

Gestione delle anime inorganiche nell'industria fusoria dell'alluminio: stato dell'arte

*Original*

Gestione delle anime inorganiche nell'industria fusoria dell'alluminio: stato dell'arte / Fracchia, Elisa; Rosso, Mario. - In: LA METALLURGIA ITALIANA. - ISSN 0026-0843. - ELETTRONICO. - 1(2021), pp. 48-56.

*Availability:*

This version is available at: 11583/2866354 since: 2021-01-24T19:58:05Z

*Publisher:*

La metallurgia Italiana

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

# Gestione delle anime inorganiche nell'industria fusoria dell'alluminio: stato dell'arte

a cura di: Elisa Fracchia e Mario Rosso

Nell'industria fusoria dell'alluminio il tema della gestione delle anime da fonderia è di particolare rilievo. L'obiettivo dell'azzeramento delle emissioni inquinanti in atmosfera, in un'ottica di impatto ambientale eco-friendly, ha fatto sì che sia tendenza crescente nelle fonderie l'adozione di anime basate su sistemi di leganti inorganici. In presenza di alti volumi produttivi di componenti ottenuti tramite colata in conchiglia permanente, le anime a legante inorganico sono da prediligere in quanto permettono di eliminare emissioni nocive e migliorare la produttività complessiva dell'impianto. Tuttavia, l'adozione di tali anime comporta la necessità di adottare particolari accorgimenti al fine di garantirne il loro corretto utilizzo, ottimizzando così il processo di colata. Infatti, l'igroscopicità di questa tipologia di anime può creare importanti difettologie in fase di colata dei getti, nonché indebolimento delle anime e loro possibile frattura, spostamento o deformazioni in fase di colata.

L'obiettivo di questo lavoro è presentare uno stato dell'arte sull'attualità industriale, relativo alle fonderie di alluminio, in termini di adozione di anime realizzate con sistemi leganti inorganici, loro gestione e possibili difetti nei getti ad esse correlati. Tale stato dell'arte sarà tale da guidare il più possibile verso i know-how necessari ad ottimizzare al meglio gestione ed adozione delle anime.

**PAROLE CHIAVE:** ANIME INORGANICHE; CARATTERIZZAZIONE, DIFETTI NEI GETTI.

## Introduzione

Nel mondo dell'industria fusoria, le anime in sabbia sono degli elementi impiegati al fine di creare cavità all'interno dello stampo, laddove il metallo fuso non deve penetrare; tali cavità possono essere funzionali oppure volte ad una diminuzione del peso complessivo del componente [1]. In seguito alla colata della lega, che può avvenire con colata in gravità (GC), colata in bassa pressione (LPDC) o colata in alta pressione (HPDC) il getto viene estratto dallo stampo/ conchiglia e si procede alla sterratura [2], ovvero alla rimozione meccanica delle anime. Viste le pressioni notevoli che caratterizzano alcuni dei processi di colata, le anime devono presentare una resistenza meccanica adeguata: per questo motivo si impiegano dei sistemi leganti opportuni. Le anime sono quindi composte da sabbia, sistemi leganti ed additivi. Tipicamente il 97÷99 % delle anime è costituito dalla sabbia e solo il restante 1÷3 % è composto da sistema legante e additivi. La presenza dei leganti fa sì che, durante la fase di colata della lega

**Elisa Fracchia**

Politecnico di Torino, DISAT, Alessandria

**Mario Rosso**

INST c/o Politecnico di Torino, DISAT, Alessandria

fusa si garantiscano migliori proprietà meccaniche [3] ma al contempo si possono sviluppare vapore acqueo e/o composti organici [4,5], in dipendenza della tipologia di legante impiegato. Dal momento che nel corso degli ultimi anni gli standard in materia di emissioni ambientali sono divenuti sempre più restrittivi, la qualità dell'aria nelle fonderie deve essere monitorata secondo normative precise, come la UNI EN 13725:2004 per il controllo con olfattometria dinamica su campioni gassosi o la direttiva europea 2010/75/EU relativa alle emissioni industriali in genere. Per queste ragioni, vista la notevole emissione di composti volatili in seguito all'adozione dei sistemi leganti tradizionali (organici) [6,7], si predilige l'adozione di sistemi leganti inorganici. La politica legislativa sta quindi conducendo le fonderie verso una riduzione del loro impatto ambientale: da qui nasce anche l'interesse al recupero dei rifiuti di fonderia come la sabbia. Le anime devono soddisfare determinati requisiti al fine di poter essere poste in opera: principalmente, esse devono essere refrattarie; avere sufficiente resistenza meccanica in fase di colata; essere permeabili ai gas che si sviluppano; non essere igroscopiche ed infine avere buona sterrabilità. La resistenza meccanica è connessa allo spessore di parete delle anime ed alla loro conformazione: ad esempio nel settore delle leghe di alluminio in cui si producono spesso getti articolati per il settore automotive, le anime sono particolarmente complesse. Inoltre, processi produttivi ad alta pressione sollecitano fortemente le anime causandone facilmente la frattura: in questi casi quindi si devono adottare delle tipologie di anime meccanicamente più resistenti come le ceramiche [8,9]. Dal momento che all'aumentare della resistenza meccanica aumenta anche la difficoltà di sterratura, nei processi ad alta pressione si adottano più comunemente le anime di sali anziché le ceramiche, poiché rimovibili tramite dissoluzione.

Dal punto di vista scientifico, lo stato dell'arte inerente le anime da fonderia risulta scarno, comportando una certa difficoltà nel reperire informazioni specifiche per i non addetti ai lavori. In particolare, poche pubblicazioni hanno indagato la resistenza meccanica delle anime. In [10] Dong et. al. hanno investigato la resistenza della sabbia silicea legata con resina fenolica attraverso test di colata di alluminio fuso a 700°C all'interno di un'anima opportunamente sagomata a forma di coppa, correlando lo spessore di parete alla velocità di frattura della stessa quando posta a contatto con il fuso. In [11] Motoyama et. al hanno effettuato delle simu-

lazioni sulle anime a legante organico al fine di modellizzare la tipologia di contrazione in fase di colata, che è risultata seguire verosimilmente un modello elasto-plastico. In [12] sono state studiate anime inorganiche con l'obiettivo di comprendere l'influenza della quantità di legante e metodo di indurimento sulla resistenza meccanica delle stesse, trovando che il tenore massimo di legante ottimale era in quel caso di circa il 2,5% in peso. In [13] è stato sviluppato un legante che permette di migliorare le proprietà di refrattarietà e resistenza meccanica alle alte temperature. Nella pubblicazione [14] gli autori hanno dimostrato che l'adozione di tenori crescenti di legante organico porta ad avere anime meccanicamente più resistenti, nonostante le proprietà peggiorino con il protrarsi delle storie termiche imposte.

In questo lavoro è mostrato lo stato dell'arte inerenti le sabbie inorganiche per la fonderia di alluminio, i materiali adottati e quali siano le tecniche di caratterizzazione da laboratorio per valutare la qualità delle anime al fine di ottenere getti di qualità.

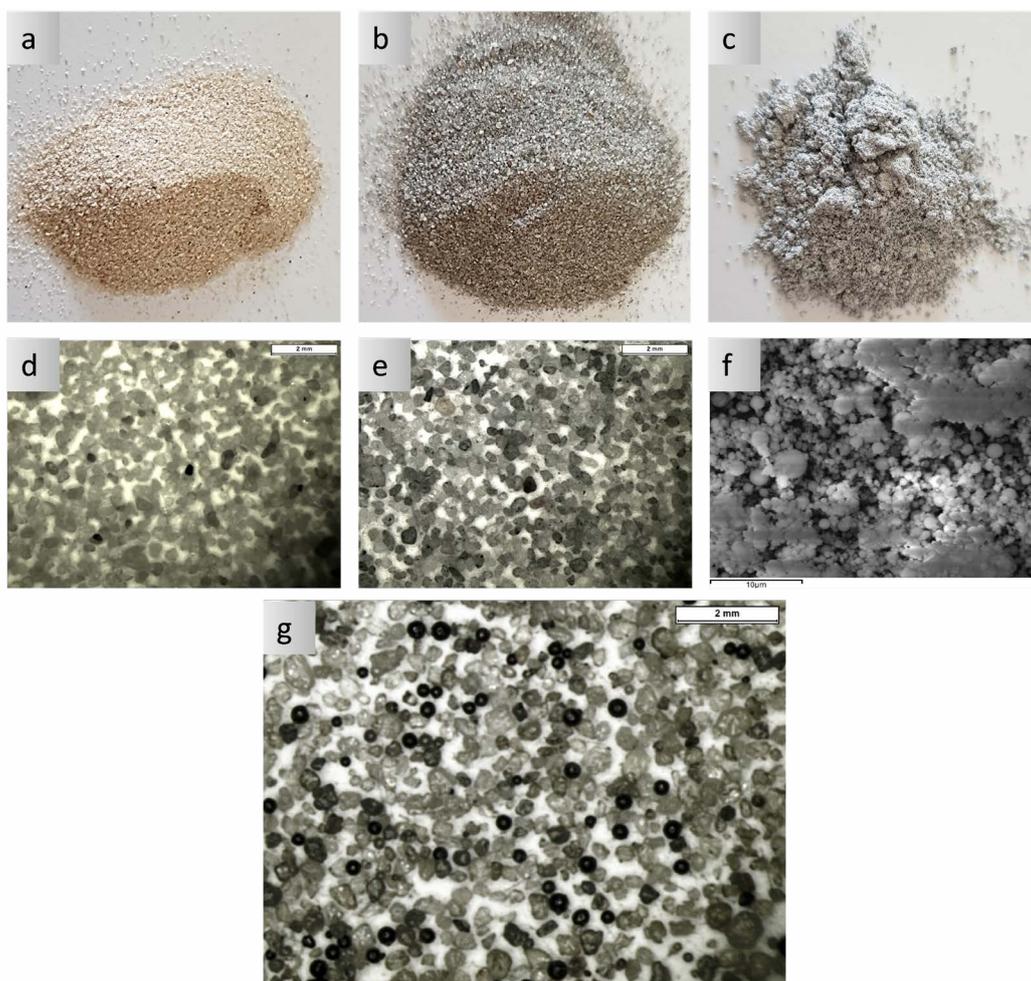
## Materiali

Le sabbie sono il componente principale delle anime; esse sono composte da grani minerali di diametro variabile e compreso tra i 2mm e gli 0.05mm. Normalmente in fonderia si utilizzano sabbie refrattarie, composte tipicamente da silice ( $\text{Si}_2\text{O}_3$ ) e feldspati, ma si possono anche adottare sabbie speciali a base di cromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ), zirconio ( $\text{ZrSiO}_4$ ), olivina [ $(\text{MgFe})_2\text{SiO}_4$ ]. La qualità della sabbia naturale dipende dalla composizione chimica, che a sua volta dipende dal sito di estrazione della stessa. In Fig. 1 (immagini a, b, d, e) sono mostrate una sabbia silicea nuova e rigenerata per come appaiono macroscopicamente ad occhi nudo (a, b) e ad un'osservazione allo stereomicroscopio metallografico (d, e). Un parametro importante che caratterizza le sabbie è la granulometria: essa impatta sia sulla permeabilità ai gas sprigionati in fase di colata che sulla qualità superficiale del getto ottenuto. In particolare al diminuire della granulometria della sabbia la permeabilità ai gas decresce e la qualità superficiale del getto migliora, poiché diminuisce la possibilità di penetrazione del metallo fuso nelle discontinuità dell'anima. Le sabbie esauste, prima di entrare nel processo di rigenerazione, si devono differenziare a seconda che siano sabbie monotipo e sabbie miscelate. Le sabbie monotipo derivano da anime rotte o di scarto o processi

sabbia-resina, dove anime e forme sono prodotte con processi simili. Le sabbie miscelate invece sono sabbie legate con argilla che vengono miscelate a sabbie legate con legante organico. Al fine di una rigenerazione efficace, le sabbie monotipo sono preferibili perché la composizione è più facilmente controllabile.

Le sabbie, vergini e rigenerate, devono soddisfare alcuni parametri fondamentali, quali: bassa perdita alla calcinazione; ridotta percentuale dei fini; pH possibilmente neutro;

richiesta acida (o basica) bassa e non devono contenere (neppure in ppm) azoto. Le sabbie nuove non hanno perdita alla calcinazione né richiesta acida/basica, non contengono azoto ed hanno un pH compreso tra 7 e 9. Nelle sabbie rigenerate, solo in seguito alla rigenerazione secondaria è possibile ristabilire parametri simili a quelli della sabbia nuova.



**Fig. 1** - Sabbie ed additivo. a) fotografia di sabbia silicea nuova; b) fotografia di sabbia silicea rigenerata; c) fotografia di additivo; d) immagine allo stereomicroscopio a 0.63X della sabbia nuova (marker 2 mm); e) immagine allo stereomicroscopio a 0.63X della sabbia rigenerata (marker 2 mm); f) immagine SEM dell'additivo (marker 10 μm); g) immagine allo stereomicroscopio a 0.63X di una porzione di anima frantumata (marker 2 mm).

Per quanto riguarda i leganti, il silicato di sodio è un legante comunemente impiegato nelle anime inorganiche [15–17]. Questo prodotto, chiamato comunemente water glass [12], è in commercio in forma liquida e la quantità necessaria di legante per formare le anime dipende dalla granulometria delle particelle di sabbia. Alcuni autori hanno suggerito l'esistenza di una correlazione tra la resistenza a flessione e la quantità di legante impiegato [18]: all'aumentare della quantità in peso di legante aumenta la resistenza a flessione dell'anima così prodotta; al diminuire del rapporto %SiO<sub>2</sub>/ %Na<sub>2</sub>O aumenta la resistenza a flessione.

Gli additivi vengono impiegati per stabilizzare il sistema sabbia-legante aumentandone la stabilità in fase di stoccaggio, riducendo la tendenza all'assorbimento dell'umidità atmosferica. Comunemente si adottano sali inorganici,

ossidi, acidi organici, esteri etc. [19–21]. In [18] è stata proposta una relazione che tiene in conto il tempo di stoccaggio delle anime in magazzino come parametro per valutare la diminuzione della resistenza a flessione dovuta allo stoccaggio ed immagazzinamento di umidità. Questa relazione può essere vista come un parametro di bontà degli additivi impiegati. Alcuni additivi vengono opportunamente adottati al fine di ridurre anche la bagnabilità delle anime, in modo da ottenere una superiore qualità superficiale dei getti [22,23]. Un esempio di aspetto dell'additivo è mostrato in Fig. 1 (c, f): la granulometria dell'additivo risulta essere molto più fine rispetto a quella delle sabbie, per cui è risolvibile solamente via SEM (spettroscopia elettronica a scansione) e non tramite stereomicroscopia come negli altri campioni mostrati in figura

### **Produzione e caratterizzazione delle anime.**

#### **Difetti nei getti**

I processi di formatura delle anime sono vari e si distinguono in base al sistema di consolidamento delle stesse, in dipendenza della tipologia di legante usato. I processi di indurimento si distinguono in processi di tipo chimico e di tipo fisico. I processi di tipo chimico prevedono trattamenti con CO<sub>2</sub> o con aggiunta di indurenti come il cemento o polveri di ferrosilicio in fase di miscelazione. I sistemi di indurimento fisico sono invece processi di disidratazione quali Hot Box [24] o microonde [18], e garantiscono resistenze meccaniche superiori rispetto ai processi chimici. L'indurimento fisico tradizionale Hot Box prevede la disidratazione del water glass attraverso un processo di riscaldamento, in cui le proprietà reologiche variano sino ad ottenere ponti di silicato vetroso tra i grani di sabbia [25]. Secondo alcuni autori [18,26], tramite indurimento con microonde si ottengono migliori proprietà meccaniche, unitamente a tempi di produzione più rapidi. In questo processo la disidratazione avviene per effetto di microonde, per cui la cassa d'anima dovrà essere prodotta in materiali specifici che permettano il passaggio delle stesse.

Le anime, una volta formate, se non utilizzate, vengono riposte nel magazzino anime su opportuni carrelli. Nel magazzino anime l'umidità relativa dell'ambiente necessita di un controllo tramite deumidificatore, mentre il ricambio d'aria è garantito da un sistema di ventilazione. La temperatura del magazzino solitamente non è controllata ed è quindi soggetta a variazioni imposte dalle condizioni cli-

matiche, per cui è buona norma utilizzare le anime entro le 72 ore dalla produzione.

La rigenerazione della sabbia è un processo di fondamentale importanza nel settore industriale, poiché permette l'ottenimento di un duplice vantaggio: minori problematiche relative allo smaltimento e risparmio economico, sia perché si smaltisce di meno sia perché si acquista un minor quantitativo di sabbia nuova.

La rigenerazione si suddivide in primaria, secondaria e autorigenerazione. Nella rigenerazione primaria si parte dalle anime, che vengono fratturate sino ad ottenere la sabbia libera. Un secondo step definito rigenerazione secondaria prevede l'eliminazione dei residui di legante ancora presente sui grani di sabbia attraverso trattamenti meccanici o calcinazioni. La rigenerazione secondaria è necessaria per avere una qualità della sabbia sufficiente per il riutilizzo.

L'autorigenerazione della sabbia avviene attraverso la calcinazione che avviene nello strato più esterno dell'anima già in fase di colata del getto, laddove il carico termico è notevole. Per queste ragioni è più comune avvenga nelle fonderie di ghisa o acciaio che non nelle fonderie di leghe leggere.

La rigenerazione primaria prevede la frattura delle anime con griglie vibranti, la separazione delle bave metalliche, la separazione in grani delle anime con l'impiego di setacci vibranti, l'eliminazione dei fini con operazioni a letto fluido, raffreddamento o riscaldamento della sabbia e infine stoccaggio in silo in attesa del riutilizzo.

La rigenerazione secondaria prevede l'eliminazione del legante, via processi meccanici (urto tra grani di sabbia),

processi di calcinazione, processi ad umido (per le sabbie provenienti da formatura a verde). La rigenerazione della sabbia legata con leganti inorganici risulta più difficoltosa, perché vi sono additivi refrattari e per questa ragione richiede alte temperature. Inoltre, il trattamento termico non elimina l'additivo: per questa ragione le sabbie appaiono differenti nella condizione di nuova e rigenerata (Fig. 1-a, b). La sabbia rigenerata viene sottoposta ad ulteriori trattamenti meccanici definiti 'di spoglio' in cui attraverso setacciatura si selezionano solamente determinate taglie delle particelle. Al termine delle operazioni la percentuale dei fini può essere considerevole e per ripristinare la granulometria prestabilita si deve integrare la sabbia rigenerata con sabbia nuova.

Normalmente, sulle sabbie si eseguono una serie di analisi prima della loro messa in ciclo. La distribuzione granulometrica si determina adottando una serie di setacci normalizzati (normative ISO 565:1990 ed ISO 3310-1:2016) ed il risultato si riporta su una gaussiana. L'indice di finezza, o percentuale dei fini, indica la dimensione media dei grani di sabbia, e si calcola adottando opportuni coefficienti e tenendo in conto le percentuali di sabbia trattenute dai setacci durante l'analisi della granulometria. La percentuale dei fini va controllata e ridotta il più possibile, visto che il tenore di legante è correlato all'area superficiale della sabbia impiegata. In Figura 2 è mostrato un esempio di valutazione dimensionale rapida, effettuabile in laboratorio, per le sabbie. Tale misurazione può essere effettuata sem-

plimente tramite stereomicroscopio, al fine di valutare eventuali differenze macroscopiche tra le sabbie nuove e rigenerate in fase di produzione. Dalle misure effettuate si osserva che la dimensione della sabbia nuova risulta inferiore (anche se di poco)

a quella della sabbia rigenerata ed alla dimensione di una porzione di anima sgretolata. Ciò è coerente con le considerazioni effettuate in precedenza: sulla sabbia rigenerata, così come sulla porzione di anima sgretolata possono esserci residui di additivo che portano ad un aumento dell'aspect ratio della sabbia. Appare evidente come sia necessario un numero elevato di misurazioni al fine di avere valori statistici affidabili.

Un'altra misura importante è rappresentata dall'umidità della sabbia. Essa viene misurata a 110°C e dovrebbe restituire una variazione di peso quanto più possibile contenuta. Le anime possono eventualmente essere verniciate al fine di contenere l'assorbimento di umidità, adottando vernici all'acqua, per non introdurre sostanze organiche. La perdita a calcinazione a 900°C serve ad evidenziare la presenza di sostanze che bruciando ad alta temperatura possono compromettere la qualità della sabbia immessa nel ciclo. La richiesta acida o basica indica l'acidità (o basicità) residua della sabbia ed è un parametro che indica la reattività della stessa quando posta in contatto con il legante. Il contenuto di azoto (in ppm) è un parametro critico perché l'azoto, se presente, porta ad aver soffiature nei getti prodotti.

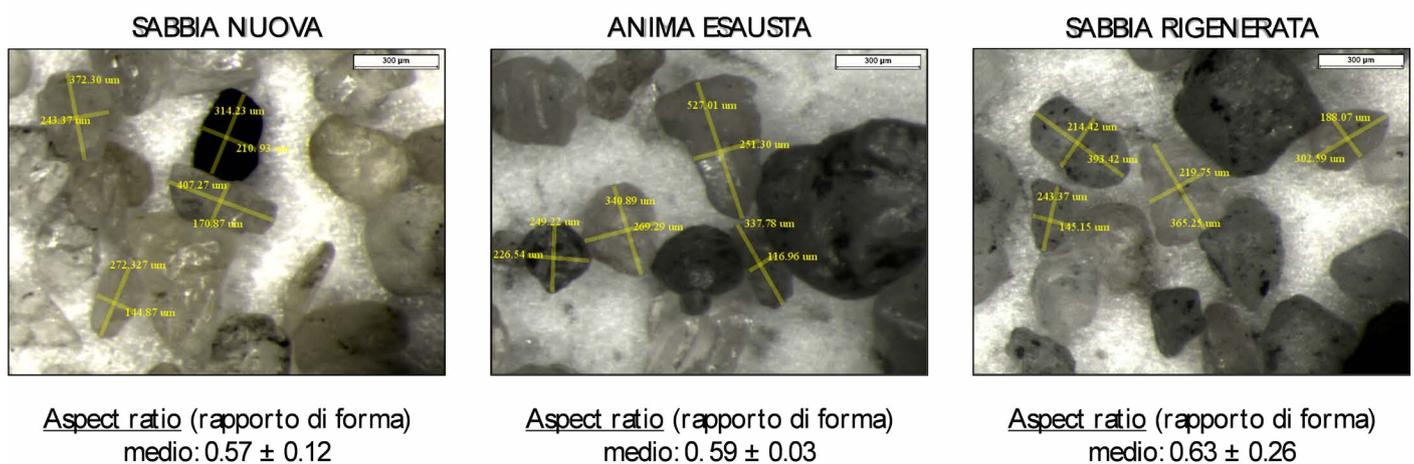


Fig. 2 - Valutazione della forma della sabbia. Misurazioni effettuate tramite analisi di immagine su micrografie ottenute allo stereomicroscopio.

Le prove meccaniche di flessione, le misure di assorbimento di umidità e le misure di sviluppo di gas sono fra le prove più indicative al fine di valutare la bontà dell'anima. In particolare, i risultati di tali prove sono fra loro strettamente correlati, poiché l'immagazzinamento di umidità causa una diminuzione della resistenza a flessione. Prove di termogravimetria (TGA) o termogravimetria accoppiata alla spettroscopia infrarossa (TGA-IR) possono rappresentare un utile strumento per la valutazione della percentuale di umidità e composti volatili presenti all'interno dell'anima. Con la TGA si valuta la perdita di peso che avviene ad elevata temperatura (la temperatura di prova è selezionabile ad esempio nell'intervallo delle temperature di lavoro delle anime) e la risposta ottenibile è il peso della frazione residua di materiale, mentre con l'IR si valuta quantitativamente la natura della componente in peso persa. In particolare l'analisi IR risulta indicativa per le sabbie organiche, laddove è possibile distinguere quali siano i fumi prodotti, mentre per le anime inorganiche si ottiene come riscontro solamente un rilascio di umidità. Industrialmente, è più comune la misurazione della perdita di peso con l'adozione di termobalance, valutando le variazioni di peso di un'anima deumidificata in camera climatica che viene successivamente riscaldata. Dal momento che le anime inorganiche sviluppano soltanto vapore acqueo ad elevate temperature, sono sufficienti misure TGA o misure con termobalance per la valutazione del tenore di gas sviluppato. Infatti, questo è un parametro importante poiché incide sulla qualità

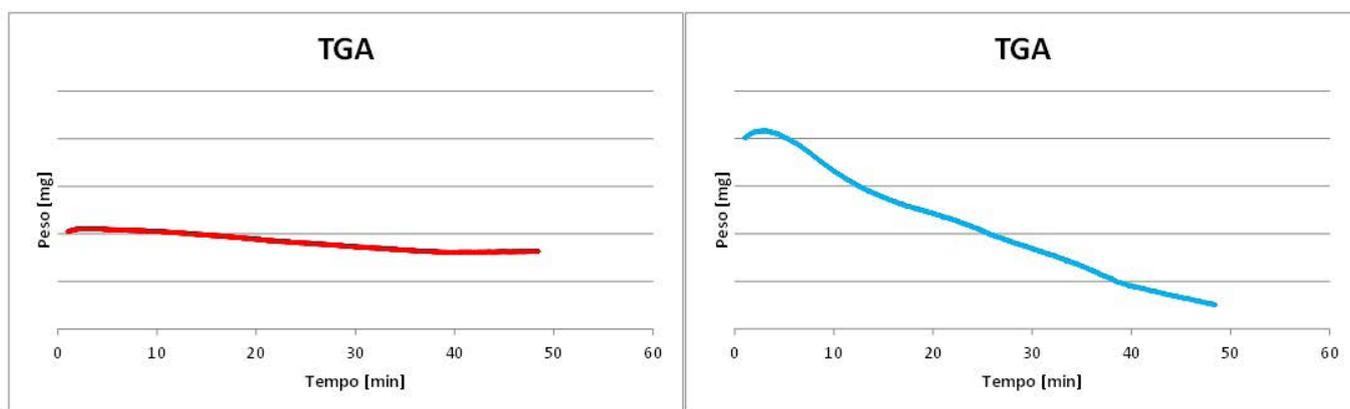
del getto: un tenore di umidità elevato provocherebbe infatti soffiature e porosità nei getti.

In Figura 3, sono mostrati i risultati ottenuti in seguito all'analisi TGA di due porzioni di anime realizzate con differenti leganti (i dati numerici, in quanto sensibili, non sono mostrati). Quello che si deduce, a parità di condizionamento in camera climatica e tempi e temperature di prova, è che la TGA in rosso (grafico a sinistra in Figura 3) inquadra un prodotto con meno tendenza all'assorbimento di umidità rispetto a quello in blu (grafico a destra in Figura 3).

In Figura 4 sono mostrati due spettri ATR-FTIR (i dati numerici, in quanto sensibili, non sono mostrati.) relativi a differenti additivi e degli spettri XRD che identificano gli elementi che compongono leganti e anime. Da questi grafici è possibile effettuare un'indicizzazione dei picchi al fine di valutare la composizione dei prodotti analizzati.

In Figura 5 sono mostrati dei risultati ottenuti tramite DSC (i dati numerici, in quanto sensibili, non sono mostrati) per vari campioni composti da sabbia, anime e legante. Solo un campione differisce rispetto ai trend mostrati.

Dai grafici DSC è quindi possibile evidenziare il comportamento di un campione ignoto grazie alle transizioni termiche rilevate. In particolare riferendosi alla Figura 4 si può dedurre che il campione ignoto avente il trend di colore azzurro è di natura differente dai campioni rimanenti, e che, presumibilmente non si tratta di sabbia poiché non si osserva alcuna transizione.



**Fig. 3** - TGA effettuate su due differenti porzioni di anima dopo condizionamento in camera climatica

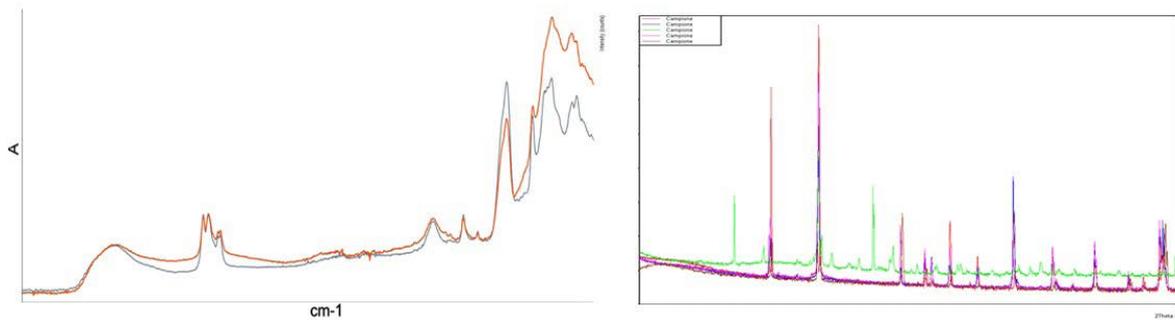


Fig. 4 - Spettro ATR per due additivi (a sinistra) e pattern XRD per campioni di varia natura (a destra).

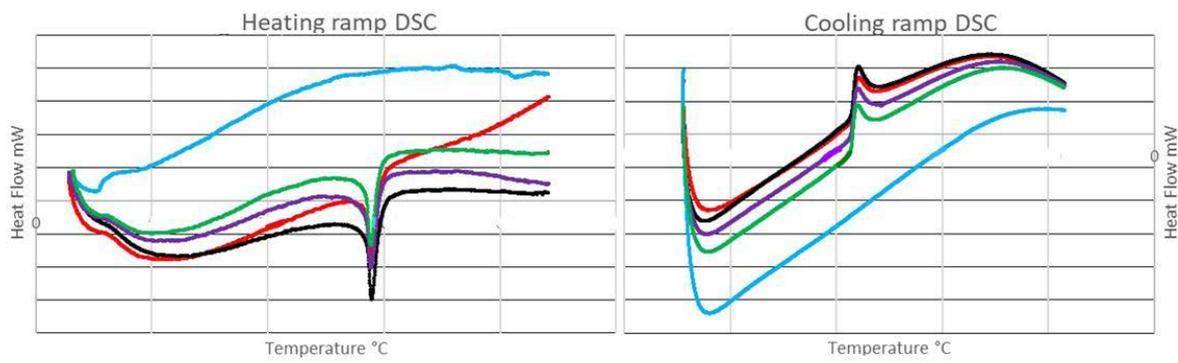


Fig. 5 - DSC per vari campioni di sabbie/ anime.

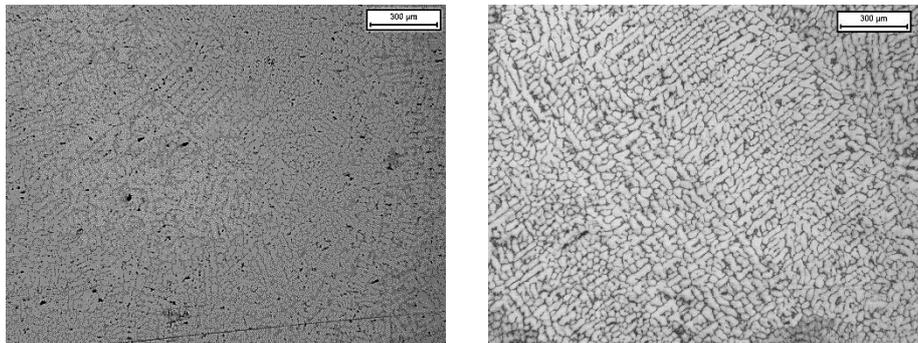


Fig. 6 - Immagine al microscopio ottico. Ingrandimento 10X. Getti colati in gravità. Microstruttura di solidificazione fine (a sinistra) e grossolana (a destra).

## Conclusioni

Negli ultimi anni le stringenti normative in materia ambientale hanno spinto le aziende verso politiche industriali più ecologiche. In tal senso, l'adozione di leganti inorganici a fronte dei tradizionali leganti organici rappresenta una scelta efficace, poiché porta ad avere emissioni ambientali di solo vapore acqueo a fronte di emissioni odorose di sostanze organiche potenzialmente nocive. I leganti inorganici utilizzano infatti come solvente acqua, mentre la matrice legante è composta da una miscela di silicati, fosfati e borati. I principali vantaggi nell'adottare le anime a legante inorganico risiedono in:

- Eliminazione delle emissioni carboniose dovute all'adozione di leganti organici, che si traduce anche in una riduzione dei costi dei circuiti di aspirazione. Le anime rilasciano infatti solo vapore acqueo, in quantità variabile in dipendenza delle condizioni di stoccaggio.
- Buona qualità dei getti (parametro in costante evoluzione nel corso degli anni) grazie alla presenza di efficaci additivi miscelati insieme alle polveri che diminuiscono la bagnabilità delle anime. Inoltre, la verniciatura delle anime con vernici all'acqua influisce migliorando ulteriormente la qualità superficiale dei getti.
- Microstruttura più fine nelle zone dei getti a contatto con le anime grazie all'elevata capacità termica delle anime inorganiche.
- Le analisi di laboratorio sono un utile strumento per il monitoraggio dei prodotti e la comparazione di sabbie, leganti e additivi. La termogravimetria, come mostrato, può dare risposte inerenti il rilascio di umidità in fase di colata. DSC, XRD e spettri ATR invece possono aiutare a monitorare le composizioni, unitamente ad analisi semi-quantitative (EDS).

## RIFERIMENTI

- [1] B. J. Stauder, H. Kerber, and P. Schumacher, "Foundry sand core property assessment by 3-point bending test evaluation," *J. Mater Process. Technol.*, vol. 237, pp. 188–196, Nov. 2016.
- [2] B. J. Stauder, H. Harmuth, and P. Schumacher, "De-agglomeration rate of silicate bonded sand cores during core removal," *J. Mater Process. Technol.*, vol. 252, pp. 652–658, Feb. 2018.
- [3] F. Czerwinski, M. Mir, and W. Kasprzak, "Application of cores and binders in metalcasting," *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 28, no. 3. Maney Publishing, pp. 129–139, 2015.
- [4] N. Kaznica, J. Zych, and J. Mocek, "Gases Emission from Surface Layers of Sand Moulds and Cores Stored under the Humid Air Conditions," *Arch. Foundry Eng.*, vol. 17, no. 4, pp. 79–84, Dec. 2017.
- [5] N. Tiedje, R. Crepaz, T. Eggert, and N. Bey, "Emission of organic compounds from mould and core binders used for casting iron, aluminium and bronze in sand moulds," *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, vol. 45, no. 14, pp. 1866–1876, Dec. 2010.
- [6] A. Kmita, C. Fischer, K. Hodor, M. Holtzer, and A. Rocznik, "Thermal decomposition of foundry resins: A determination of organic products by thermogravimetry–gas chromatography–mass spectrometry (TG–GC–MS)," *Arab. J. Chem.*, vol. 11, no. 3, pp. 380–387, Mar. 2018.
- [7] R. S. Dungan and J. B. Reeves, "Pyrolysis of foundry sand resins: A determination of organic products by mass spectrometry," *J. Environ. Sci. Heal. - Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, vol. 40, no. 8, pp. 1557–1567, 2005.
- [8] R. Pradyumna, A. Kumar, A. Satyanarayana, and M. A. H. Baig, "Technology of Ceramic Cores-Process, Tooling, Inspection and Applications," in *N.A.M.S. 2015*, 2015, pp. 317–326.
- [9] G. H. Cho, J. Li, E. H. Kim, and Y. G. Jung, "Preparation of a ceramic core with high strength using an inorganic precursor and the gel-casting method," *Surf. Coatings Technol.*, vol. 284, pp. 396–399, 2015.
- [10] S. Dong, Y. Iwata, H. Hohjo, H. Iwahori, T. Yamashita, and H. Hirano, "Shell mold cracking and its prediction during casting of AC4C

- aluminum alloy," *Mater. Trans.*, vol. 51, no. 8, pp. 1420–1427, 2010.
- [11] Y. Motoyama, Y. Inoue, G. Saito, and M. Yoshida, "A verification of the thermal stress analysis, including the furan sand mold, used to predict the thermal stress in castings," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 213, no. 12, pp. 2270–2277, 2013.
- [12] M. Stachowicz, K. Granat, and D. Nowak, "Influence of water-glass grade and quantity on residual strength of microwave-hardened moulding sands . Part 1," *Arch. Foundry Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 93–98, 2011.
- [13] X. Zhou, J. Yang, D. Su, and G. Qu, "The high-temperature resistant mechanism of -starch composite binder for foundry," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 14, pp. 5394–5398, 2009.