

# Messa a punto di un dispositivo per il monitoraggio mediante RX di processi di colata di leghe leggere

F. Bonollo, S. Giusto, B. Molinas, D. Giantin, N. Gramegna

*La comprensione della dinamica dei processi di colata è di fondamentale interesse per lo studio della genesi dei difetti nei getti e per la valutazione di adeguati interventi correttivi. Una parte significativa di tali difetti ha origine nel corso del riempimento della cavità dello stampo, a causa di fenomeni di turbolenza, di intrappolamento di gas, di raffreddamenti precoci. Il presente lavoro illustra la realizzazione e la messa a punto di un dispositivo per il monitoraggio del riempimento di una cavità-stampo da parte di leghe leggere. Utilizzando una sorgente RX e un sistema di acquisizione radiografica "on-line" opportunamente sviluppato, vengono analizzate le modalità con cui una lega di alluminio riempie uno stampo in grafite, individuando le principali criticità del processo. Il riempimento "reale" dello stampo viene poi confrontato con le previsioni fornite dalla simulazione numerica di processo.*

Parole chiave: fonderia, monitoraggio RX, leghe leggere

## INTRODUZIONE

L'osservazione diretta del flusso di un metallo o di una lega liquida all'interno di uno stampo consentirebbe di acquisire una utilissima conoscenza del loro comportamento fluidodinamico e fornirebbe ai tecnologi di fonderia informazioni fondamentali per la corretta progettazione dei sistemi di colata. Tale osservazione, per motivi ovviamente intuibili, è tutt'altro che banale, e la messa a punto dei primi sistemi atti a monitorare l'effettivo riempimento di una cavità stampo da parte di una lega fusa risale al 1973. Ashton e Buhr [1] condussero l'osservazione diretta del flusso dell'acciaio liquido all'interno di forme in sabbia, interposte tra una sorgente di raggi X e uno schermo fluorescente del diametro di 12 pollici. Lo schermo fluorescente convertiva le immagini a raggi X delle cavità interne dello stampo in immagini che, opportunamente intensificate, apparivano su un monitor televisivo per un'osservazione immediata e per la registrazione su pellicola o su supporti magnetici. La sorgente a raggi X utilizzata era da 200 kV, di tipo portatile.

Più recentemente, tecniche di monitoraggio RX della colata sono state sviluppate e applicate presso il Casting Research Group [2-3] di Birmingham. Gli esperimenti svolti si possono ricondurre essenzialmente a due filoni principali:

- 1) analisi fluidodinamica: confronto tra diversi sistemi di colata, anche in relazione a diversi tipi di processo e all'impiego di filtri ceramici e non, allo scopo di studiare e migliorare le condizioni di riempimento, minimizzando i fenomeni di turbolenza del fuso;
- 2) confronto tra il flusso del metallo fuso in colate "reali" e quello previsto nei codici di simulazione numerica, allo scopo di validarne le potenzialità e favorirne il perfezionamento [4].

Il dispositivo a RX utilizzato ha, in questo caso, una mac-

chia focale del diametro di 1.5 mm, una differenza di potenziale tra anodo e catodo di 160 KV, ed è associato ad un intensificatore di brillantezza; la registrazione delle immagini in uscita su video è affidata ad un sistema VHS 50 Hz.

Un altro progetto [5] è tuttora in corso per il monitoraggio RX della colata, volto ad esaminare il sistema di ingresso (gating) dell'alluminio in forme permanenti. L'attenzione è focalizzata principalmente su stampi con linea di separazione verticale tra le due semiforme. Gli esami vengono condotti attraverso una combinazione di esperimenti reali e di simulazioni al computer.

Infine, sistemi a raggi X per il monitoraggio della colata sono presenti presso il Metals Technology Center (Alabama) [6] e a Sheffield (apparecchiatura per il monitoraggio della colata in un sistema RX ad alta energia: 2.4 MeV [7]), finalizzati allo studio del flusso del metallo in stampi di dimensioni massime 1100 x 800mm.

Nell'ambito del presente lavoro, vengono illustrate la realizzazione e la messa a punto di un dispositivo per il monitoraggio RX di processi di colata, verificandone le potenzialità applicative, con specifico riferimento alla validazione di codici per la simulazione numerica di processi di fonderia.

## REALIZZAZIONE DEL DISPOSITIVO X-RAY MONITORING

Il dispositivo di monitoraggio mediante RX realizzato consiste essenzialmente del sistema schematizzato in Figura 1, e illustrato nella foto di Figura 2. Tale dispositivo deve, sostanzialmente, essere in grado di realizzare due "flussi":

- un flusso di materiale: la fusione della lega e la sua colata nello stampo (flusso orizzontale in Figura 1),
- un flusso di immagini, originate inizialmente dalla sorgente RX sullo schermo fluorescente e poi da acquisire su PC (flusso verticale in Figura 1).

Operativamente, è stata impiegata una cabina per raggi X con relativo tubo radiogeno da 160 KV e 5 mA (macchia focale teorica di diametro 1,5); il tubo viene utilizzato entro un'apposita cabina schermata con dimensioni interne di circa 160 x 160 cm in pianta e di altezza di circa 225 cm (si veda lo schema riportato in Figura 3). All'interno della cabina è stato posizionato un forno a resistenza per la fusione dell'alluminio, di tipo a ribaltamento meccanico con asse di ro-

F. Bonollo, S. Giusto

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali, Università di Padova

B. Molinas, D. Giantin

Venezia Technologie SpA, Porto Marghera (VE)

N. Gramegna

Engin Soft Trading, Padova

Memoria presentata al 29° Convegno Nazionale AIM, Modena 13-15 novembre 2002

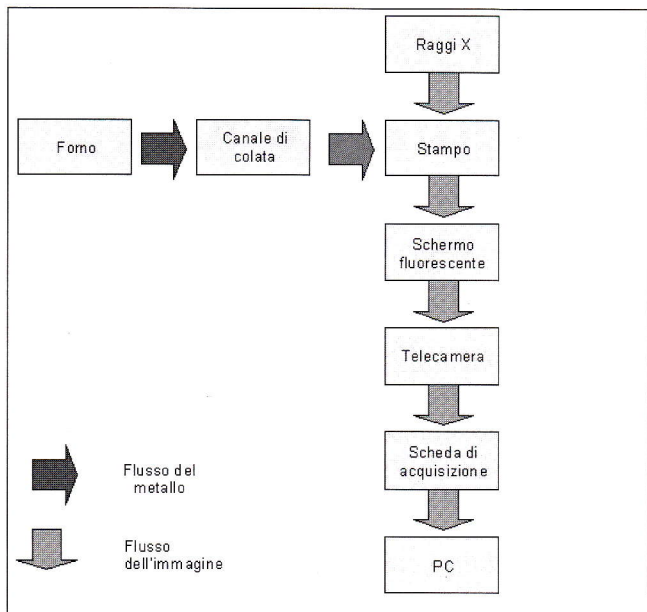


Fig. 1: Schema di principio del dispositivo per il monitoraggio RX di processi di colata

Fig. 1: Flow chart of the device for XR monitoring of casting processes

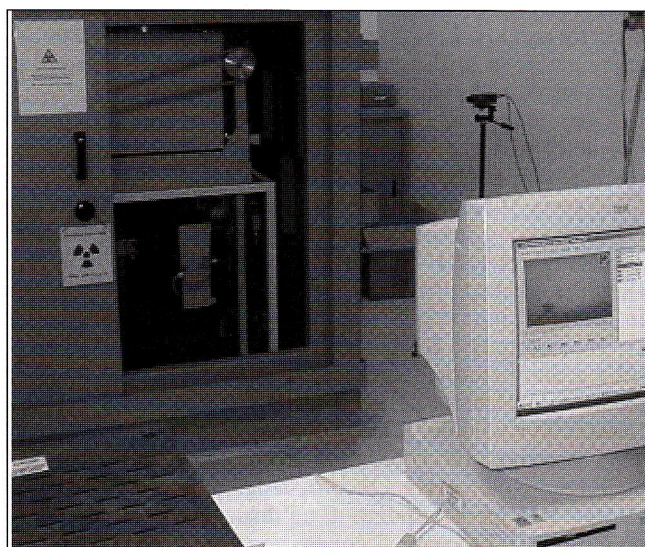


Fig. 2: Dispositivo per il monitoraggio RX di processi di colata: sono distinguibili la cabina con il forno all'interno, la telecamera e, in primo piano, a il PC (dx) e il cassetto di comando elettronico del forno (sx).

Fig. 2: Device for XR monitoring of casting processes: XR chamber with the furnace inside, video-camera, PC and cabinet for furnace control

tazione prossimo al becco di colata; il crogiolo ha una capacità, calcolata al 90% del riempimento massimo, di circa 2.75 litri.

La lega viene versata in uno stampo in grafite (materiale che assicura un'ottima "trasparenza" ai raggi X), che verrà descritto dettagliatamente nel seguito.

Le immagini radiografiche, inizialmente visualizzate sullo schermo fluorescente, vengono acquisite mediante telecamera con sensore CCD da 1/2 pollice, con circa 440.000 pixels effettivi, per risoluzione orizzontale di 470 linee TV e sensibilità a luce scarsa di 0,95 lux con obiettivo F1.2. La telecamera è interfacciata ad un sistema di acquisizione delle immagini, con una scheda Bus Master PCI (32 bit, velocità di trasferimento dei dati: 7 MB al secondo); il video viene digitalizzato nel formato M-JPEG in tempo reale.

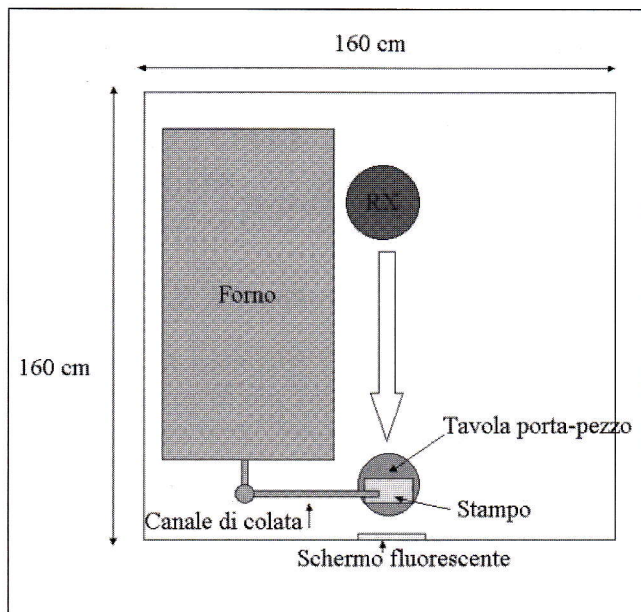


Fig. 3: Lay-out interno del dispositivo di monitoraggio RX di processi di colata

Fig. 3: Internal layout of the device for XR monitoring of casting processes

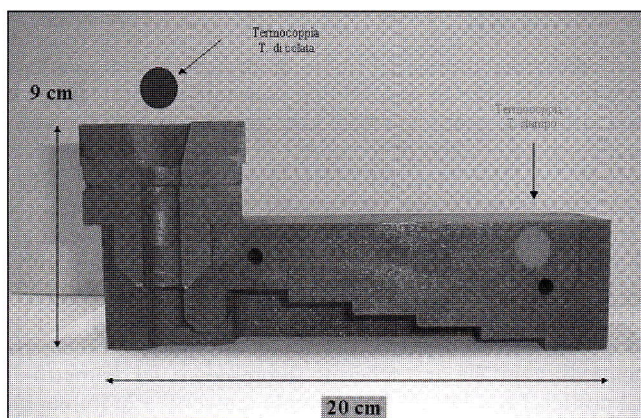


Fig. 4: Dettaglio dello stampo in grafite utilizzato e localizzazione delle termocoppie

Fig. 4: Detail of the graphite die employed, and localisation of thermocouples

Per l'imbocco del metallo fuso in uscita dal colatoio è stato realizzato un sistema in acciaio, opportunamente coibentato, per consentire il passaggio del liquido senza una eccessiva perdita di temperatura.

La placca porta-stampo è stata attrezzata con una piastra riscaldante (potenza: 1200 W) per il preriscaldamento dello stampo stesso.

#### EFFETTUAZIONE DI COLATE "MONITORATE"

La funzionalità e le potenzialità del dispositivo sono state validate effettuando una serie di quattro colate, impiegando lo stampo in grafite illustrato in Figura 4. Tale stampo permette di ottenere un getto di lunghezza 12.5 cm, spessore massimo di 5 cm, con 5 gradini dell'altezza di 0.5 cm ognuno, con un volume complessivo di circa 100 cm<sup>3</sup>.

Il sistema è attrezzato con tre termocoppie: nel crogiolo, all'ingresso dello stampo e nella parte terminale dello stampo stesso (in un foro del diametro di 1.5 mm e ad una distanza di 4 cm dalla superficie dello stampo), come è visibile in Figura 4. I valori delle temperature in funzione del tempo sono

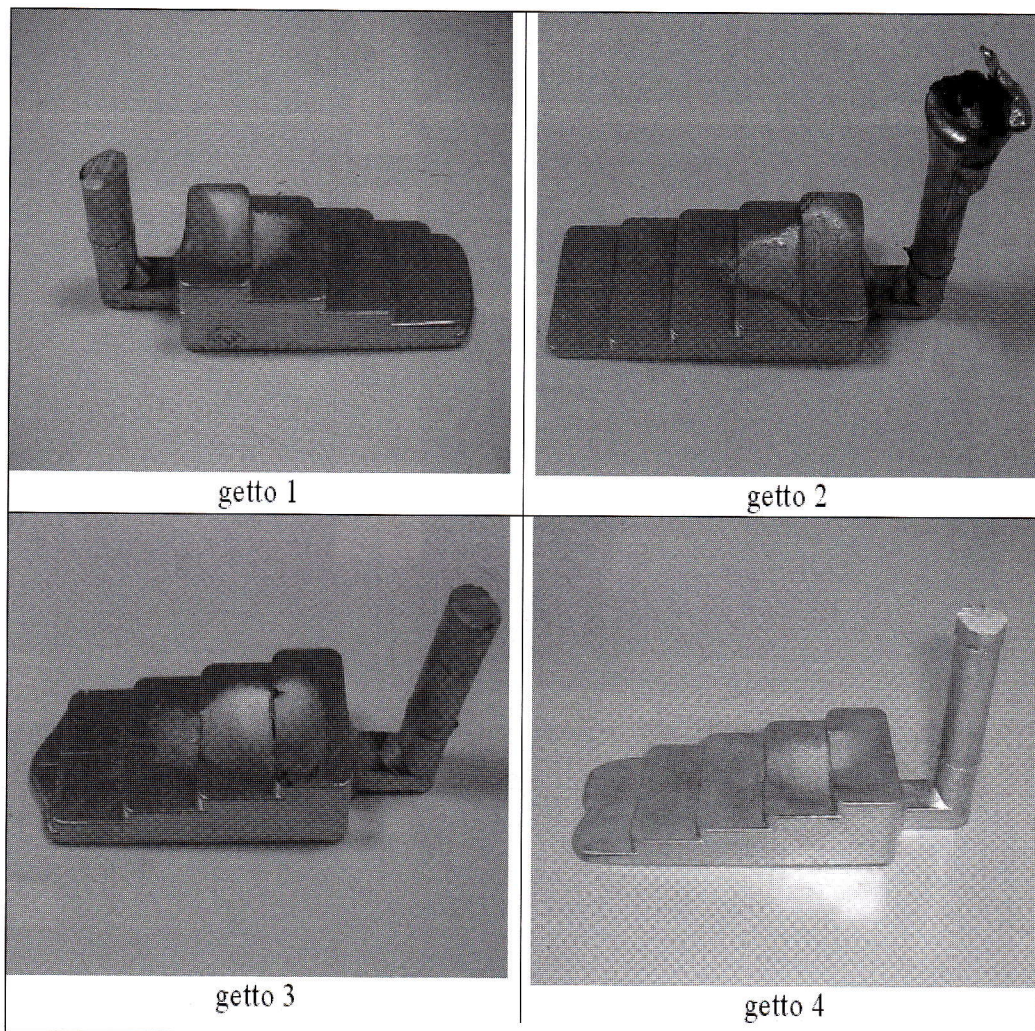
Tabella 1: Parametri operativi delle colate "monitorate" mediante RX

Table 1: Operative parameters of the XR monitored casting experiments

| Prova | Temp. stampo (°C) | Presenza di sfiati | Metallo fuso nel crogiolo (g) | Temp. colata (°C) | Tempo di riempimento (s) |
|-------|-------------------|--------------------|-------------------------------|-------------------|--------------------------|
| 1     | 325               | No                 | 1327                          | 695               | 2,5                      |
| 2     | 450               | No                 | 1343                          | 700               | 1,8                      |
| 3     | 370               | Si                 | 1360                          | 685               | n.r.                     |
| 4     | 380               | Si                 | 1463                          | 660-670           | 2,2                      |

Fig. 5: Foto dei getti prodotti mediante le colate "monitorate" in RX.

Fig. 5: Images of the casting produced in the four XR monitoring experiments



stati registrati mediante un'interfaccia di acquisizione dati Fluke 2635A Hydra Data Bucket. I monitoraggi sono stati effettuati impostando sull'apparecchio radiogeno parametri operativi pari a 160 kV e 5 mA. La frequenza di acquisizione su PC è stata pari a 25 fotogrammi al secondo.

Mediante programmi di post-elaborazione, è possibile, una volta acquisiti i "filmati RX" del riempimento, effettuare una scansione frame-by-frame, apprezzando così i movimenti del fronte del metallo, e le differenze nel moto dovute al variare dei parametri di colata.

Le condizioni operative adottate nel corso delle prove sperimentali sono riassunte in Tabella 1. In particolare, sono state variate le temperature di colata e di preriscaldamento dello stampo. Per le prove 3 e 4, lo stampo è stato predisposto di sfiati per l'eliminazione dell'aria, non presenti nelle colate 1 e 2. La lega utilizzata per le prove è la A356 (Al-7%Si-0.3%Mg). La Figura 5 illustra i quattro getti prodotti.

Nelle Figure 6 e 7 sono riportati i fotogrammi più significativi, relativi rispettivamente alle prove 2 e 4 (che si distinguono sostanzialmente per l'assenza - prova 2 - e per la presenza - prova 4 - di sfiati). Dal confronto tra le sequenze è possibile notare come le modalità di riempimento della ca-

vità-stampo siano significativamente diverse.

Nel caso della prova 2, l'assenza di sfiati determina la formazione di una "sacca" d'aria che ostacola in maniera significativa e rende disomogeneo il riempimento (si vedano le immagini riportate in Figura 6c,d,e,f), andandosi a posizionare in corrispondenza della parte opposta all'attacco di colata (nella zona cioè a spessore sottile del getto). Molto più omogeneo appare il riempimento ottenuto nella prova 4. Gli sfiati agiscono efficacemente nel favorire la fuoriuscita dell'aria dallo stampo, e la parte sottile del getto si riempie senza evidenti difficoltà (come si può notare dall'esame delle immagini riportate in Figura 7c,d).

La prova 2 è, peraltro, quella che ha dimostrato i tempi di riempimento più brevi e un riempimento completo della cavità stampo (si vedano la Tabella 1 e la Figura 5). Tali effetti sono certamente associabili a parametri di processo più favorevoli (sono state impiegate temperature di colata e di preriscaldamento dello stampo più elevate rispetto a tutti gli altri casi), che hanno reso più fluida la lega e impedito fenomeni di solidificazione precoce. Tutto ciò non ha però consentito, come ha evidenziato il monitoraggio RX, un riempimento omogeneo.

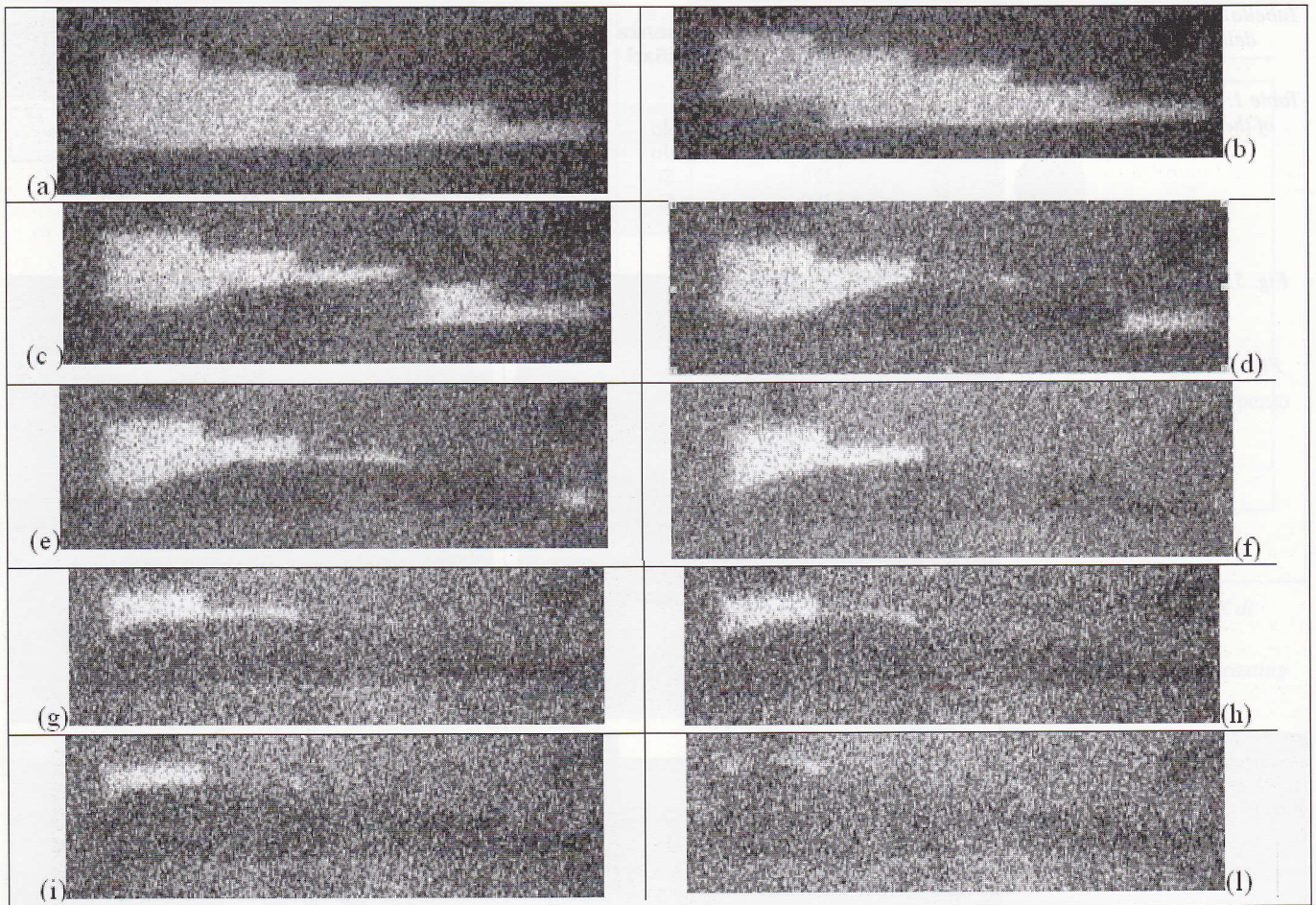


Fig. 6: Sequenza di riempimento (prova 2)

Fig. 6: Sequence of filling (experiment n. 2)

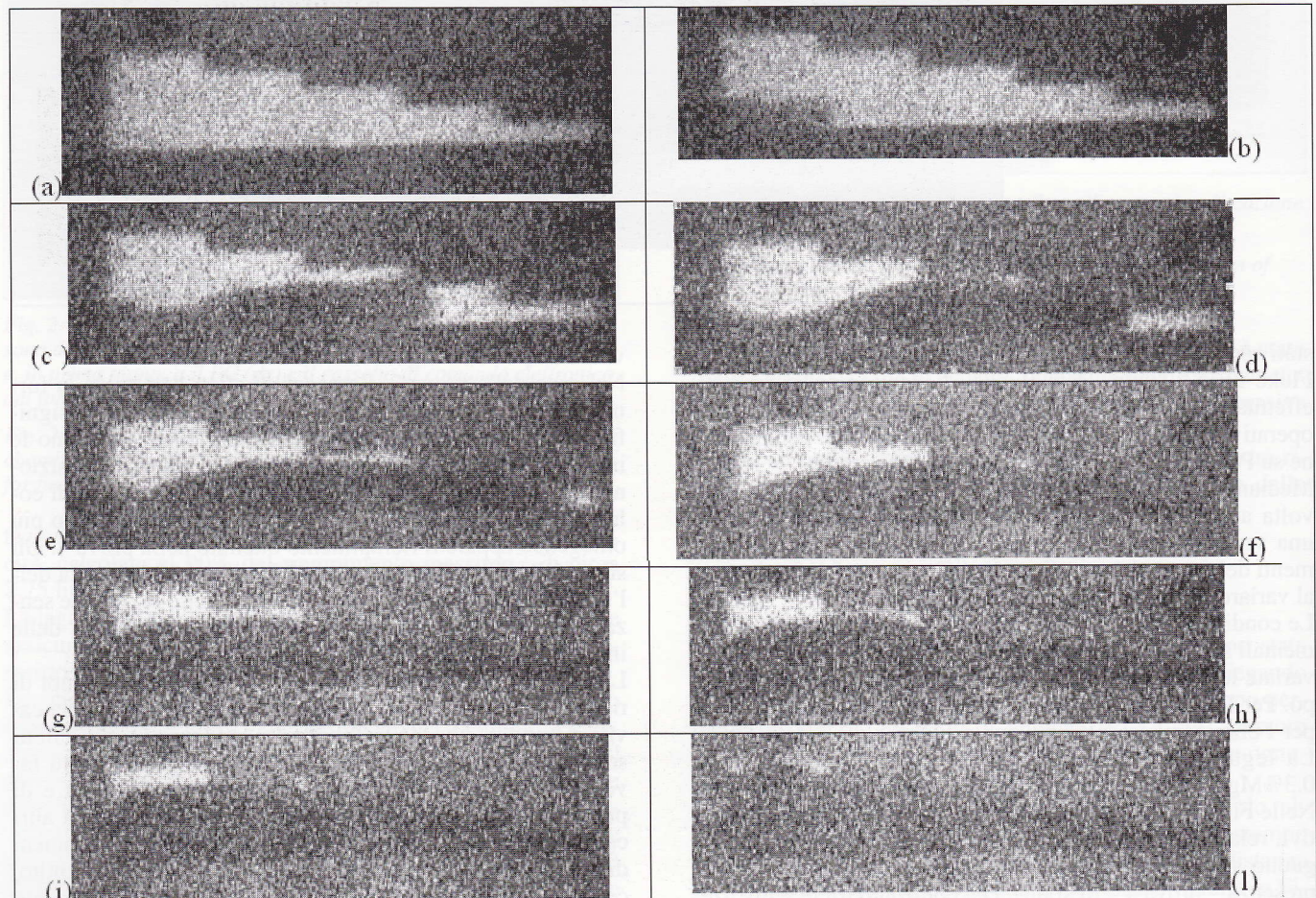


Fig. 7: Sequenza di riempimento (prova 4)

Fig. 7: Sequence of filling (experiment n. 4)

Figura 8: Visualizzazione della geometria del getto (a) e relativa mesh a volumi di controllo (b)

Fig 8: Visualisation of the casting geometry (a) and related Control Volumes mesh (b)

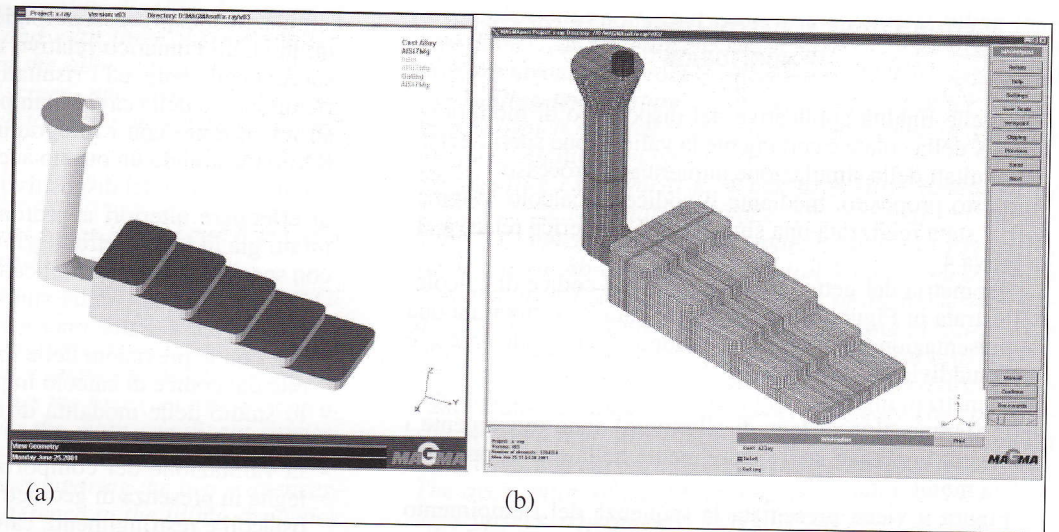
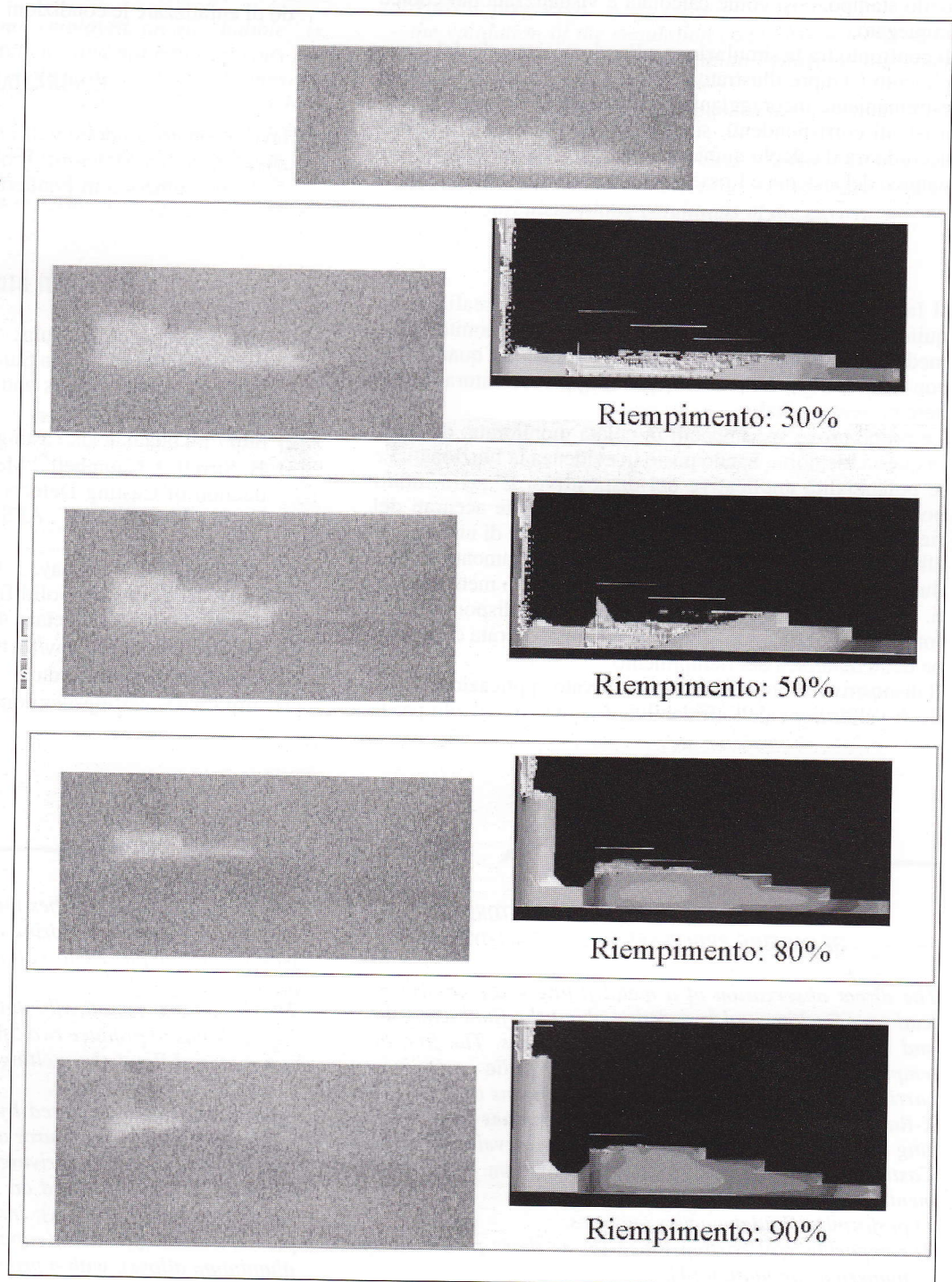


Fig. 9: Confronto tra riempimento reale dello stampo (sx) e risultati della simulazione di processo (dx), al variare della percentuale di riempimento

Fig. 9: Comparison between the real filling of the die cavity (on the left) and the results of numerical simulation (on the right), at various filling percentages



**SIMULAZIONE AL CALCOLATORE DELLE COLATE  
"MONITORATE"**

Una delle finalità applicative del dispositivo di monitoraggio RX della colata è certamente la validazione sperimentale dei risultati della simulazione numerica di processo.

A questo proposito, mediante il codice di calcolo Magma-soft, è stata realizzata una simulazione numerica relativa alla prova 4.

La geometria del getto, implementata nel codice di calcolo, è illustrata in Figura 8a, mentre in Figura 8b è riportata una rappresentazione della mesh a volumi di controllo in cui è stato suddiviso il getto stesso.

I parametri di ingresso del modello (temperature della lega e dello stampo, tipo di lega di alluminio) sono ovviamente i medesimi impiegati sperimentalmente nella quarta prova di colata monitorata.

In Figura 9 viene presentata la sequenza del riempimento dello stampo, così come calcolata e visualizzata dal codice impiegato.

Il confronto tra la simulazione e l'andamento reale del riempimento (sempre illustrato in Figura 9) fornisce indicazioni estremamente incoraggianti. Osservando le immagini prese a istanti corrispondenti, si può riscontrare un significativo accordo tra il calcolo numerico del comportamento fluidodinamico del sistema e l'osservazione sperimentale

**CONCLUSIONI**

Il lavoro svolto ha consentito di progettare, realizzare e quindi mettere a punto un dispositivo per il monitoraggio mediante RX di processi di colata. Si tratta, per quanto è di conoscenza degli Autori, della prima apparecchiatura del genere presente in Italia.

Le prime prove sperimentali di colata monitorata, descritte in questa memoria, hanno posto in evidenza la funzionalità e le potenzialità applicative del dispositivo. E' stato infatti possibile effettuare monitoraggi estremamente accurati del riempimento di uno stampo in grafite da parte di una lega di alluminio, evidenziando il differente comportamento fluidodinamico della lega a seconda della presenza o meno di sfiami. La frequenza di acquisizione attualmente disponibile (25 fotogrammi al secondo) consente già una accurata descrizione della dinamica del riempimento.

Il dispositivo ha immediatamente trovato applicazione in sede di validazione dell'affidabilità di codici di calcolo per la

simulazione di processi di fonderia. E' stato infatti realizzato un modello numerico relativo ad una delle colate effettuate sperimentalmente, ed i risultati, in termini di previsione del riempimento della cavità stampo, sono stati direttamente posti a confronto con i fotogrammi ricavati dal monitoraggio RX, riscontrando un ottimo accordo.

La disponibilità del dispositivo realizzato consente fin d'ora di effettuare ulteriori approfondimenti e affinamenti. Sono infatti già in fase di effettuazione nuove campagne di prova, con specifiche finalità applicative, quali

- il completamento della validazione della simulazione numerica, con l'esame microstrutturale dei getti, da confrontare con le previsioni delle modalità di solidificazione fornite dal codice di calcolo impiegato,
- lo studio delle modalità di riempimento dello stampo in presenza di filtri ceramici,
- la valutazione del comportamento fluidodinamico delle leghe in presenza di geometrie più complesse (presenza di ostacoli e restringimenti, cambi di direzione, ecc.), in grado di enfatizzare le condizioni di turbolenza.

**RINGRAZIAMENTI**

Il lavoro è stato condotto nell'ambito del Contratto "Applicazione di Nuovi Materiali, Processi Innovativi e Tecniche di Calcolo Numerico in Fonderia" tra il MURST e Venezia Tecnologie SpA.

**RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- [1] M.C. Ashton, R.K. Buhr: "Direct Observation of the Flow of Molten Steel in Sand Moulds", Canada Department of Energy, Mines and Resources, Internal Report PM-M-73-5 (1973).
- [2] <http://irc.bham.ac.uk/casting/index.htm>
- [3] B. Sirrell, J. Campbell: "Mechanism of filtration in Reduction of Casting Defects Due to Surface Turbulence During Mold Filling", AFS Transactions 97-11 (1997), p. 646.
- [4] B. Sirrell, M. Holliday, J. Campbell: "Benchmark Testing the flow and Solidification Modeling of Al Castings", Journal of Metals, 48 (3) (1996), p. 20.
- [5] <http://www.oit.doe.gov/factsheets>
- [6] <http://www.eng.uab.edu>,
- [7] [http://www.castingsdev.com/news/feb99/real\\_time.htm](http://www.castingsdev.com/news/feb99/real_time.htm)

**A B S T R A C T**

**SET UP OF A DEVICE FOR X-RAYS MONITORING  
OF CASTING PROCESSES OF LIGHT ALLOYS**

*The direct observation of a metal filling a die cavity can lead to a fundamental knowledge about the fluid dynamics and the defects genesis in casting processes. The first attempts for monitoring the real filling of a die cavity were carried out by Ashton and Buhr [1], by means of a suitable X-Rays (XR) device. More recently, techniques for monitoring by XR casting processes have been developed at the Casting Research Group [2-3] in Birmingham. The experiments carried out were aimed at:*

- 1) performing fluid dynamics analyses;
- 2) comparing real casting processes to those predicted by numerical simulation [4].

*The present paper describes the construction and the set up of a device for XR monitoring of casting processes. The device is then employed to validate numerical simulation of foundry processes.*

*The device is schematically shown in Fig. 1 and displayed in Fig. 2. It has to produce two "flow paths":*

- a material flow: the melting of the alloy and the subsequent casting into a die,
- an image flow, generated by the interaction between the XR generated by the source and the materials (die and cast alloy), and finally arriving on a PC screen.

*In detail, it has been used an XR chamber (Fig. 3), with a XR source (160 kV, 5 mA); inside the chamber, it has been placed a melting furnace (capability: 2.75 litres, suitable for aluminium alloys), with a proper pouring device. The alloy,*

once molten, is poured into a graphite die (Fig. 4), equipped with a pre-heating system and with three thermocouples. The images of the die and of the alloy filling into it are visualised onto a fluorescent screen, and then acquired by a video camera and transferred to a PC; the video is digitised in the M-JPEG format.

The XR monitoring device has been tested in four casting experiments, according to the experimental plane reported in Table 1. The XR source was set at 160 kV and 5 mA; the acquisition was carried out at 25 frames/second.

The working conditions, in the four experiments, have been changed, in order to evaluate the effects of alloy casting temperature, of die pre-heating temperature and of the use of a venting system. The alloy employed is the A356 (Al-7%Si-0.3%Mg). Figure 5 shows the four castings produced, while Figures 6 and 7 collect the more significant frames, concerning, respectively, experiment n. 2 (no venting) and experiment n. 4 (venting). By comparing the two sequences, it can be clearly seen the difference in the filling dynamics of the die.

When a venting system is not employed, an air "bubble" is originated, which makes difficult and not homogeneous the filling of die cavity by the molten alloy (see the frames reported in Figure 6c,d,e,f). The situation is significantly better when the venting system is adopted: the air can freely flow away from the die, and the filling (especially in the thinner region) is quite easy and regular (see the frames reported in Figure 7c,d). The experiment n. 2 has also lead to

a complete filling of cavity and to the shortest filling time (see Table 1 and Figure 5). Those effects can be associated to more favourable process parameters (higher casting and pre-heating temperatures, with respect to all other experiments), which resulted in a more fluid alloy and in avoiding too fast solidification phenomena.

The casting experiment n. 4 has been also simulated by means of the Magmasoft™ code. The geometry of the casting, as implemented into the code, is shown in Figure 8a, while Figure 8b displays the Control Volumes mesh which was elaborated. The input parameters of the numerical model (alloy temperature, die temperature, kind of alloy) were obviously the same adopted in the experimental test.

Figure 9 shows the filling sequence of the die cavity, as calculated and visualised by the numerical code. The comparison between real filling and simulation (Figure 9) shows a significant and encouraging agreement

The availability of the XR monitoring device developed allows further experiments, tests and elaboration (which are already in progress):

- the validation of the simulation code also in terms of capability of predicting solidification behaviour and, then, microstructure of the cast alloy,
- the evaluation of the filling dynamics when ceramic filters are inserted into the die,
- the evaluation of the fluid-dynamics behaviour of the alloys, when more complex die geometry are used, leading to more turbulent filling conditions of die cavity.