abbassamento, e maggiore sarà il livello di modifica del campione analizzato.

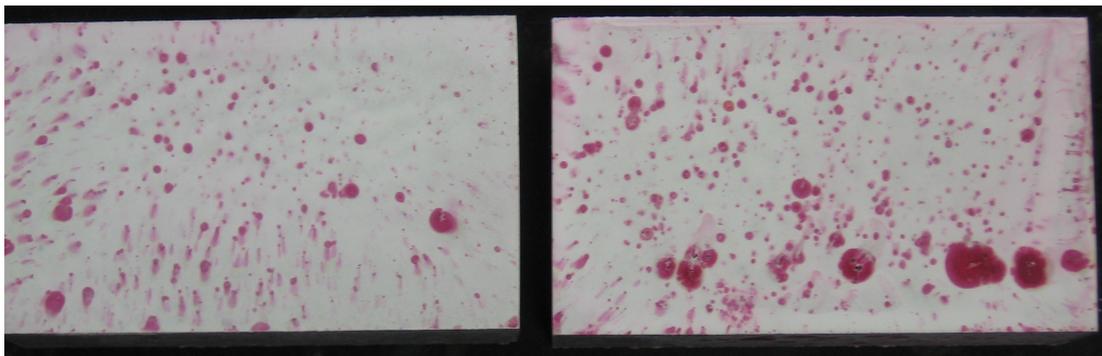


Figura 3.12 – Micrografie utilizzate per la determinazione dello SDAS

Misure della porosità e dello SDAS

L'analisi della porosità è stato fatto con un software di analisi d'immagine sui campioni tagliati longitudinalmente e lucidati fino alla carta da 4000. Tale analisi è stata fatta dunque in maniera quantitativa sul campione lucidato, dopo aver effettuato una prova ai liquidi penetranti. Si vede come sia possibile una analisi quantitativa sul campione fotografato in fig. 3.12, che ha subito la prova ai liquidi penetranti. L'effetto della conformazione del campo termico riflette benissimo sull'analisi quantitativa delle porosità presenti. Si può notare come nella parte centrale le porosità siano molto più significative di quelle rilevate alle estremità. Vicino alle due termocoppie centrali il campo termico non sembra essere stato sufficientemente direzionato per impedire la solidificazione contemporanea e quindi la presenza di punti non alimentabili.

La misura dello SDAS è stata rilevata con fotografia su microscopio ottico a vari ingran-

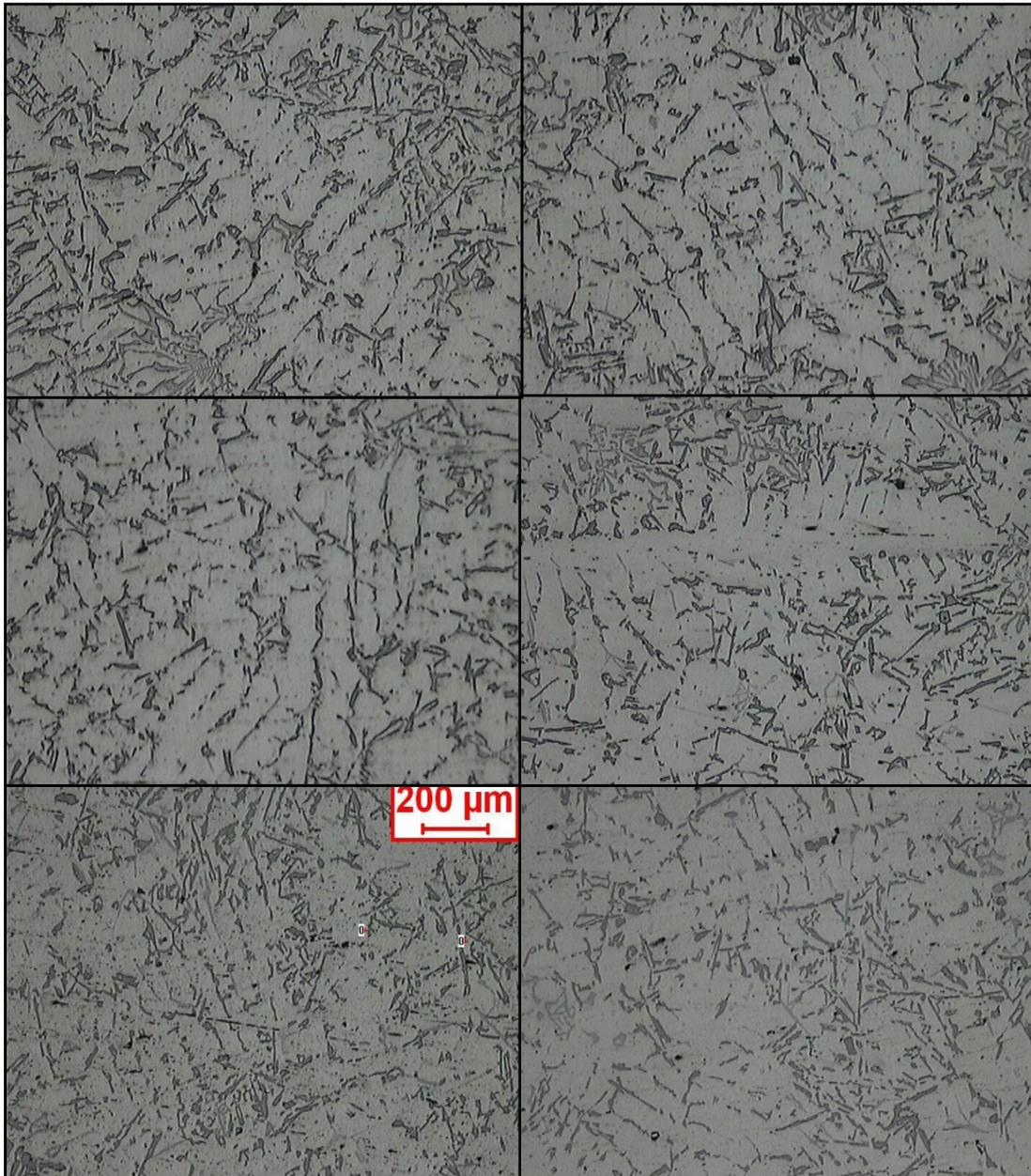


Figura 3.13 – Micrografie utilizzate per la determinazione dello SDAS

dimenti sui provini lucidati fino al disco con soluzione colloidale da $1 \mu m$.

L'assenza di un trattamento di modifica probabilmente ha portato ad una dispersione ed una incertezza maggiori dei valori rilevati, oltre alla difficoltà di individuare esattamente i confini dei bracci secondari poichè la lega presenta al microscopio una struttura molto aciculare e grossolana. I risultati delle misure sono riportati in tabella 3.9 e riportati graficamente in figura fig. 3.14 a sinistra.

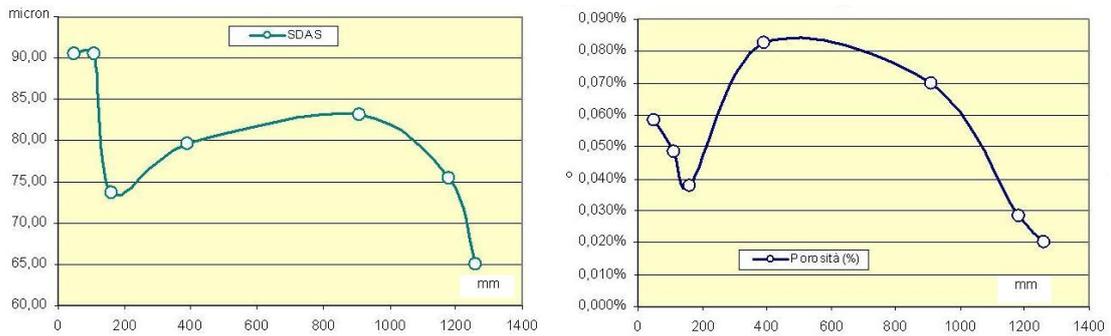


Figura 3.14 – A sinistra sono riportati i valori rilevati dello SDAS, a sinistra i valori della porosità

SDAS [μm]	Feed	Tc2	Tc3	Tc4	Tc5	Tc6	End
Media	90.43	90.43	73.69	79.63	83.05	75.42	64.96
Dev. Sdt.	11.06	11.36	12.27	9.96	11.33	12.43	8.31

Tabella 3.9 – Media e deviazione standard dello SDAS misurato attorno alle punte delle termocoppie

Valutazione della frazione solida per il calcolo di N

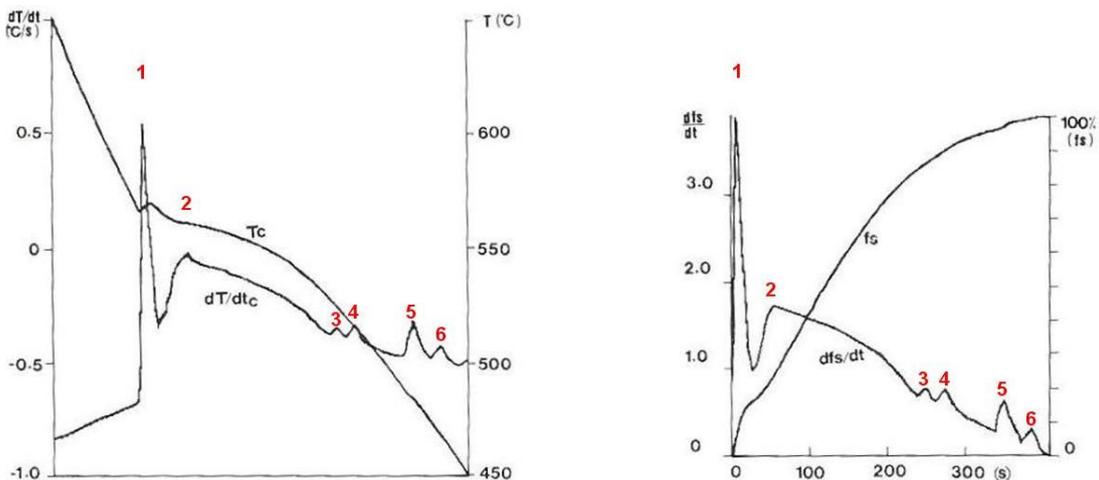


Figura 3.15 – Andamento dell'analisi termica per una lega studiata in letteratura (332.1) per la valutazione della frazione solida in corrispondenza delle varie trasformazioni.

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
9.9	0.67	2.82	0.25	0.91	0,97	0,097

Tabella 3.10 – Analisi chimica della lega presa ad esempio

Generalmente nei modelli che utilizzano il calcolo numerico[8] l'iterazione avviene prima che f_S diventi 1, di solito al 90% che è rappresentato circa dalla seguente temperatura:

$$T_N = T_S - 0.1(T_L - T_S) \quad (3.36)$$

Valutando il valore del parametro N a temperature superiori risulterebbe un valore inferiore del parametro, anche se il tipo di proporzionalità della relazione rimarrebbe inalterata.

Overfelt[10] rileva che il momento opportuno per il calcolo del parametro di Niyama è quando la solidificazione si trova tra 0.8 e 0.9. Infatti i gradienti calcolati quando la solidificazione è completa, sono influenzati dalla scomparsa del calore latente di solidificazione e quindi presentano una rapida caduta di temperatura ed un aumento drastica della velocità di raffreddamento. Inoltre i risultati migliori sono stati ottenuti con velocità di solidificazione massime (in prossimità di $f_S = 1$), poiché per le leghe di alluminio il calcolo di N fornisce un valore superiore se effettuato con la velocità media, che dunque cautelativamente non va preso come valore. Sempre lo stesso autore dimostra come l'eccessivo sovrarriscaldamento del bagno non abbia effetti sul valore di N , ma sicuramente la temperatura di colata influenza il campo termico nel getto in solidificazione.

Per valutare la frazione solida si è preso un riferimento sull'analisi termica effettuata su una lega 332.1 (secondo la codifica americana) di composizione chimica come in tabella 3.10, che ha molta somiglianza con la lega colata (AB-46400): L'analisi termica[14] per questa lega traccia l'andamento della solidificazione delle varie fasi, che sono identificate in tabella 3.11. In figura fig. 3.15 sono raffigurati gli andamenti in funzione del tempo. La frazione solida in corrispondenza dell'inizio delle trasformazioni 5 e 6 è all'incirca 96%. Prendendo una lega con composizione simile come può essere la lega EN AB 46400 si può ipotizzare che la solidificazione delle fasi con il rame sia sul 98%. Come si vedrà più avanti, le fasi presenti nella lega AB-46400 sono molto simili, ma dall'analisi termica non si distinguono i passaggi 3 e 4 e i passaggi 5 e 6, trovando variazioni di pendenza dell'andamento termico irrilevanti.

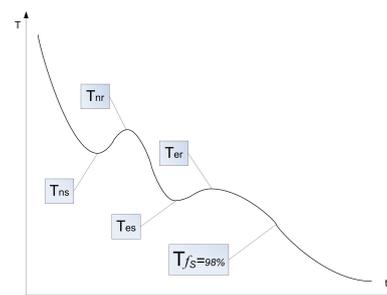


Figura 3.16 – Andamento schematico delle temperature in fase di solidificazione.

Indice	Reazione	T
1	Nucleazione primaria e $Al_{15}(MnFe)3Si_2$	568
2	$Liq. \rightarrow Al + Si + Al_5FeSi$	575
3	$Liq. \rightarrow Al + Si + Mg_2Si + Al_8Mg_3FeSi_6$	554
4	$Liq. + Mg_2Si + Si \rightarrow Al + Al_5Mg_8Si_6Cu_2$	529
5	$Liq. \rightarrow Al + Al_2Cu + Al_5FeSi + Si$	525
6	$Liq. \rightarrow Al + Si + Al_5Mg_8Si_6Cu_2$	507

Tabella 3.11 – Passaggi di stato della lega 332.1 con relativa temperatura di inizio trasformazione

Temperature significative e velocità di raffreddamento

Le temperature caratteristiche della solidificazione di una lega ipoeutettica come quella considerata nell'esperimento seguono l'andamento rappresentato in figura fig. 3.16; come evidenziato sperimentalmente, la nucleazione avviene con un certo ritardo rispetto alla temperatura teorica di nucleazione della fase α determinata dalla linea di liquidus del diagramma di stato. Le recalescenze in nucleazione ed in solidificazione eutetica sono tracciate in figura fig. 3.17. Inoltre il rilascio di calore del passaggio di fase può innalzare la temperatura contrastando notevolmente la dispersione termica. Le stesse considerazioni valgono per la trasformazione eutettica. Per la valutazione della temperatura a cui la lega è completamente solida, si veda il paragrafo precedente; il calcolo è stato fatto sull'ultimo minimo presente sulle curve derivate dell'analisi termica.

La velocità di raffreddamento prima della nucleazione è stata calcolata cercando di individuare un tratto abbastanza rettilineo non inferiore a T_{nr} . Il calcolo della correlazione tra SDAS e raffreddamento è stato effettuato considerando il raffreddamento invece sul tratto di curva caratterizzato dall'accrescimento dendritico, ovvero in un tratto sufficientemente rettilineo tra T_{nr} e T_{es} , poiché sembra che dia risultati più affidabili del calcolo effettuato sulla velocità di raffreddamento prima della nucleazione. In tabella 3.12 si trovano i valori delle temperature notevoli calcolate sulle curve rilevate dalle sette termocoppie. ΔT_n e ΔT_e sono calcolate come nelle equazioni 3.37 e 3.38.

$$\Delta T_n = T_{nr} - T_{ns} \quad (3.37)$$

$$\Delta T_e = T_{er} - T_{es} \quad (3.38)$$

Si noti che il raffreddamento in materozza è talmente lento da non generare un rilascio di calore della trasformazione sufficiente ad invertire l'andamento termico. Si nota come la termocoppia vicino alla materozza non rilevi recalescenza, indice che la trasformazione è lenta e quindi il rilascio di calore non è sufficiente ad invertire la tendenza imposta dalla

	feed	tc2	tc3	tc4	tc5	tc6	end
T_{ns}	602,24	589,59	596,66	594,52	597,46	598,30	594,42
T_{nr}	601,46	589,76	597,22	596,04	598,84	599,26	595,02
ΔT_n	-0,78	0,17	0,56	1,52	1,38	0,96	0,60
T_{es}	571,83	563,69	570,29	569,72	571,48	572,14	569,08
T_{er}	571,53	563,92	570,52	570,11	571,89	572,58	569,10
ΔT_e	-0,30	0,23	0,23	0,39	0,41	0,44	0,02
$\dot{T}_{Iniziale}$	-0,26	-0,24	-0,25	-0,32	-0,50	-0,56	-0,40
$T_{f_s=98\%}$	486,00	449,70	446,48	483,16	481,84	486,96	478,89
$\dot{T}_{f_s=98\%}$	-0,204	-0,164	-0,138	-0,168	-0,194	-0,186	-0,170

Tabella 3.12 – Temperature significative nei punti vicino alle 7 termocoppie che risultano dall'analisi termica dei campionamenti effettuati

dispersione del calore.

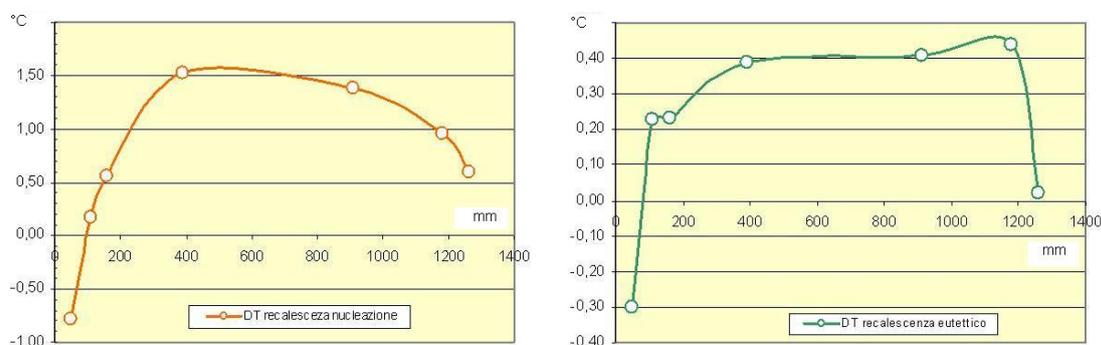


Figura 3.17 – A sinistra è riportata la recalescenza in nucleazione,, a destra la recalescenza in corrispondenza della solidificazione eutettica

Nei grafici in figura fig. 3.18 sono rappresentati gli andamenti interpolati delle velocità di raffreddamento in fase di accrescimento granulare (a sinistra) ed in corrispondenza del 98% della solidificazione. Si può notare il diverso andamento del raffreddamento in fase iniziale ed in fase finale; le considerazioni su questo fenomeno verranno espresse oltre. A sinistra è rappresentato l'innalzamento della temperatura dopo il minimo del sottoraffreddamento che, come detto precedentemente, è anche un indice del grado di affinazione introdotto in bagno. A destra è rappresentata l'interpolazione sulla lunghezza

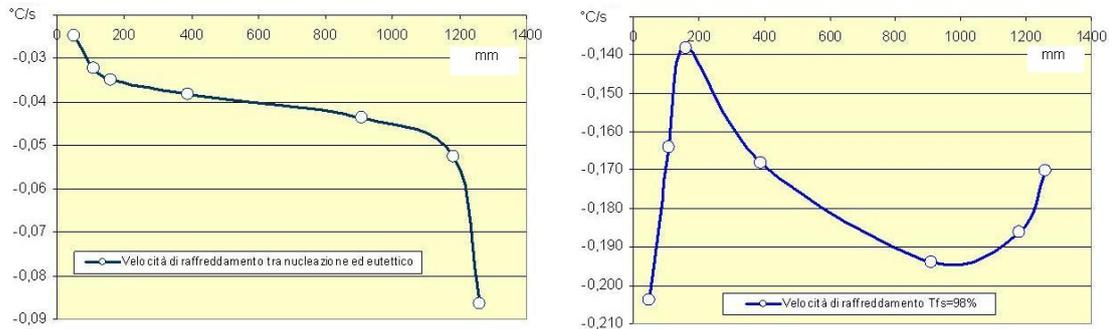


Figura 3.18 – A sinistra sono riportate le velocità di raffreddamento in corrispondenza della fase di accrescimento del grano; a destra invece in corrispondenza dell'ultima frazione liquida rilevabile a solidificare. In ascissa di entrambi i grafici si trova la distanza dal centro della materozza, in ordinata il gradiente temporale della temperatura.

dell'innalzamento di temperatura della solidificazione eutettica. Dall'analisi delle derivate delle curve di solidificazione sono emersi abbastanza bene gli andamenti termici al termine della solidificazione, dove solidificano i composti intermetallici a più basso punto di fusione. Quelli con maggior rilascio di calore sono i passaggi di fase del magnesio e del rame. Per il calcolo del parametro di Niyama sono stati presi in considerazione gli ultimi minimi rilevabili su tali curve, che potrebbero con buona approssimazione corrispondere a circa il 95% della solidificazione. Sono risultate visibili le trasformazioni dei composti intermetallici bassofondenti che corrispondono alle ultime frazioni liquide che solidificano. A sinistra è rappresentato l'innalzamento della temperatura dopo il minimo del sottoraffreddamento che, come detto precedentemente, è anche un indice del grado di affinazione introdotto in bagno. A destra è rappresentata l'interpolazione sulla lunghezza dell'innalzamento di temperatura della solidificazione eutettica.

In figura fig. 3.19 a destra in basso è tracciato l'andamento della solidificazione per una frazione solida pari a 0.98. L'asse delle ascisse rappresenta il tempo e l'asse delle ordinate rappresenta la distanza dal centro della materozza. La solidificazione comincia all'estremità più lontana sotto l'effetto punta e prosegue verso la materozza. Al centro del provino la solidificazione avviene quasi contemporaneamente evidenziando molto bene l'efficacia della alimentazione indotta materozza e dell'effetto punta delle estremità.

Calcolo del gradiente termico e del parametro di Niyama

Per il calcolo dell'andamento termico lungo il pezzo sono state ricavate le curve con una regressione su un polinomio di 3°. Per ottenere il gradiente termico lungo la direzione di alimentazione sono state ricavate le curve per i 7 istanti di solidificazione e derivate rispetto allo spazio. Gli indici R-quadro dell'analisi della distribuzione del campo termico sono vicinissimi al valore unitario. Il calcolo della velocità di raffreddamento è stato fatto in corrispondenza dell'ultimo minimo delle derivate degli andamenti termici, quindi

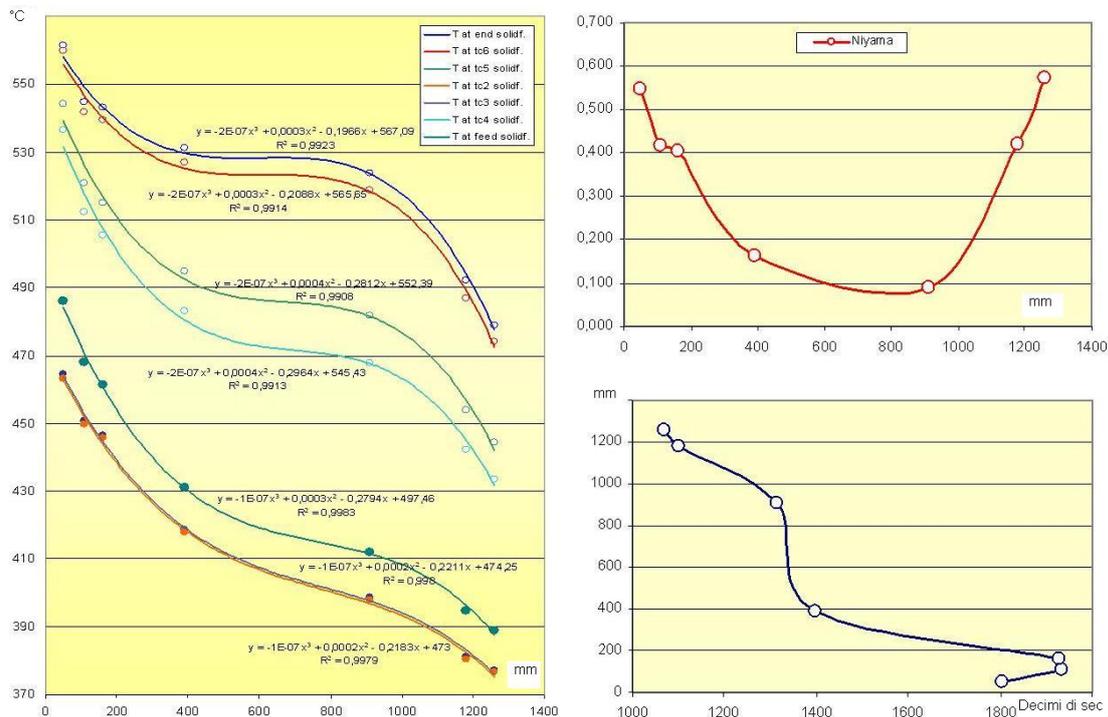


Figura 3.19 – A sinistra sono riportate le interpolazioni con un polinomio di terzo grado in corrispondenza della fase finale della solidificazione sulle termocoppie. A destra in alto sono riportati i valori di Niyama lungo il provino, in basso è visibile la linea di solidificazione lungo il provino in funzione del tempo (in ordinata).

in prossimità della solidificazione completa dell'ultima fase che solidifica, ovvero Al_{Cu} . Si possono fare a questo punto delle considerazioni sulla lunghezza del provino e sulla materozzatura utilizzata. Come si vede dal grafico in figura fig. 3.19 a destra in basso che rappresenta l'andamento del punto in cui si ha la solidificazione al 98% rispetto al tempo; la parte centrale del provino (da una distanza di circa 800 a 400 mm dalla materozza) solidifica quasi contemporaneamente. La solidificazione avviene allo stesso istante. Si può quindi giungere alla conclusione che all'interno di tale zona non si sia fatto sentire né l'effetto punta, né l'effetto della materozza e che dunque la direzionalità dei campi termici necessaria alla riuscita di un buon getto sia venuta a mancare. Tale considerazione si può fare anche sulle curve ricavate tramite regressione dell'andamento termico lungo l'asse della barra. Nella figura sottostante a destra sono state ricavate le curve con una regressione costruita su un polinomio di terzo grado. Ogni curva è calcolata agli istanti in cui la temperatura su ogni termocoppia è pari a $T_{fS} = 98\%$. Si vede che la direzionalità della solidificazione non è marcata, infatti alla solidificazione delle termocoppie posizionate in punta, la parte centrale ha una derivata nulla o addirittura negativa.

Correlazioni tra gradienti termici e i parametri di SDAS e Niyama: distanza di alimentazione

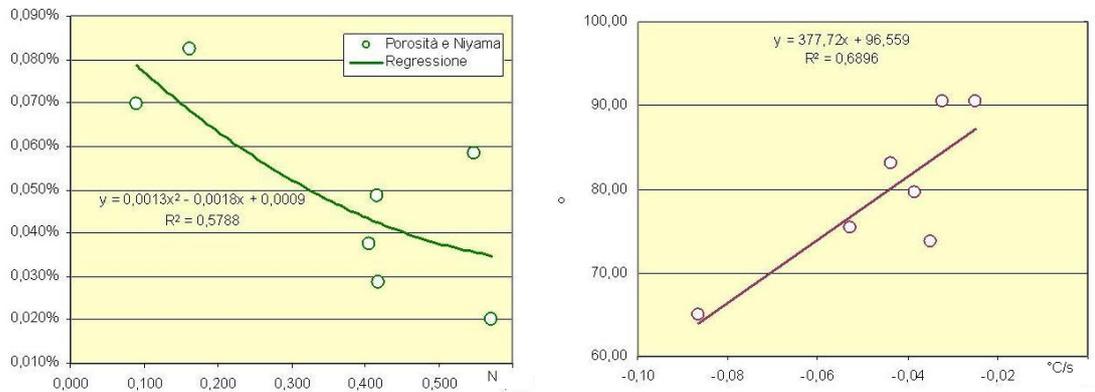


Figura 3.20 – A sinistra è tracciata la linea di correlazione tra N e la quantità di porosità. A destra la correlazione tra raffreddamento in nucleazione e SDAS.

La relazione invece tra lo SDAS e la velocità di raffreddamento prima della nucleazione ha un R-quadro di 0.69. La correlazione che risulta tra la dimensione dello spazio che c'è tra i rami secondari delle dendriti in figura fig. 3.20 ha un indice R^2 abbastanza elevato, ma comunque si distingue chiaramente una relazione tra la velocità di accrescimento primario e SDAS.

Il risultato della correlazione tra porosità rilevate e parametro di Niyama è tracciato in figura fig. 3.20. La correlazione dimostra come il risultato dell'applicazione del criterio di Niyama coincida con i risultati sperimentali trovati in letteratura, che per una lega d'alluminio simile trovano un valore di 0.3: la correlazione tra la comparsa del microritiro ed il valore assunto da N ha dato un risultato con un R^2 pari a 0.58. La regressione lineare calcolata tra i valori di porosità ed i valori di Niyama indicano che al di sotto di $N=0,3$ si forma una quantità di microritiri superiore al 0,05%. Risulta quindi che la lunghezza di alimentazione di una barra di queste dimensioni per effetto punta e per effetto dell'alimentazione con un materozzamento come quello visto sopra sia pari ai valori riportati nella tabella seguente. Tali valori sono ricavati dalle curve di interpolazione delle porosità con una porosità pari a 0,05% e sono riportati in tabella 3.13 dove l'ultima colonna rappresenta la lunghezza massima di una barra dal centro della materozza che la alimenta.

Le differenze rispetto ai valori forniti riportati con le formule 3.34 e 3.33 possono dipendere da vari fattori, come i coefficienti di trasmissione termica della sabbia utilizzata, la temperatura iniziale del sistema e molto altro. Facendo il calcolo inverso e cercando però di ottenere il valore di FD risulta che sulla materozza il fattore è pari a 3,3 mentre sulla punta è pari a 1,6. Questo lascia aperto il campo di indagine sperimentale con lo scopo di ottenere degli andamenti certi sulle funzioni che rappresentano la distanza di alimentazione rispetto alla sezione delle barre.

L'estensione bidimensionale e tridimensionale del problema può essere un secondo campo

A prova	A teorico	E prova	E teorico	Lmax teorico senza raffr.	Lmax senza raffreddatore
22	16,5	10	15	30.5	32

Tabella 3.13 – Distanze di alimentazione risultanti dalla comparsa di porosità superiori al 0,05%

di indagine, con la formulazione delle distanze di alimentazione per la lastra e per il cubo.

3.3.4 Considerazioni conclusive

Attraverso l'analisi dei moduli del getto e delle materozze ed attraverso la conoscenza della distanza di alimentazione è possibile raggiungere un grado superiore di precisione nella progettazione del materozzamento, la cui ottimizzazione è consigliata per ragioni economiche e per ragioni inerenti alla qualità del prodotto. Se le percentuali di materozzamento salgono, la percentuale di rifiuto aumenta proporzionalmente, portando quindi in fusione una quantità superiore di impurità nel bagno. Inoltre si rallentano tutte le fasi di taglio e sbavatura successive.

L'altro vantaggio è la capacità di prevedere e prevenire la comparsa dei difetti attraverso la conoscenza della distanza di alimentazione. Infatti se la pratica comune è quella da un lato di ovviare ai punti caldi con l'avvicinamento della materozza, dall'altro la conoscenza della distanza di alimentazione e del percorso di alimentazione possono aiutare nel prevenire difetti interni al getto. Il lavoro svolto ha portato alla luce che il valore limite del parametro di Niyama per la lega AB-46400 è attorno a 0.3. Inoltre ha dato una misura della distanza di alimentazione per una geometria molto semplice, che può essere verificata ad esempio per un modello numerico.

I miei ringraziamenti vanno al laboratorio di metallurgia della sede di Vicenza dell'Università di Padova, in primis il Prof. Franco Bonollo, che mi ha accolto al dipartimento e mi ha seguito nella stesura di questo lavoro. Ma sicuramente anche agli Ingegneri Giulio Timelli e Giorgio Kral ed allo staff dei laboratori, per la disponibilità e le opportunità che mi hanno offerto.

Secondi ma non meno importanti, ringrazio la Castalia e tutto il suo personale, che dal primo all'ultimo uomo sono sempre stati disponibili ad appoggiare le mie iniziative. Ringrazio l'ingegner Riccardo Self, che mi ha dato l'opportunità rara di conoscere in modo approfondito una realtà produttiva come la fonderia di alluminio in sabbia-resina.

Ringrazio ancora i miei genitori per l'appoggio incondizionato che mi hanno sempre offerto.

Simboli matematici

C_C	Costante di Chvorinov del getto (cast)
C_F	Costante di Chvorinov dell'alimentatore (feeder)
V_F	Volume dell'alimentatore
V_C	Volume netto del getto
m_C	Massa netta del getto
β	Coefficiente di ritiro
ρ_L^{me}	Densità della lega liquida
t_P	Tempo di colata (pouring time)
ρ^{mo}	Densità del materiale della forma (mould)
m_S	Massa delle materozze e del sistema si colata
ε_F	Efficienza della materozza
V_{UT}	Volume di alimentazione effettivamente utilizzato nella materozza
k_p^{me}	Capacità termica del metallo a pressione costante
k^{mo}	Conduktività termica del materiale di formatura
h_B	Altezza del bacino di colata
h_l	Distanza verticale dallo scarico del bacino al punto più basso del getto
h_F	Distanza verticale dallo scarico del bacino al punto più alto del getto

v_B	Velocità di uscita dal bacino di colata
v_S	Velocità di uscita dal canale di colata
a_W	Sezione d'uscita del pozzo (well)
G	Gradiente spaziale locale del campo termico
T_S	Temperatura solidus
T_L	Temperatura liquidus
l_d	Lunghezza della dendrite
v_d	Velocità di accrescimento della dendrite (velocità di solidificazione)
t_S	Tempo locale di solidificazione
N	Parametro di Niyama
f_S	Frazione solida
ΔT_n	Riscaldamento in nucleazione
ΔT_e	Riscaldamento in solidificazione eutettica
T_{ns}	Temperatura di sottoraffreddamento in nucleazione
T_{nr}	Temperatura di recalescenza in nucleazione
T_{es}	Temperatura di sottoraffreddamento in solidificazione eutettica
T_{er}	Temperatura di recalescenza in solidificazione eutettica

Bibliografia

- [1] A. Lanati C. Ferrario. I costi e gli investimenti per la qualità. *De Qualitate*, pages 18–25, dicembre 2007. 2.1.3
- [2] P. Pajusco. Implementazione in un foglio di calcolo di criteri per il dimensionamento dei sistemi di colata ed alimentazione nella fonderia di alluminio in gravità. Master's thesis, Università degli studi di Padova, 2006.
- [3] H. Fredriksson e U. Åkerlind. *Realtà industriale*. Wiley, 2006.
- [4] Foseco. *Non-Ferrous Foundryman's*. Pergamon Press, 1999.
- [5] Jodovit. *Volumix*. Tecnograf.
- [6] Mrikawa M. Niyama E., Uchida T. and Saito S. A method of shrinkage prediction and its application to steel casting practice. *AFS International Cast Metals journal*, 7(3):52 – 63, september 1982.
- [7] Minami Rin. *Research on Porosity Defects of Al-Si Alloy Castings Made with Permanent Mold*. July.
- [8] Richard A. Hardin e Beckermann C. Kent D. Carlson, Shouzhu Ou.
- [9] Foseco. *Manuale metodi per le leghe non ferrose*.
- [10] *Dispersed Porosity in Long Freezing Range Aerospace Alloys*, Sheffield, Luglio 1997. Proceedings of the 4th Decennial International Conference on Solidification Processing.
- [11] D. See P.D. Lee, A. Chirazi. Modelling microporosity in aluminium-silicon alloys: a review. *Journal of Light Metals*, 1:15–30. Department of Materials, Imperial College, Prince Consort Road, London SW7 2BP, UK.

- [12] W. Rasmussen J. L. Jorstad. *Aluminium casting technology, 2nd ed.* AFS, 2001.
- [13] J. Tamminen L. Bäckerud, G. Chai. *Solidification Characteristics of aluminium alloys, Volume 2: Foundry Alloys.* University of Stockholm, 1990.
- [14] M. Rosso E. Gariboldi, F. Bonollo. Proposal of a classification of defects of high-pressure diecast. *La Metallurgia Italiana*, giugno 2007.