

STUDIO SULLA FLUIDITÀ DELLE LEGHE DI ALLUMINIO

M. Di Sabatino

La motivazione di questo studio nasce dall'esigenza di capire meglio i vari fattori che influenzano la fluidità delle leghe di alluminio da fonderia, in particolare la lega alluminio-silicio (Al-Si). I parametri studiati sono stati la temperatura di colata, il raffinamento del grano, il contenuto di idrogeno e di ossidi. Gli esperimenti sono stati svolti a Trondheim (Norvegia) presso l'università NTNU e il centro di ricerche SINTEF. I risultati hanno evidenziato che la temperatura di colata ha un ruolo determinante nell'aumentare la fluidità, mentre non è stato riscontrato nessun effetto significativo dovuto alla presenza di raffinate di grano o ad un alto livello di idrogeno. Un alto livello di ossidi riduce la fluidità. Inoltre, il riciclaggio di materiali da lavorazioni non influenza la fluidità se si presta attenzione al mantenimento più basso possibile del livello di ossidi.

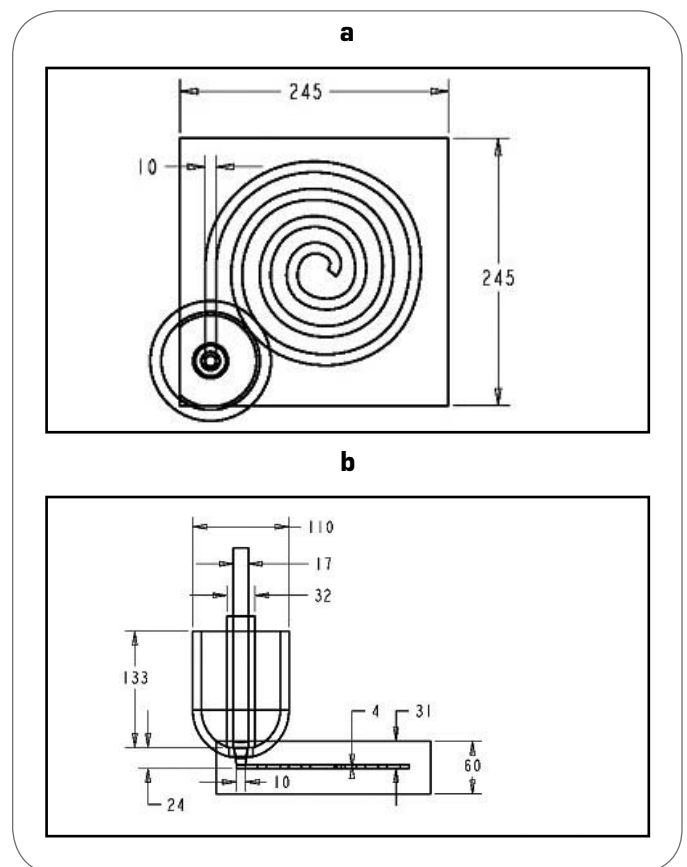
PAROLE CHIAVE: fluidità, colata, alluminio e leghe

INTRODUZIONE

La fluidità di una lega svolge un ruolo chiave per le fonderie e le industrie di trasporto poiché influenza la qualità del prodotto finale, il suo spessore, i tassi di scarto e quindi i costi [1]. Secondo la definizione data da Flemings [2], la fluidità, in fonderia, può essere espressa dalla distanza che un metallo fuso percorre in un condotto a sezione sottile prima di solidificare. Dunque, la definizione di fluidità data in fonderia è diversa da quella data in fisica che vede la fluidità come l'inverso della viscosità, una grandezza strettamente legata alle proprietà termiche del metallo [2]. In fonderia, la fluidità è una complessa proprietà tecnologica che dipende da molti parametri, molti dei quali non ancora completamente chiariti nonostante i numerosi studi svolti [3, 4, 5]. Alcuni di questi studi mostrano, innanzitutto, la necessità di sviluppare uno strumento di alta riproducibilità della misura di fluidità. Inoltre, discrepanze sul ruolo del raffinate di grano sono presenti in letteratura [1, 6, 7]. Lo studio dell'effetto del contenuto di idrogeno e di ossidi non è stato ancora attentamente valutato. Dunque, questo studio intende far luce sull'influenza di vari parametri sulla fluidità delle leghe di alluminio da fonderia, in particolare la lega alluminio-silicio (Al-Si). I parametri studiati sono stati la temperatura di colata, il raffinamento del grano, il contenuto di idrogeno e di ossidi.

PARTE SPERIMENTALE

La Fig. 1 mostra la geometria dello strumento di misura utilizzato in questo studio. Lo strumento è stato sviluppato e costruito al SINTEF (Trondheim, Norvegia). Si tratta di una versione modi-

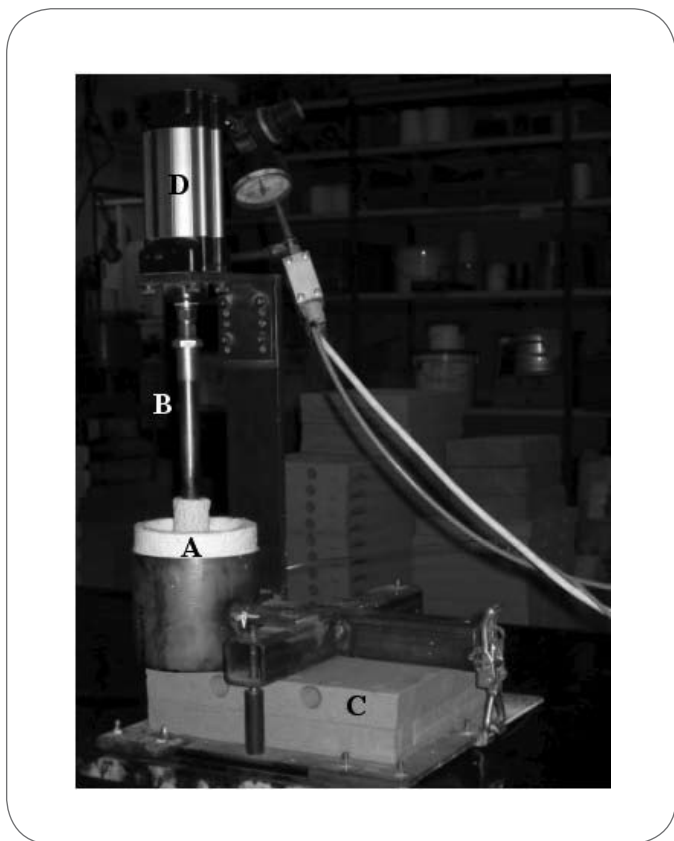


▲
Fig. 1

Geometria dello strumento sperimentale: a) vista verticale e b) vista laterale.

Schematic representation of the experimental equipment: a) top and b) front views.

M. Di Sabatino
SINTEF Materials and Chemistry,
A. Getz v. 2B, 7465 Trondheim, Norvegia
Marisa.di.sabatino@sintef.no



▲
Fig. 2 Componenti principali dello strumento sperimentale: A- crogiolo, B- asta, C- stampo in sabbia, D- valvola pneumatica.

Main components of the experimental equipment: A- crucible, B- stopper rod, C- sand mould, D- pneumatic valve.

ficata del noto test della spirale sviluppato per la prima volta da Saito e Hayashi nel 1919 [8]. La Fig. 2 mostra le sue componenti principali: (i) una valvola pneumatica che attiva un'asta che blocca l'ingresso del metallo nello stampo diviso in due semiforme; (ii) una semiforma superiore che contiene la cavità della spirale archimedeica; e (iii) una semiforma inferiore che è piatta. Lo stampo

è in sabbia con un legante organico (ColdBox). Lo stampo viene sostituito ad ogni test. Il metallo è versato nel crogiolo e la termocoppia, che è qui inserita, registra la temperatura del metallo monitorata tramite computer. Quando la temperatura raggiunge il valore prestabilito (temperatura di colata), la valvola pneumatica attiva l'asta che alzandosi permette l'ingresso del metallo e il riempimento della cavità. La lunghezza della spirale è indice della fluidità, secondo la definizione universalmente accettata dopo gli studi di Flemings [2, 4]. Una maggiore descrizione dello strumento sperimentale è presente in altri lavori [9, 10]. Per tutti gli esperimenti è stato utilizzato un forno ad induzione con una capacità massima di 50kg.

Per lo studio dell'effetto della temperatura di colata e del raffinamento del grano sulla fluidità è stata utilizzata una lega standard A356, la cui composizione chimica è riportata in Tab. 1. L'elemento raffinate, Ti, è stato aggiunto tramite la lega Al-5wt%Ti-1wt%B (wt% è la percentuale in peso). Le aggiunte sono state di 0.01, 0.02, 0.04 wt% Ti, rispettivamente.

Per lo studio dell'effetto del contenuto di idrogeno sulla fluidità è stato utilizzato il metodo PoDFA (Porous Disc Filtration Analysis) [11] per identificare e quantificare il contenuto di ossidi e inclusioni (Fig. 3). Nel metodo PoDFA un campione di metallo fuso viene versato su un crogiolo avente un filtro alla base. Il metallo passa attraverso il filtro, viene raccolto in un secondo crogiolo e pesato. Dopo il raffreddamento in aria, la parte del campione immediatamente al di sopra del filtro viene analizzata al microscopio ottico per l'analisi di ossidi e inclusioni. Maggiori dettagli di questo metodo sono presenti in Ref. [12]. Il contenuto di idrogeno è stato modificato immergendo pezzi di legno secco nella lega fusa. Successivamente il fuso è stato mescolato e l'accumulo di scoria in superficie è stato rimosso con una spatola d'acciaio. Le concentrazioni di idrogeno misurate con ALSCAN [13] sono state pari a 0.13, 0.15 e 0.43 ml di idrogeno per 100 g di metallo fuso. Inoltre, per una valutazione qualitativa immediata del livello di idrogeno, l'RPT (Reduced Pressure Test - test a pressione ridotta) [12, 14] è stato effettuato prima dell'inizio degli esperimenti. La porosità è stata calcolata dalle misure di densità (differenza in acqua e aria) per campioni selezionati per ogni livello di idrogeno dopo solidificazione.

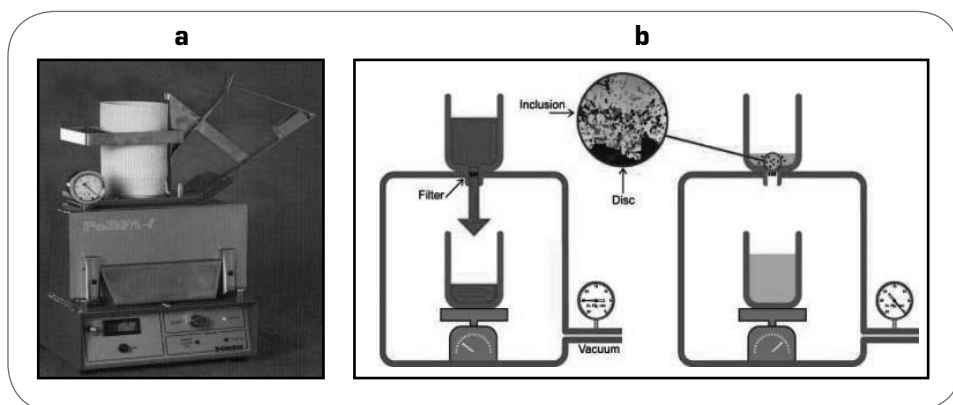
Per lo studio dell'effetto degli ossidi è stata utilizzata una lega standard A356 e, successivamente, alla stessa lega sono state aggiunte 20% e 50% di materiale riciclato da lavorazioni di presso colata (miscuglio di leghe Al-7wt%Si e Al-11wt%Si). La composizione chimica delle tre leghe è riportata in Tab. 2.

Si	Mg	Fe	Sr	Ti	Ga	Cu	Mn	Zn	Ca	Al
6.6	0.38	0.198	0.021	0.059	0.01	0.004	0.004	0.005	0.003	Bal.

▲
Tab. 1 Composizione chimica (wt. %) della lega utilizzata nello studio dell'effetto della temperatura e del raffinamento del grano.
Chemical composition (wt. %) of the alloy used for the study of the effect of casting temperature and grain refinement.

Alloy	Si	Fe	Mg	Ti	Cu	Sr	Na	Al
A356	6.81	0.118	0.36	0.103	0.0001	0.0013	0.0001	Bal.
A356+20%	6.78	0.119	0.31	0.102	0.0004	0.0036	0.0001	Bal.
A356+50%	6.70	0.119	0.26	0.089	0.0005	0.0053	0.0001	Bal.

▲
Tab. 2 Composizione chimica delle tre leghe usate per lo studio dell'effetto degli ossidi (wt. %).
Chemical composition of the three alloys used for the study of the effect of oxide content (wt. %).



▲
Fig. 3

a) Metodo PoDFA [11]: il metallo liquido è versato in un crogiolo e posizionato sulla camera sottovuoto; b) schema della procedura: il metallo è aspirato nella camera sottovuoto e attraversa il filtro che si trova alla base del crogiolo. Dopo raffreddamento, la parte superiore del filtro è tagliata e preparata per l'analisi al microscopio.

(a) PoDFA equipment [11]: the molten metal is poured in a crucible and placed on top of the vacuum chamber; (b) schematic illustration of the process: the metal is sucked by the vacuum and forced to flow through the porous filter disc which is cut and prepared for the microscopy investigation.

Temperatura, °C	Numero di spirali	Lunghezza media, \bar{x} , mm	Deviazione standard della media, s_m , mm
700	10	460	10
715	20	542	7
730	10	630	10

▲
Tab. 3

Risultati dell'influenza della temperatura di colata.

Results of the study of the influence of casting temperature.

Livello di raffinante di grano, wt.% Ti	Lunghezza media $\pm s_m$, mm
0	540 \pm 10
0.01	550 \pm 10
0.02	560 \pm 10
0.04	550 \pm 20

▲
Tab. 4

Lunghezza media delle spirali e deviazione standard, s_m , per ogni livello di raffinate di grano.

Average length of the spirals and standard deviation in the mean value, s_m , for each level of grain refinement.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Effetto della temperatura di colata

La Tab. 3 presenta i risultati dello studio dell'effetto della temperatura di colata. Questi risultati sono riportati in Fig. 4 che mostra come la fluidità della lega aumenti linearmente con l'aumento della temperatura di colata. L'equazione di questa retta è:

$L_f = 5.6t - 3480$, dove L_f è la lunghezza della spirale (mm) e T la temperatura di colata (°C). Da questa equazione si può estrapolare che la lunghezza della spirale cresce dell'1% all'aumentare di 1°C della temperatura di colata.

Effetto del raffinamento del grano

Nelle Fig. 5 e 6 sono riportate le micrografie al microscopio ottico senza e con luce polarizzata (dopo trattamento di anodizzazione). La prima immagine mostra la forma delle dendriti e la morfologia dell'eutettico. Nella Fig. 6 è possibile notare il confronto tra un campione senza e con raffinate di grano. Chiaramente la dimensione dei grani del campione con raffinate di grano è inferiore. Questo dimostra che l'aggiunta di AlTi5B1 ha avuto effetto sulla microstruttura dei campioni. Tuttavia, come mostrano i risultati delle misure di fluidità in Tab. 4, non c'è nessun effetto significativo di queste aggiunte dal punto di vista della fluidità delle leghe.

Effetto del contenuto di idrogeno

La Fig. 7 mostra i risultati dell'RPT. Chiaramente il campione con il più alto livello di idrogeno mostra un'alta porosità. Le misure di porosità sono riportate nella Tab. 5.

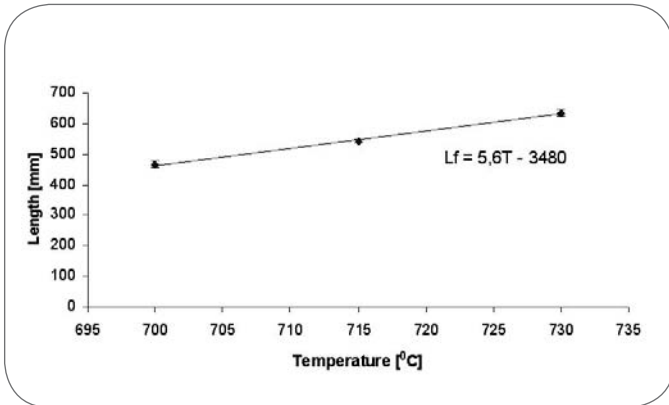
La Tab. 6 mostra i risultati dell'analisi PoDFA. La differenza nel contenuto di inclusioni per i due campioni con basso (P) e alto (H) contenuto di idrogeno non è significativa.

Effetto del contenuto di ossidi

Le misure di fluidità per la lega standard A356 e le due leghe con aggiunte di materiale riciclato, rispettivamente A356+20% e A356+50%, sono indicate in Fig. 8. La Tab. 7 contiene i risultati dell'analisi PoDFA con il valore di inclusioni e ossidi per ciascun campione.

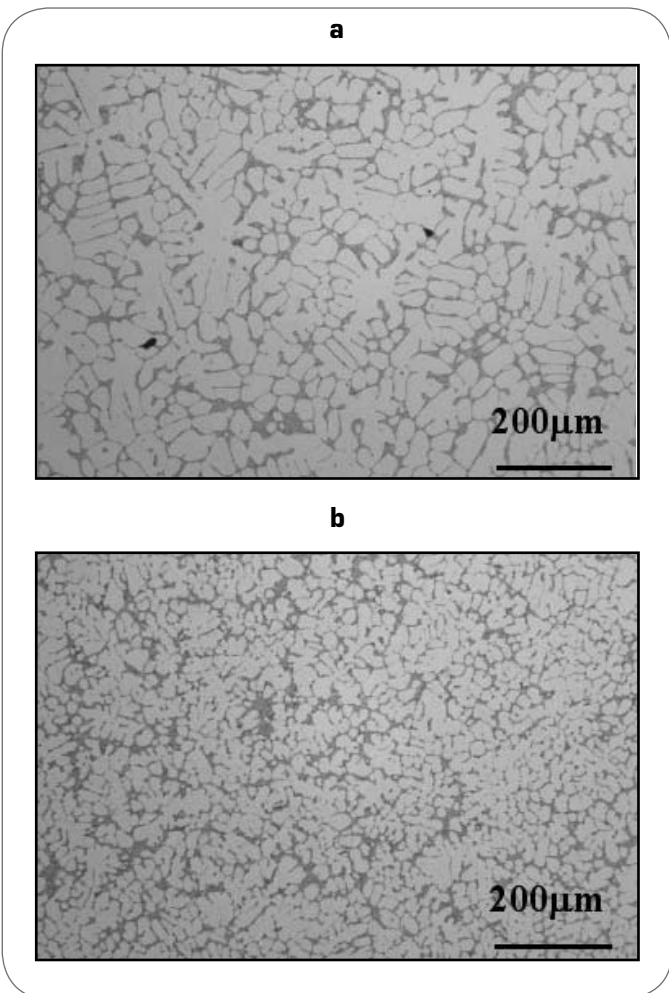
La Tab. 7 mostra i risultati delle misure effettuate sui campioni PoDFA attraverso le immagini al microscopio ottico. Il contenuto di inclusioni è misurato come area delle inclusioni per massa di metallo filtrato (mm²/kg), mentre i film di ossidi (per esempio Al₂O₃ e MgO) sono misurati come numero di ossidi per massa di metallo filtrato (N/kg). È evidente che la lega standard A356 senza aggiunte di materiale riciclato ha il più basso contenuto

di inclusioni e ossidi. Aggiungendo il 20% di materiale riciclato a questa lega il numero di ossidi aumenta di circa un fattore venti. Tuttavia, ulteriori aggiunte (50%) non hanno in proporzione aumentato il contenuto di ossidi. Ciò può essere dovuto alla natura di alcuni ossidi che vengono trattenuti dal fuso e/o alla tendenza degli ossidi di essere spinti in superficie. In genere, le inclusioni possono essere più leggere o più pesanti del fuso. I primi tendo-



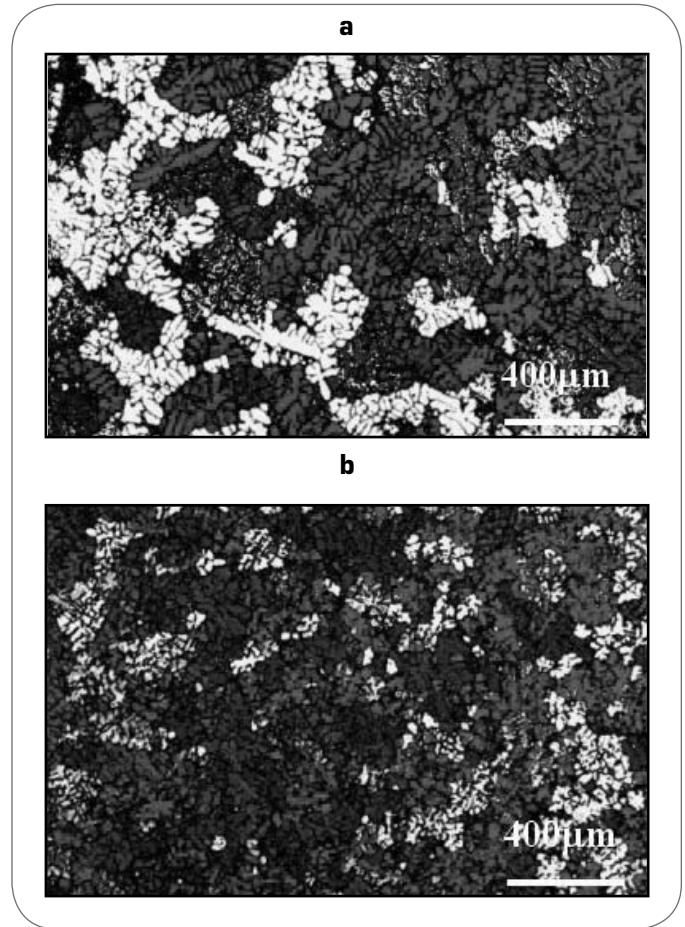
▲
Fig. 4

Lunghezza della spirale in funzione della temperatura di colata.
Spiral length versus casting temperature. The equation of the trend line is also shown.



▲
Fig. 5

Micrografie ottiche del campione contenente raffinate di grano (0.01 wt% Ti) dalla a) base e b) punta della spirale.
Optical micrographs of a refined sample (0.01 wt% Ti) from a) base, and b) tip of the spiral.



▲
Fig. 6

Immagine a luce polarizzata del campione contenente raffinate di grano (0.01 wt% Ti) dalla a) base e b) punta della spirale.
Polarised light micrographs of a refined sample (0.01 wt% Ti) from a) base, and b) tip of the spiral.

no ad essere spinti in superficie dove sono raccolti sottoforma di scoria; gli altri, invece, si accumulano sul fondo del forno (“fanghiglia”) [15]. Inoltre, è possibile che il contenuto di inclusioni e ossidi sia stato influenzato dalle turbolenze che accompagnano i forni a induzione, come il tipo di forno che è stato utilizzato in questo studio. Ulteriori e sistematiche analisi sono necessarie per dare un maggiore chiarimento. La differenza non significativa per quanto riguarda il contenuto di ossidi e inclusioni può essere la ragione per la differenza non significativa delle misure di fluidità per le due leghe (A356+20% e A356+50%) come mostra la Fig. 8. Appare evidente da questo studio che la percentuale di materiale riciclato non influenzi la fluidità, dato un simile contenuto di ossidi e inclusioni. Quindi, il riciclaggio di leghe di alluminio è possibile, oltre che conveniente, a livello industriale senza deteriorare le proprietà di colabilità, ponendo particolare attenzione nel mantenere il livello di ossidi e inclusioni il più basso possibile (per esempio attraverso l’uso di filtri). Questi risultati sono in accordo con le osservazioni presso l’azienda norvegese Fundo Wheels AS [16] che, dopo l’aggiunta del 40% di materiale riciclato alle loro leghe, non ha rilevato alcun cambiamento nel prodotto finito a livello di resistenza a trazione, percentuale di porosità e scarto. Le investigazioni al microscopio ottico (Fig. 9) hanno rivelato che la lega A356 ha un bassissimo livello di ossidi e inclusioni. Il solo

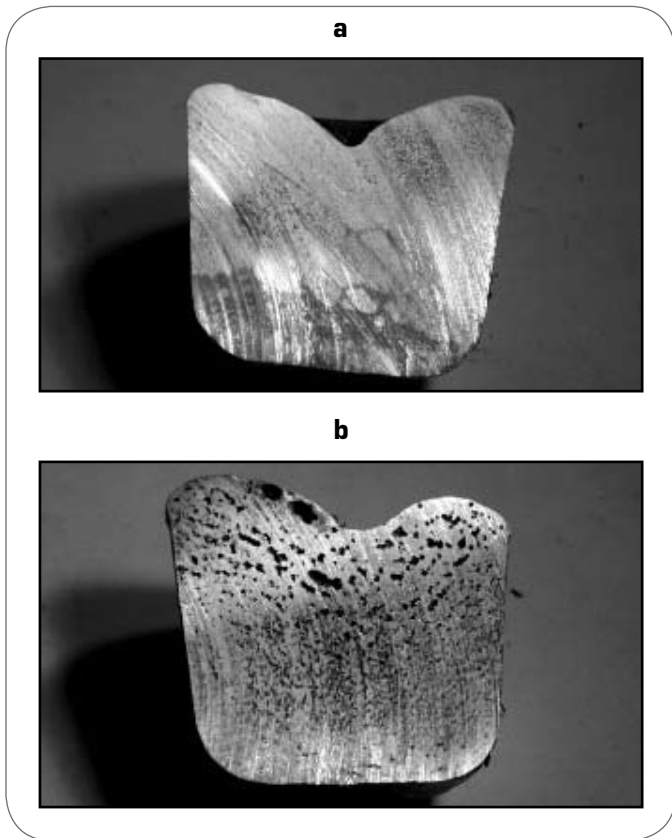


Fig. 7 Risultati del RPT per a) basso livello di idrogeno, e b) alto livello di idrogeno. Samples from the reduced pressure test: a) after purging (hydrogen level 0.13 ml/100g); b) after hydrogen addition (hydrogen level 0.43 ml/100g).

tipo di inclusioni che è possibile osservare è TiB_2 poiché la lega contiene $AlTi_5B_1$ come raffinate di grano. Nelle leghe A356+20% e A356+50%, le aggiunte di materiale riciclato da precedenti lavorazioni hanno diminuito la purezza. Il livello di film di ossidi è aumentato come pure quello di inclusioni. In particolare, si osservano particelle fini di TiB_2 e allumina (Al_2O_3). I campioni presentano anche $MgAl_2O_4$.

CONCLUSIONI

I risultati di questo studio sperimentale hanno evidenziato che:
- la temperatura di colata ha un ruolo determinante nell'aumen-

Idrogeno, ml/100g	Porosità, %	σ_m , %
P	0.13	1.9
A	0.15	1.4
H	0.43	3.7

Tab. 5 Porosità (%) calcolata dalle misure di densità per campioni selezionati per ogni livello di idrogeno. La deviazione standard del valore medio, σ_m , è riportata. Porosity (%) measured from the density of the selected samples for each level of hydrogen. The standard deviation in the mean values is also calculated.

Campione	Inclusioni, ppm volume
P	2.2
H	1.5

Tab. 6 Concentrazione di inclusioni per basso e alto livello di idrogeno, P e H, rispettivamente. Level of inclusions for low and high level of hydrogen, P and H, respectively.

	A356	A356+20%	A356+50%
Inclusioni, mm ² /kg	0.438	0.967	1.305
Ossidi, N/kg	2	46	25

Tab. 7 Risultati dell'analisi PoDFA. I risultati mostrano il livello di inclusioni e ossidi per ciascuna lega: A356, A356+20% e A356+50%. Results of the PoDFA analysis. Level of inclusions and oxides for each alloy: A356, A356+20% and A356+50%.

tare la fluidità;
- non è stato riscontrato alcun effetto significativo dovuto alla presenza di raffinate di grano o ad un alto livello di idrogeno;
- un alto livello di ossidi riduce la fluidità;
- il riciclaggio di materiali da lavorazioni non influenza la fluidità se si presta attenzione a mantenere il livello di ossidi il più basso possibile.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il Prof. Lars Arnberg (NTNU, Norvegia) e il Dott. Øyvind Nielsen (SINTEF, Norvegia) per interessanti discussioni e preziosi suggerimenti. Si ringraziano i finanziamenti ricevuti dal progetto norvegese NorLight (Stampaggio di Metalli Leggeri), NTNU, SINTEF e il Consiglio di Ricerche Norvegese (NFR).

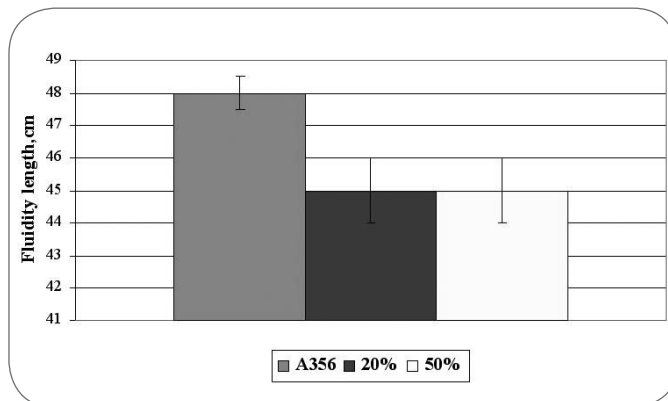
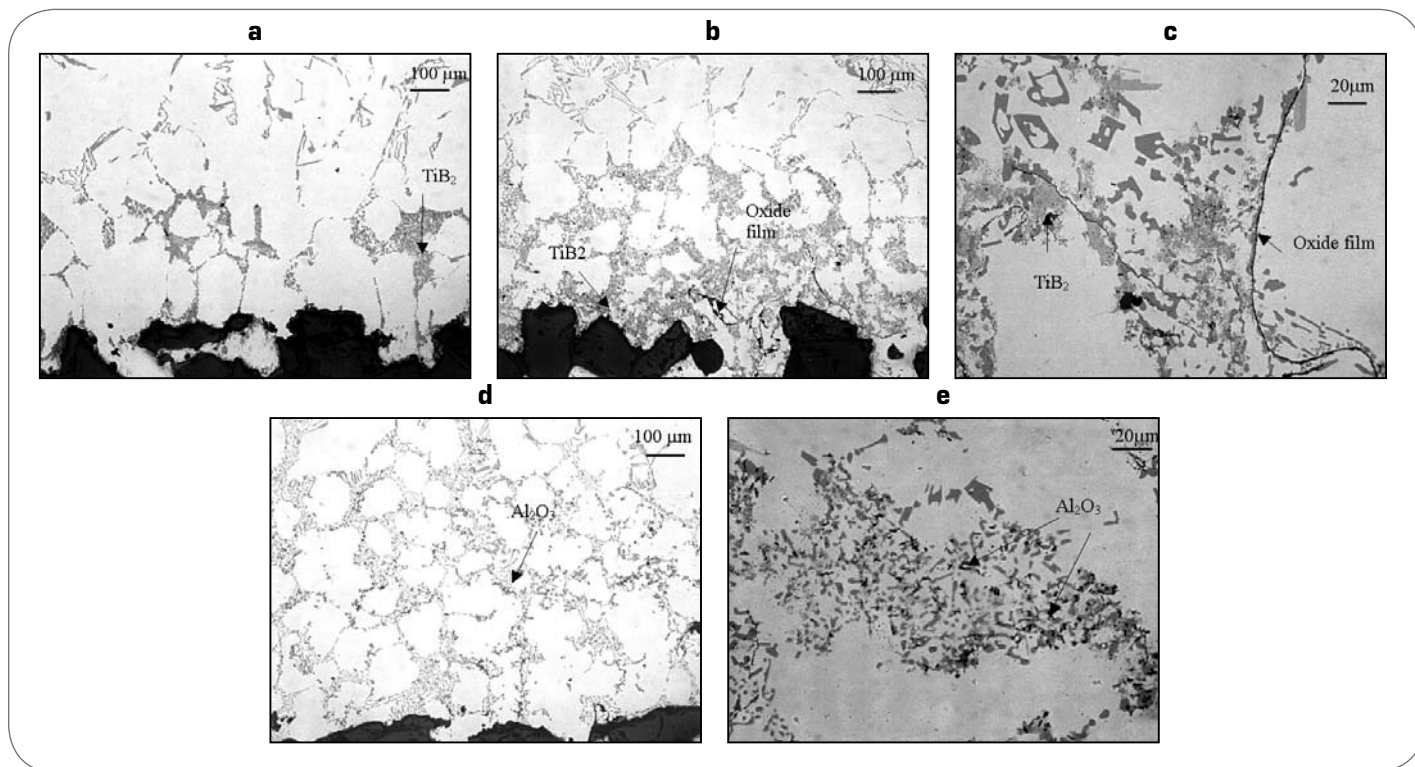


Fig. 8 Misura della fluidità per le leghe A356, A356+20% riciclato, e A356+50% riciclato. L'errore standard è riportato. Fluidity measurements for the alloys: A356, A356+20% recycled, and A356+50% recycled, respectively. The standard error is also shown.



▲
Fig. 9

Micrografie ottiche dei campioni selezionati per l'analisi PoDFA: a) A356; b) A356+20%; c) A356+20% (alta risoluzione); d) A356+50%; e) A356+50% (alta risoluzione).

Optical micrographs of the investigated samples from the PoDFA tests: (a) A356; (b) A356+20%; (c) A356+20% (high magnification); (d) A356+50%; (e) A356+50% (high magnification).

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Di Sabatino, PhD Thesis at NTNU, 2005.
- [2] M. Flemings, Solidification processing, McGraw-Hill Inc., London, 1974.
- [3] A. I. Kriniski, AFS Trans., 199-411, 1953.
- [4] M. Flemings, E. Niyama, H. F. Taylor, AFS Trans., 625-635, 1961.
- [5] M. Di Sabatino e L. Arnberg, Metall. Sc. and Tech., Teksid Aluminium, 22, 9-15, 2004.
- [6] A. K. Dahle S. Karlsen, L. Arnberg, Int. J. of Cast Metals Res., 9, 103-112, 1996.
- [7] Y. D. Kwong e Z. H. Lee, Mat. Sc. Eng. A, 60, 372-376, 2003.
- [8] D. Saito e K. Hayashi, Memoirs of the College of Engineering, Kyoto Imperial University, 2, 83-100, 1919.
- [9] M. Di Sabatino, F. Syvertsen, L. Arnberg, A. Nordmark, Int. J. of Cast Metals Res., 18, 59-62, 2005.
- [10] M. Di Sabatino e L. Arnberg, Int. J. of Cast Metals Res., 18, 181-186, 2005.
- [11] PoDFA, User's Manual, ABB Bomem Inc., Revision October 2003.
- [12] M. Di Sabatino, L. Arnberg, S. Rørvik, A. Prestmo, Mat. Sc. Eng. A, 413, 272-276, 2005
- [13] ALSCAN Hydrogen analyser, ABB Bomem Inc., www.abb.com
- [14] Metals Handbook, 9th Edition, ASM Int., 15, p.459, 1988.
- [15] H. Görner e T. A. Engh, Melt Quality, Technical Report for NorLight, p. 26, 2003.
- [16] A. Prestmo, Private communication, March 2005.

ABSTRACT

ON FLUIDITY OF ALUMINIUM ALLOYS

Keywords: fluidity, casting, aluminium foundry alloys

The fluidity of an alloy plays a key role for the foundry and transport industries as it affects the quality and soundness of the cast products. Particularly, fluidity influences the reject rates, hence casting costs and the production of thin-walled, hence light components. Fluidity is a complex technological property and depends on many parameters. The motivation of this study is to understand the influence of different parameters affect-

ing fluidity of aluminium foundry alloys, particularly Al-Si alloys. The parameters investigated have been casting temperature, grain refinement, hydrogen and oxide content. The experimental work has been carried out at NTNU and SINTEF Materials and Chemistry in Trondheim (Norway). The results have shown that the casting temperature plays the most important role on fluidity. The increase of casting temperature significantly increases the fluidity of the alloy. The use of grain refinement and high level of hydrogen content does not cause any significant effect on the fluidity of the alloys investigated. The use of recycled alloys does not influence fluidity if the level of oxides is kept as low as possible.