

**Impiego innovativo della
simulazione computerizzata
e della tecnologia radiologica
in tempo reale per
ottimizzare i sistemi di
colata dell'acciaio.**

Impiego innovativo della simulazione computerizzata e della tecnologia radiologica in tempo reale per ottimizzare i sistemi di colata dell'acciaio.

Sommario

Uno dei principali criteri di successo nella produzione di getti in acciaio puliti è rappresentato dall'incidenza del sistema di colata. Quest'ultimo deve essere progettato in maniera tale da agevolare il flusso di metallo nella cavità dello stampo e da minimizzare la creazione di turbolenze per evitare la formazione di macro-inclusioni di ossidi, le quali contribuiscono sensibilmente ad incrementare i costi dei getti in acciaio. Inoltre, il sistema di colata deve assicurare un'efficace separazione delle scorie, dei materiali refrattari erosi delle siviere e dei materiali erosi di formatura, per evitare che penetrino nella cavità del getto e si trasformino in difetti.

Per molti anni, i filtri sono stati integrati a tale scopo nei sistemi di colata. Il vasto impiego della filtrazione è stato però limitato dai vincoli legati ai problemi di innesco del filtro o all'effetto di raffreddante che provoca la solidificazione del metallo sulla superficie del filtro prima di raggiungere la stabilizzazione del flusso. (1) Un vivace dibattito è in corso a proposito delle migliori modalità di applicazione dei filtri per ottenere la massima efficacia. I recenti studi condotti da FOSECO confermano gran parte di ciò che si supponeva in materia di sistemi di colata e metodi di filtrazione. Queste ricerche hanno anche condotto allo sviluppo di un nuovo filtro spugnoso che garantisce una maggiore flessibilità applicativa, un flusso di metallo più regolare verso lo stampo e rendimenti superiori.

Con l'ausilio della modellazione idrica, della simulazione dei flussi e delle sequenze video di radiologia in tempo reale, il presente documento illustra il metodo di colata ottimale per i sistemi di colata tradizionali e per quelli di colata diretta, utilizzando getti geometricamente semplici o complessi.

Introduzione

Il Gruppo FOSECO si è sempre interessato all'impatto dei sistemi di colata/alimentazione e di componenti quali filtri e i manicotti, sul riempimento e la solidificazione di getti ferrosi e non. In anni recenti, le tecniche di modellazione, di simulazione e di videoregistrazione sono state impiegate per studiare l'incidenza della configurazione del sistema di colata e dei mezzi di filtrazione sul flusso e sulla turbolenza, soprattutto con le leghe più predisposte all'ossidazione (acciaio al carbonio e acciaio bassoalegato).

Il presente documento si è ampiamente ispirato a studi precedenti, compresa una serie, ampiamente seguita, di linee guida sui getti in alluminio, che forniscono raccomandazioni per la progettazione dei sistemi di colata, sulla base della modellazione computerizzata e degli studi radiologici dei getti in alluminio, pubblicati dal prof. John Campbell dell'Università di Birmingham (Gran Bretagna) (2). In collaborazione con numerosi atenei e altri organismi tecnici, FOSECO ha esteso questi studi all'acciaio e ha intrapreso ricerche analoghe, incentrate sia sui sistemi di colata tradizionali che sulla colata diretta.

Sono state prescelte placche fuse come oggetti delle prove iniziali, per valutare le proprietà di modifica del flusso degli impianti di colata semplice e diretta. Il getto di una valvola geometricamente complessa è stato in seguito utilizzato per una verifica più pratica delle proprietà di modifica del flusso e dei vantaggi dei filtri spugnosi, con l'ausilio di svariati posizionatori filtri e diverse posizioni di colata diretta.

Gli esempi illustrati nel presente documento sono i seguenti:

- Studi di modellazione idrica di una placca fusa, colata dal basso e dall'alto, mettendo a confronto configurazioni con e senza filtrazione.
- Studi di radiologia in tempo reale di una placca fusa colata dall'alto, mettendo a confronto le caratteristiche di flusso dell'acciaio nella cavità dello stampo, utilizzando configurazioni con e senza filtrazione.
- Simulazioni di riempimento dello stampo per il getto di una valvola mediante colata tradizionale con filtri spugnosi ceramici a flusso continuo, e unità di colata diretta con filtri spugnosi ceramici, utilizzando il metodo radiologico per convalidare lo studio.
- Simulazioni di riempimento dello stampo per il getto di una valvola, comprendenti un nuovo tipo di filtro spugnoso in varie configurazioni di colata tradizionale o diretta, per determinare i metodi di colata ottimali.

Studi di modellazione idrica di un getto a placche

I primi studi di modellazione idrica per l'alluminio si avvalevano di semplici cavità trasparenti, a forma di placca, in configurazioni di colata dall'alto e dal basso (3). Per la colata a gravità dell'alluminio e dell'acciaio, si impiegano impianti non pressurizzati per minimizzare la velocità del metallo che passa attraverso l'attacco di colata e penetra nella cavità dello stampo. In questi impianti, la discesa di colata rappresenta normalmente la strozzatura, con incrementi proporzionali dell'area della sezione dei canali e degli attacchi di colata per ridurre la velocità del metallo e compensare i cali di portata da attrito attraverso di essi.

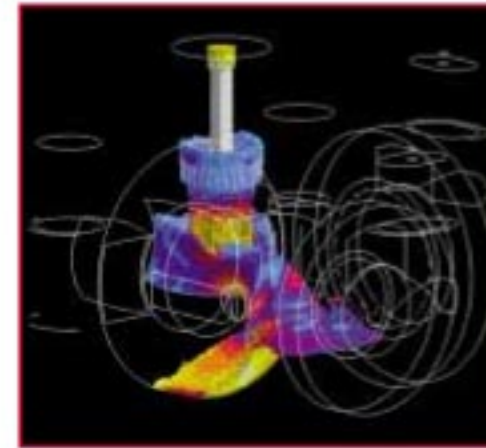


Figura 9: Simulazione del flusso di metallo nel getto della valvola, con la materozza laterale sostituita da un'unità a colata diretta completa di filtro STELEX PrO.

Migliore metodo ai fini del rendimento

In molti casi, l'impiego della colata diretta con filtrazione può anche ridurre il peso colato del getto e incrementare il rendimento, eliminando i componenti del sistema tradizionale in linea. Nelle figure 10^a e 10^b, l'unità a colata diretta, completa di filtro STELEX PrO, è collocata nella posizione della materozza superiore e prevede un peso colato di 100 kg. Da notare che, in questa variante, il rendimento è ottimizzato al 57%, contro il 52% per le altre configurazioni di colata.

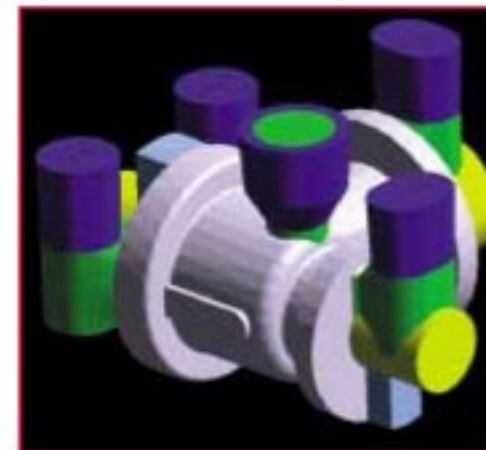


Figura 10a: Configurazione del getto della valvola con l'unità a colata diretta nella posizione della materozza superiore.

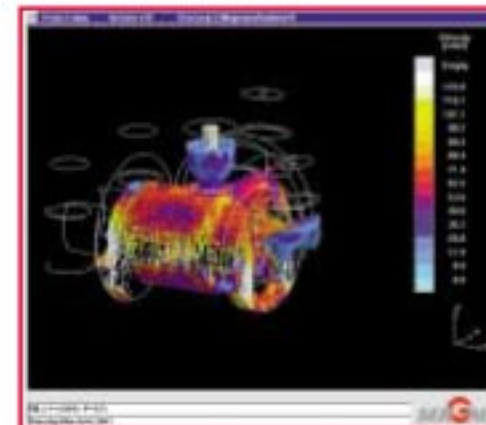


Figura 10b: Simulazione del flusso di metallo nel getto della valvola con unità di colata diretta nella posizione della materozza superiore.

Tuttavia, collocando l'unità a colata diretta nella posizione della materozza superiore, l'altezza di caduta del metallo aumenta sensibilmente. In questo caso, la geometria del getto diventa un criterio di rilievo e non tutti i getti possono essere realizzati con successo con tale metodo. Se si utilizza un'unità a colata diretta nella posizione della materozza superiore, occorre assicurarsi che la qualità del getto non risulti troppo compromessa.

Conclusione

I modelli ad acqua, la visualizzazione radiologica in tempo reale e la simulazione computerizzata sono preziosi strumenti di fonderia. Sebbene i modelli ad acqua e la radiologia in tempo reale possano non essere praticabili per la fonderia di serie, si sono rivelati insostituibili nello sviluppo prodotto dei filtri, dando origine ad una maggiore flessibilità applicativa e a migliori prestazioni di filtrazione. Hanno anche confermato la validità delle simulazioni computerizzate, sulle quali le moderne fonderie fanno un sempre maggiore affidamento per evitare i costi della sperimentazione sistematica.

Bibliografia

- 1) Rapporto finale Steel Founders' Association of America: Development of casting technology to allow direct use of steel castings in high speed machining lines; Presentato al Dipartimento del Commercio degli Stati Uniti (Maggio 1987)
 - 2) Campbell, J.: The Ten Rules, Guidelines for the reliable production of reliable castings: A draft process specification; 1° Congresso Internazionale AFS sulla colata, il riempimento e l'alimentazione dei getti in alluminio, Nashville, TN (Ottobre 1999)
 - 3) Fuoco, R.; de Souza Cabezas, C.; Corrêa, E.; de Andrade Bastos, M.: Study on gating system design for aluminium gravity castings using water models; IPT-Technological Research Institute—Metallurgy Division, San Paolo, Brasile, 1° Congresso Internazionale AFS sulla colata, il riempimento e l'alimentazione dei getti in alluminio, TN (Ottobre 1999)
 - 4) Schwam, D.; Wallace, J.F.; Chang, Q.; Studies of the Flow of Molten Aluminium in Vertical Permanent Moulds using Real Time X-rays and Simulation; 1° Congresso Internazionale AFS sulla colata, il riempimento e l'alimentazione dei getti in alluminio, TN (Ottobre 1999)
 - 5) Wingfield, B.; Delaney, I.; Outten, J.: A Inique Look at the Benefits of Foam Filtration using X-ray Technology; Presentato in occasione della 31° Convention nazionale delle fonderie australiane (1999)
 - 6) Midea, A.C.; Alquist, B.R.; Blackburn, C.: Increasing the Accuracy of Metal Flow Results in Steel Castings, SFSA Transactions, (Ottobre 2001)
- * Il processo REPLICAST è un procedimento brevettato esclusivo di Casting Technology International, UK.

Le bolle sono causate dall'elevata velocità del flusso di metallo discendente, il quale trascina con sé l'aria nel momento in cui entra nella cavità. Il metallo schizza sul fondo dello stampo, rimbalza in alto in corrispondenza degli angoli e ricade nella zona centrale. L'aria trascinata si agglomera fino a formare le bolle, le quali risalgono poi in superficie. Questa turbolenza amplia notevolmente la superficie del metallo fuso esposta all'ossigeno, provocando un'eccessiva riossidazione. Da notare che l'esempio radiologico concorda con i risultati del modello ad acqua colato dall'alto, esaminati in precedenza.

Nella figura 2b, è stato utilizzato un manicotto completo di filtro spugnoso ceramico 75 x 25mm/10ppi. L'esame del metallo all'uscita dal filtro mostra che si è agglomerato in un unico flusso solido, riducendo così la superficie di metallo fuso esposta all'aria. Il metallo filtrato riempie la cavità in maniera più regolare, con scarsi movimenti di rullio e nessuna bolla in superficie. Anche questo conferma i risultati della modellazione idrica presentati in precedenza, dove l'aggiunta di un filtro ha ridotto notevolmente l'entità della turbolenza.



Figura 2b: Radiografia in tempo reale della placca-modello colata dall'alto, filtro spugnoso ceramico nel manicotto di colata diretta.

Simulazioni di riempimento dello stampo e conferma radiologica

L'impiego della simulazione computerizzata per modellare il processo di colata con filtrazione rappresenta un aiuto prezioso, che consente alle fonderie di evitare le onerose sperimentazioni sistematiche. Come per tutte le analisi computerizzate, la validità di queste simulazioni dipende in larga misura dalla precisione e dalla qualità dei dati impostati, per quanto riguarda in particolare l'effetto esercitato dai filtri sul flusso di metallo fuso.

Il flusso di metallo liquido che passa attraverso il filtro dipende dalla densità e dalla viscosità del metallo, nonché dalla configurazione e dalla porosità del materiale filtrante. Utilizzando i dati relativi al calo di pressione, tratti dagli studi di modellazione idrica, FOSECO ha elaborato, per i filtri a schiuma STELEX, coefficienti di flusso che hanno notevolmente migliorato la precisione delle simulazioni di flusso computerizzate (6). Sono state condotte parallelamente simulazioni computerizzate, basate su questi coefficienti, e studi radiologici sul getto in acciaio di una valvola, per dimostrare la validità della simulazione computerizzata nella previsione delle caratteristiche di riempimento del getto.

Per realizzare gli studi radiologici, è stato nuovamente necessario creare uno stampo speciale, sufficientemente piccolo da consentire la penetrazione dei raggi X. Questo è stato possibile avvalendosi del processo REPLICAST, sviluppato da Casting Technology International. Il procedimento consiste nell'immergere una riproduzione in polistirolo del getto della valvola in strati successivi di materiale refrattario, che viene successivamente essiccato e cotto. Il guscio cotto è posizionato all'interno di una cassa di colata, riempita di sabbia non legata.

Nella figura 3a, è stata utilizzata un'unità di colata diretta completa di filtro. La colata diretta rende superflui il pozzetto di colata, la discesa di colata, il posizionatore filtro, i canali di colata e un alimentatore. Il peso colato in questa configurazione è pari a 113 kg. La simulazione mostra il flusso 2 secondi dopo l'inizio della colata.

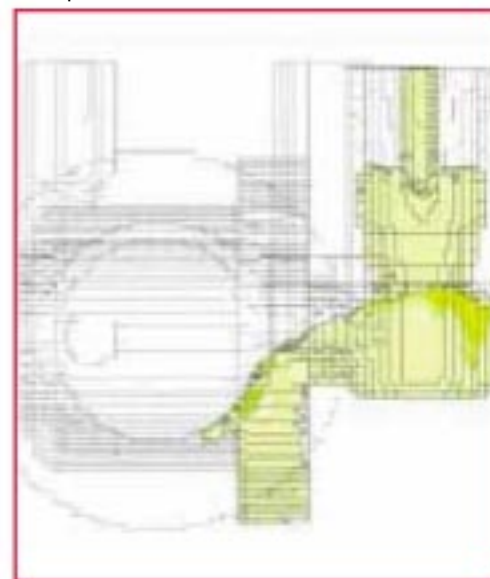


Figura 3a: Simulazione computerizzata del flusso di metallo nel getto della valvola con colata diretta KALPUR, dopo 2 secondi.

La figura 3b mostra l'immagine a raggi X realizzata durante il riempimento dello stampo a colata diretta, sempre 2 secondi dopo l'inizio della colata stessa. Benché sia difficile farsi un'idea dalle immagini fisse riprodotte nel presente documento, sia la simulazione (figura 3a) che l'immagine a raggi X concordano. Un'ulteriore conferma della precisione del modello di filtrazione risiede nel fatto che il tempo di colata effettivo riscontrato in fonderia differiva solo di 0,3 secondi dal tempo previsto.



Figura 3b: Studio radiologico in tempo reale del flusso di metallo nel getto della valvola con colata diretta filtrata, dopo 2 secondi.

La seconda configurazione (figura 4a) simula il flusso di un sistema di colata tradizionale, 2 secondi dopo l'inizio della colata. È dotata di un singolo filtro spugnoso ceramico STELEX ZR, alla base della discesa di colata, con due canali che conducono agli attacchi. Il peso colato in questa configurazione è pari a 125 kg. Da notare che l'impiego di un sistema di colata tradizionale con filtrazione incrementa del 10% il peso colato, aumentando di conseguenza il rendimento.

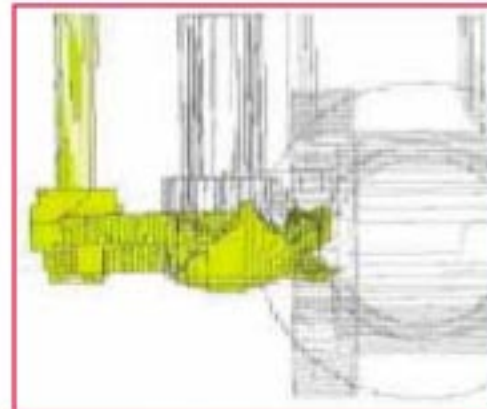


Figura 4a: Simulazione computerizzata del flusso di metallo nel getto della valvola con filtro in linea, dopo 2 secondi.

La figura 4b riproduce un'immagine radiologica ripresa durante il riempimento dello stampo colato in maniera tradizionale, sempre 2 secondi dopo l'inizio della colata. Anche in questo caso, la simulazione e l'immagine radiologica concordano. Il tempo di riempimento previsto differiva di un secondo dal tempo di colata previsto.

Alla luce della sostanziale corrispondenza tra l'esito della simulazione e i risultati radiologici riscontrati in questo e in altri studi, abbiamo concluso che le simulazioni adeguatamente predisposte e basate su dati di filtrazione precisi, risultano affidabili anche senza il ricorso alla conferma radiologica.



Figura 4b: Studio radiologico in tempo reale del flusso di metallo nel getto della valvola con filtro in linea, dopo 2 secondi.

Sviluppo prodotto

Molte ricerche hanno documentato l'efficace eliminazione delle macro-inclusioni di ossidi (scorie, materiali refrattari e sabbia) dai flussi di metallo, grazie all'adozione dei filtri spugnosi. Queste ricerche e le ulteriori simulazioni ci hanno indotti a ritenere che, nel caso dell'acciaio, le prestazioni ottimali di filtrazione possano essere ottenute riducendo al minimo la velocità e la turbolenza del metallo liquido nel sistema di colata, collocando i filtri nelle immediate vicinanze degli attacchi di colata della cavità dello stampo.

Fino a poco tempo fa, questo non era possibile, soprattutto in caso di utilizzo di filtri spu-

gnosi ceramici a base di ossido di zirconio STELEX ZR per la colata di leghe inclini all'ossidazione e alla formazione di pellicole (ad esempio, gli acciai al carbonio o bassoalegati). A causa delle loro capacità termica, i normali filtri spugnosi a base di ossido di zirconio devono essere posizionati alla base stessa della discesa di colata, dove il metallo raggiunge la temperatura più elevata, per favorire l'innesco o evitare la solidificazione del metallo prima della stabilizzazione del flusso.

Benché sia possibile utilizzare temperature di colata più elevate affinché il metallo rimanga sufficientemente caldo da "innescare" i filtri posti nelle vicinanze degli attacchi di colata, questo aumenta i costi e aggrava il problema dell'ossidazione del metallo. Sebbene la collocazione del filtro spugnoso ceramico STELEX nell'unità di colata diretta KALPUR risolva solitamente i problemi di innesco, la densità del filtro ceramico ne impedisce talvolta il galleggiamento al termine della colata. Questo inconveniente può provocare fenomeni di ritiro al di sotto del filtro.

FOSECO ha messo a punto un filtro in materiale refrattario non ceramico altamente stabile, denominato STELEX Pro (figura 5), in grado di assicurare resistenza alle alte temperature, allo scorrimento e agli sbalzi termici legati all'impatto dell'acciaio fuso. Cosa ancora più importante, non assorbe eccessivamente il calore, evitando così i problemi di innesco e offrendo una maggiore flessibilità al progettista dei sistemi di colata. Inoltre, questo filtro a bassa densità incrementa le probabilità di galleggiamento al termine della colata diretta, impedendo così i fenomeni di ritiro al di sotto del filtro stesso. Qui di seguito vengono esaminate le applicazioni e le prestazioni di questo nuovo materiale per filtri.



Figure 5: Filtri refrattari non ceramici STELEX Pro.

Studi sui migliori metodi di progettazione degli impianti di colata

Per determinare i migliori metodi di progettazione dei sistemi di colata nelle configurazioni in linea con filtrazione e a colata diretta, è stato nuovamente utilizzato il getto della valvola, questa volta con due materozze abbinata per incrementare il rendimento. Le simulazioni di flusso, basate su precisi dati di filtrazione, sono state condotte con svariati filtri, nonché posizionatori e ubicazioni diverse.

In una serie di studi, il migliore metodo ai fini della qualità è risultato essere quello che produce le minori velocità e turbolenza simulate al momento dell'ingresso del metallo nella cavità del getto. In altri studi, il migliore metodo ai fini del rendimento è stato quello che ha prodotto il migliore rendimento percentuale, definito come il rapporto tra peso del getto e peso colato.

Migliore metodo ai fini della qualità

La bassa velocità del flusso di metallo in corrispondenza dell'attacco e una minima turbolenza sono tra le caratteristiche ricercate in un sistema di colata getti capace di minimizzare le macro-inclusioni di ossidi e i relativi difetti causati dall'erosione della sabbie e dalla riossidazione. Numerose configurazioni di colata sono state simulate per valutare tali caratteristiche, compresi (a) un sistema senza filtrazione, (b) un impianto tradizionale con filtro a schiuma ceramico, (c) un impianto con filtri spugnosi STELEX PrO e (d) un impianto completo di unità a colata diretta KALPUR con materozze laterali. È stato impiegato acciaio bassolegato, colato a 1580°C.

La figura 6 illustra la simulazione della valvola di prova colata in maniera tradizionale, senza filtrazione. Si nota l'elevata velocità, indicata dalle zone bianche e gialle, che lasciano supporre la possibile formazione di macro-inclusioni di ossidi, causate dall'erosione della sabbia e dalla riossidazione. Inoltre, in assenza di filtrazione, è probabile che le macro-inclusioni di ossidi, formatesi sia all'esterno che all'interno dello stampo, finiscano per trasformarsi in difetti nella cavità del getto. Questa configurazione prevede un getto di 57

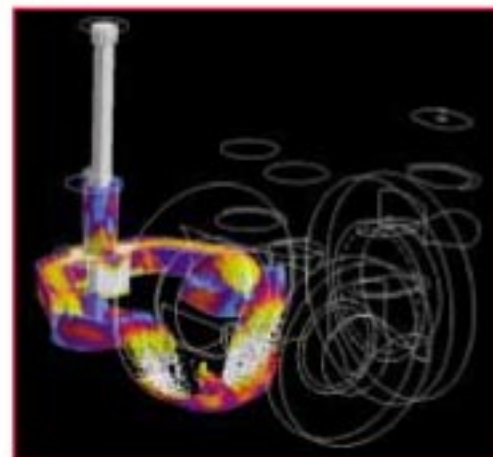


Figura 6: Simulazione del flusso di metallo nel getto della valvola colata tradizionalmente, senza filtrazione.

kg e un peso colato di 109 kg, pari ad un rendimento del 52%.

La figura 7 illustra l'impianto di colata progettato con un filtro spugnoso ceramico a base di ossido di zirconio STELEX ZR 75 x 75 x 25mm/10ppi, con posizionatore alla base della discesa di colata per evitare problemi di innesco.

Benché questa configurazione del filtro in linea riduca la velocità del metallo (come indicato dalla ridotta quantità di zone bianche e gialle), provoca comunque una certa turbolenza nel momento in cui il metallo raggiunge la cavità del getto, e non elimina la possibilità di formazione di macro-inclu-

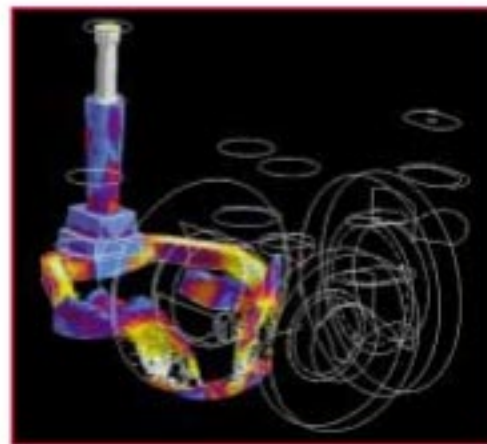


Figura 7: Simulazione del flusso di metallo nel getto della valvola colata tradizionalmente, con filtro spugnoso ceramico a base di ossido di zirconio posto alla base della discesa di colata.

sioni di ossidi. Questa configurazione prevede un peso colato di 107 kg e un rendimento del 52%.

Il migliore progetto di sistema di colata in linea (figura 8) si ottiene con due filtri STELEX PrO 55 x 55 x 20mm/10ppi orientati verticalmente e collocati nelle vicinanze della cavità dello stampo. Questa configurazione di colata è oggi realizzabile, grazie alla minore capacità termica e alla ridotta densità del filtro. Come indicato dalla scarsa quantità di zone bianche, questa variante assicura la minor quantità di turbolenze all'ingresso del metallo nella cavità dello stampo, riducendo così al minimo le probabilità di formazione di macro-inclusioni di ossidi, all'origine di difetti dei getti. I filtri risultano anche ottimamente posizionati per intercettare le

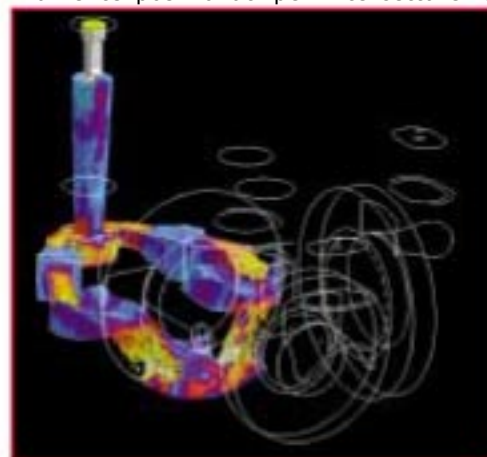


Figura 8: Simulazione del flusso di metallo nel getto della valvola colata tradizionalmente, con due filtri STELEX PrO orientati verticalmente e posti nelle vicinanze della cavità dello stampo.

scorie, i materiali refrattari e la sabbia. In questo caso, il peso colato è di 108 kg e il rendimento è pari al 52%.

In alternativa (figura 9), una delle materozze laterali può essere sostituita da un'unità a colata diretta KALPUR completa di filtro STELEX PrO. Un bacino di alimentazione, opportunamente dimensionato, è collocato sotto l'unità a colata diretta. Tra tutti i progetti, questo è quello che produce le più basse velocità di colata e la minore turbolenza, come evidenziato dalla totale assenza di zone bianche nel campo della velocità. Anche questa configurazione prevede un peso colato di 108 kg e un rendimento del 52%.

Gli "stampi" ad acqua sono stati predisposti in base a normali rapporti di colata non pressurizzata (compresi 1:2:2 e 1:4:4). All'acqua è stato poi aggiunto sapone liquido per rendere i modelli di flusso più visibili durante il riempimento degli stampi di modello. Sono state effettuate riprese filmate alla velocità normale e al rallentatore, mano a mano che le diverse configurazioni di colata e di sezione venivano riempite.

La figura 1a illustra il flusso non filtrato con una configurazione di stampo colato dall'alto. Mano a mano che l'acqua scende nella cavità dello stampo, si notano notevoli fenomeni di turbolenza, vortice e trascinamento d'aria. La figura 1b illustra il flusso non filtrato che penetra nella cavità di uno stampo colato dal basso. Benché la colata dal basso assicuri un ingresso uniforme e un riempimento più regolare della cavità dello stampo, permane una notevole turbolenza.



Figura 1a: Placca-modello ad acqua colata dall'alto, flusso non filtrato.



Figura 1b: Placca-modello ad acqua colata dal basso, flusso non filtrato.

Per ottenere un riempimento regolare e uniforme, occorre ridurre la velocità del materiale fuso che penetra all'interno della cavità dello stampo. Questo può essere ottenuto riprogettando il sistema di colata con una discesa più piccola oppure ampliando l'area del canale di colata (rapporto di colata 1:4:4). È altresì possibile ridurre la velocità del metallo, inserendo un filtro nel sistema di colata. I filtri spugnosi ceramici sono generalmente collocati alla base della discesa di colata, laddove il metallo raggiunge la massima temperatura, per facilitare l'innesco del filtro stesso (questa pratica riduce però l'efficacia della filtrazione, come vedremo in seguito).

Nella figura 1c, l'acqua penetra nella cavità dello stampo attraverso un attacco inferiore comprendente un filtro spugnoso 75 x 25mm/10ppi. Non vi sono praticamente turbolenze visibili, a causa dell'effetto modificante del filtro. Mano a mano che l'acqua scorre attraverso il percorso tortuoso all'interno del filtro, la sua velocità e turbolenza diminuiscono sensibilmente.

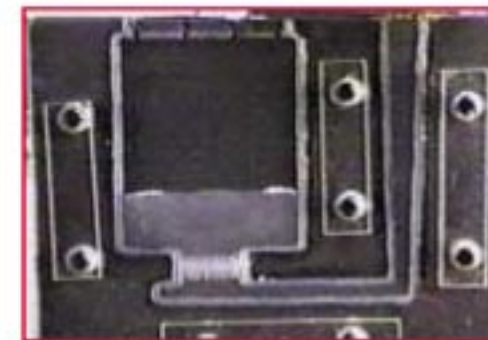


Figura 1c: Placca-modello ad acqua colata dal basso, con filtro spugnoso in corrispondenza dell'attacco.

Si ritiene che la riduzione della velocità e della turbolenza minimizzi la formazione delle macro-inclusioni di ossidi, in grado di compromettere le proprietà fisiche e l'aspetto superficiale dei getti in acciaio.

Studi di radiologia in tempo reale

Gli studi radiologici sono stati ampiamente utilizzati per esaminare i getti metallici (2, 4). Il perfezionamento di una tecnica radiologica in tempo reale sfruttabile per i getti in acciaio ha permesso di ottenere immagini dirette dell'acciaio fuso nel momento in cui entra nella cavità di uno stampo. FOSECO ha condotto dettagliate valutazioni dell'effetto di varie posizioni del filtro in linea e per colata diretta sulla modifica del flusso, in collaborazione con il Castings Technology Institute di Sheffield (Gran Bretagna) (5).

L'apparecchiatura radiologica in tempo reale è contenuta in un bunker di protezione, all'interno del quale è posta una siviera per la colata a tampone, comandata a distanza. I raggi X sono generati da una fonte di Van de Graaff da 2.4 MeV, in grado di penetrare attraverso getti spessi fino a 200 mm. Le immagini radiologiche sono riprodotte su uno schermo al fosforo e riversate mediante un'apparecchiatura di videoregistrazione.

È stato utilizzato un getto a placca semplice 600 x 400 x 60mm, del peso di circa 115 kg. Si è proceduto alla progettazione di uno stampo in sabbia a giunzione verticale, in grado di soddisfare i requisiti del processo radiologico. Vista l'importanza dello spessore minimo delle pareti dello stampo ai fini del processo radiologico, lo stampo era sostenuto all'interno di un'apposita struttura in lamiera di acciaio.

La figura 2 illustra l'acciaio fuso che penetra nella cavità attraverso un canale superiore non filtrato. La turbolenza superficiale e le bolle di gas sono chiaramente visibili mano a mano che la cavità si riempie.



Figura 2a: Esame radiologico in tempo reale della placca-modello colata dall'alto, senza filtro.