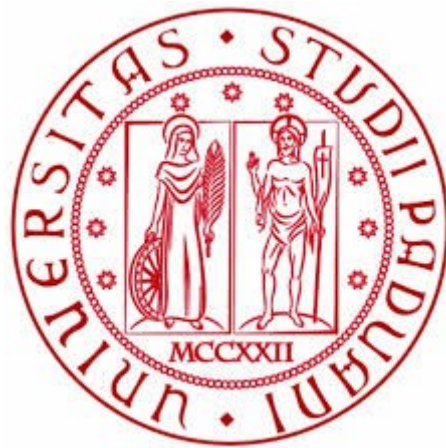


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI  
INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E  
MECCATRONICA  
CURRICULUM MECCANICO



TESI DI LAUREA TRIENNALE:

CARATTERIZZAZIONE E PRODUZIONE DI SCHIUME IN  
LEGA DI ALLUMINIO

Relatore: Ch.mo Prof. Timelli Giulio

Laureando: Dal Molin Marco



## Indice generale

|   |    |
|---|----|
| CAPITOLO 1.....   | 7  |
| L'alluminio e le schiume di alluminio.....                                    | 7  |
| 1.1. L'alluminio.....   | 7  |
| 1.2. Produzione dell'alluminio primario.....                                  | 7  |
| 1.3. Produzione dell'alluminio secondario.....                                | 8  |
| 1.4. Leghe da fonderia.....   | 9  |
| 1.5. Applicazioni delle leghe di alluminio.....                               | 9  |
| 1.6. Le schiume di alluminio.....   | 11 |
| 1.7. Agente soffiante e composto stabilizzante.....                           | 11 |
| 1.8. Metodi di fabbricazione.....   | 13 |
| 1.9. Influenza della temperatura e del tempo sul processo di schiumatura..... | 15 |
| 1.10. Influenza della densità sulle caratteristiche meccaniche.....           | 16 |
| CAPITOLO 2.....   | 21 |
| Procedura sperimentale.....   | 21 |
| 2.1. Introduzione.....  | 21 |
| 2.2. Prelievo dei saggi.....  | 21 |
| 2.3. Misura della densità.....  | 22 |
| 2.3.1. Pesata Archimedeica.....   | 22 |
| 2.3.2. Analisi di immagine.....   | 23 |
| 2.4. Analisi delle porosità.....  | 24 |
| 2.5. Analisi chimica.....   | 24 |
| 2.6. Prova di impatto.....  | 24 |
| 2.7. Compattazione agente schiumante.....                                     | 26 |
| 2.8. Realizzazione della schiuma.....   | 29 |
| CAPITOLO 3.....   | 31 |
| Risultati ottenuti.....   | 31 |
| 3.1. Densità.....   | 31 |
| 3.2. Analisi delle porosità.....  | 37 |
| 3.3. Prova d'impatto.....   | 46 |
| 3.4. Realizzazione di schiume in lega di alluminio.....                       | 51 |
| CAPITOLO 4.....   | 57 |
| Discussione dei risultati ottenuti.....                                       | 57 |
| 4.1. Risultati densità.....   | 57 |
| 4.2. Risultati analisi delle porosità.....                                    | 57 |
| 4.3. Risultati prova di impatto.....  | 57 |
| 4.4. Risultati ottenuti nella creazione della schiuma.....                    | 58 |
| CONCLUSIONI.....  | 59 |
| BIBLIOGRAFIA.....   | 60 |





# INTRODUZIONE

La ricerca di componenti sempre più leggeri e prestazionali ha portato allo studio di nuovi materiali. In particolare, le schiume di alluminio, oltre ad avere un peso ridotto derivante dalla porosità, hanno anche interessanti proprietà meccaniche (rigidità, resistenza meccanica, capacità di assorbire suoni, vibrazioni ed energia).

I punti di forza di questo materiale sono le sue proprietà specifiche, cioè una certa proprietà messa in rapporto con la sua densità. Le prestazioni delle schiume sono inferiori del materiale pieno di cui sono composte, ma messe in relazione al loro peso sono superiori.

Benchè questo materiale abbia interessanti caratteristiche, attualmente è ancora poco utilizzato a causa della scarsa conoscenza che si ha su di esso.

Per capire meglio i fattori che influenzano le loro proprietà meccaniche sono state studiate due schiume commerciali in lega di alluminio.

Il processo produttivo di una schiuma di alluminio è molto complicato perchè è un'insieme di diverse variabili che cambiano il risultato finale. Probabilmente è il principale ostacolo per un maggiore utilizzo di questo materiale a livello industriale.

Per studiare il processo produttivo e cercare di semplificarlo si è provato a riprodurre una delle due schiume studiate, cercando di ottenere un materiale con caratteristiche simili.

Oggetto di questa tesi quindi, è la caratterizzazione e successiva produzione di una schiuma in lega di alluminio.

Nella prima parte verrà descritto l'alluminio e le schiume di alluminio, fondamentale per capire al meglio gli studi fatti.

Nella seconda parte verranno caratterizzate entrambe le schiume e successivamente si cercherà di riprodurre una.

Molto importante come detto in precedenza è il peso di un materiale, quindi è stata calcolata la densità della schiuma attraverso la pesata archimedeica e l'utilizzo di un software di analisi d'immagine.

Quest'ultimo è stato utilizzato anche per lo studio della morfologia delle porosità. La loro dimensione e forma cambia notevolmente la risposta alle sollecitazioni meccaniche, preferendo bolle piccole e tonde, per evitare punti di concentrazione delle tensioni.

Successivamente è stata testata la capacità di assorbire energia tramite una prova d'impatto biassiale eseguita con una torre di caduta.

Le due schiume sono state messe a confronto, per verificare se effettivamente la morfologia delle porosità possa influenzare l'assorbimento di energia.

La parte finale di questo lavoro si è concentrata sulla produzione della schiuma.

Sono state eseguite diverse prove, per capire quali sono le variabili fondamentali che influenzano la schiumatura. Partendo dalla prima prova eseguita, sono stati fatti progressivamente dei cambiamenti per le prove successive, per cercare di migliorare il risultato e per eliminare le variabili che influenzano in minor misura la buona riuscita del processo.



# CAPITOLO 1

## L'alluminio e le schiume di alluminio

### 1.1. L'alluminio

La ricerca di materiali sempre più leggeri, soprattutto per il settore dei trasporti, ha spinto ad un utilizzo più marcato dell'alluminio e le sue leghe.

L'alluminio è un metallo molto presente in natura sotto forma di minerale (bauxite).

La sua bassa densità ( $2.7 \text{ kg/dm}^3$ ) conferisce al materiale un rapporto proprietà/peso superiore alla maggior parte dei materiali metallici.

La sua leggerezza è quindi la principale caratteristica dell'alluminio, altri punti di forza sono:

- resistenza a corrosione, dovuta alla creazione di un sottile strato di ossido nella superficie che protegge il materiale dalla corrosione.

- bassa temperatura di fusione,  $660^\circ\text{C}$  per alluminio puro ma per una lega da fonderia può scendere anche di  $100^\circ\text{C}$ . E' una caratteristica che avvantaggia le applicazioni da fonderia ma limita le applicazioni in temperatura.

- lavorabilità, facile da lavorare sia per deformazione plastica che per asportazione di truciolo.

- resistenza meccanica, influenzata molto dal tipo di lega.

- conduttività elettrica, non paragonabile con quella del rame ma visto il costo di quest'ultimo l'alluminio trova molte applicazioni.

- conduttività termica, discorso analogo della conduttività elettrica. Utilizzato molto negli scambiatori di calore.

### 1.2. Produzione dell'alluminio primario

L'alluminio primario è l'alluminio ricavato direttamente dal minerale.

Dopo la sua estrazione sotto forma di bauxite (minerale contenente *allumina*) viene frantumato.

Successivamente viene sottoposto al processo Bayer per ottenere l'allumina (ossido di alluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) tramite decantazione.

Infine per separare l'alluminio dall'ossigeno si utilizza l'elettrolisi. Questo processo funziona per le soluzioni. L'allumina fonde a  $2200^\circ\text{C}$ , l'alta temperatura renderebbe difficoltoso e antieconomico il processo. Grazie ad un'aggiunta di criolite si forma un eutettico basso fondente a  $900^\circ\text{C}$ , scoperto da Hall ed Heroult che hanno poi dato il nome al processo (Fig.1.1).

Attraverso un anodo e un catodo si applica una differenza di potenziale per separare i due elementi.

Il processo Hall-Heroult richiede una quantità di energia molto elevata ed ha una resa bassa. Da 4 kg di bauxite si ottiene 1 kg di alluminio.

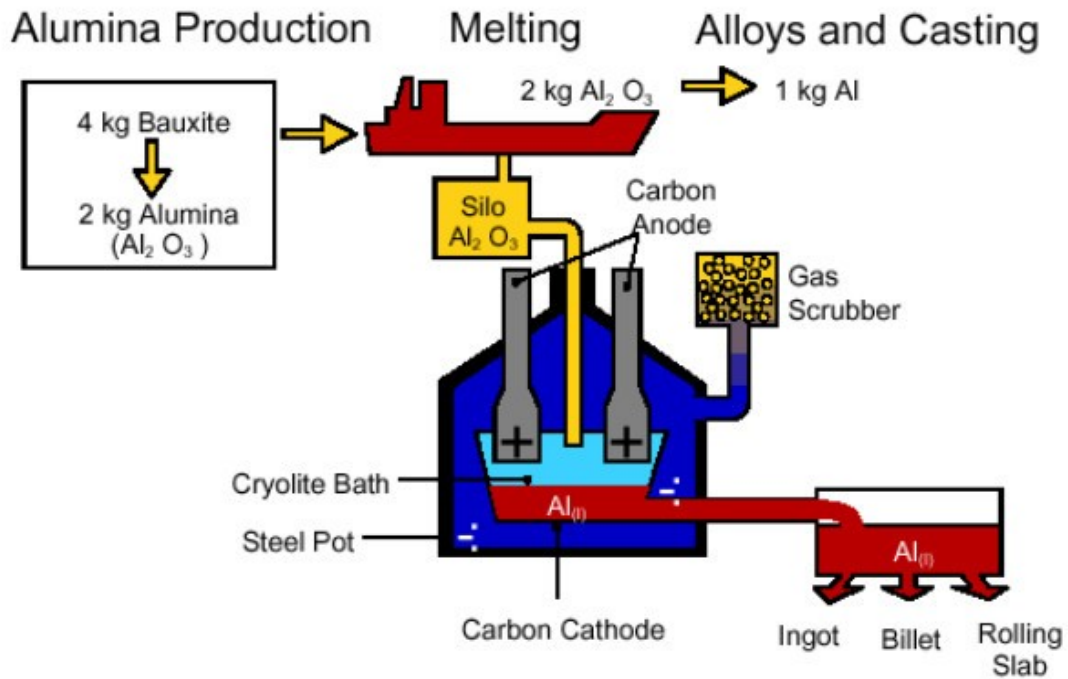


Fig.1.1. Schema del processo Hall-Heroult

### 1.3. Produzione dell'alluminio secondario

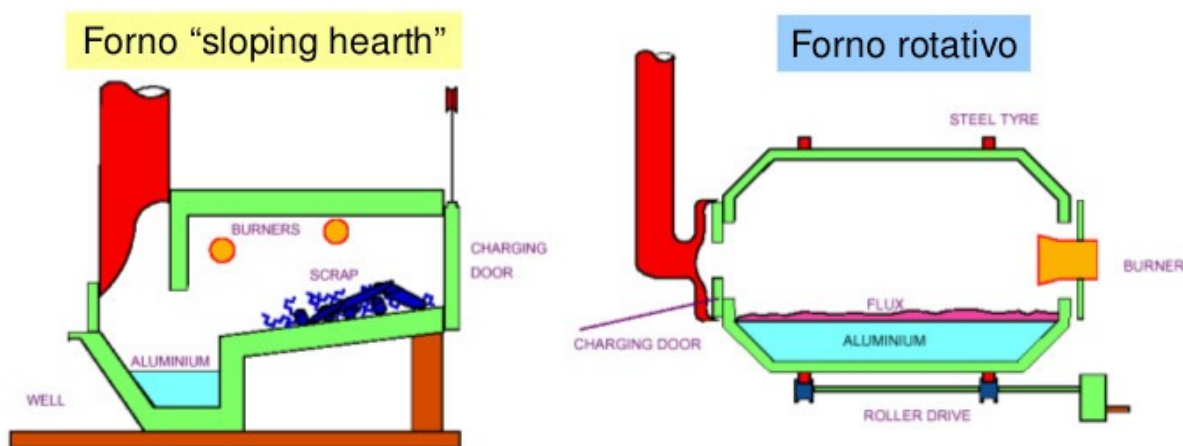
L'alluminio ricavato da rottami e tramite il riciclo viene detto alluminio secondario.

La purezza di questa tipologia di materiale sarà inferiore del primario visto che la composizione chimica del rottame non è nota.

Un metodo per la pulizia dei rottami è il forno rotativo, dove si aggiungono sali per la pulizia del bagno.

Il forno "sloping hearth" invece è un forno con la base inclinata. Il suo principio consiste nel scaldare fino ad una certa temperatura i rottami, tutto quello che fonde sotto quella temperatura sono impurezze.

L'alluminio secondario oltre a riciclare beni inutilizzati, non richiede l'estrazione di metalli da miniere e necessita di una quantità di energia notevolmente minore del primario.



(a) (b)  
Fig.1.2. Schema del forno sloping hearth (a) e forno rotativo (b)

## 1.4. Leghe da fonderia

Le leghe di alluminio vengono divise in due famiglie: le leghe da deformazione plastica e le leghe da fonderia. Verranno trattate solo queste ultime perché sono quelle utilizzate in questo studio.

Le leghe da fonderia si basano sulla colata dell'alluminio fuso all'interno di una forma. Quando il metallo fuso solidifica all'interno della forma si ha la realizzazione del getto che riproduce in negativo il profilo della cavità.

Le leghe da fonderia quindi devono presentare una buona colabilità per facilitare il riempimento della forma e un ritiro volumetrico basso per evitare difetti da ritiro.

La normativa europea per classificare le leghe da fonderia è la EN 1780.

Ogni lega presenta delle lettere e dei numeri che indicano: EN - European Standard, il materiale principale (A -Aluminium), la tipologia della lega (B – Ingot, C – Casting, M – Master alloy) ed un numero di cinque cifre che indica gli elementi in lega (Tabella 1.1). Il primo numero della sigla indica il principale elemento in lega mentre l'ultimo numero è sempre zero. I numeri intermedi indicano gli altri elementi in lega.

| <b>LEGHE DA FONDERIA</b><br><br>EN AB-<br>EN AC-<br>EN AM- | <b>Sigla</b> | <b>Maggiore elemento alligante</b> |
|--|--------------|------------------------------------|
|  | 1xxx0        | Nessuno (minimo 99% Al)            |
|  | 2xxx0        | Cu                                 |
|  | 4xxx0        | Si                                 |
|  | 5xxx0        | Mg                                 |
|  | 7xxx0        | Zn                                 |
|  | 8xxx0        | Sn                                 |
|  | 9xxx0        | Master alloys                      |

Tabella.1.1. Classificazione leghe da fonderia

## 1.5. Applicazioni delle leghe di alluminio

Il principale utilizzo dell'alluminio e delle sue leghe è nei trasporti, dove nel settore aeronautico e automobilistico il loro impiego e la ricerca su di esso sta crescendo negli anni. In particolare vengono utilizzate leghe da fonderia per pistoni (Fig.1.3(b)) e blocchi motore (Fig(1.3(a))), mentre leghe da deformazione plastica per telai.

Altro settore degno di nota è quello degli imballaggi (lattine, contenitori per cibo, domopack) che utilizzano leghe da deformazione plastica (Fig.1.4).

Nel campo dell'elettricità vengono utilizzate leghe da deformazione plastica (rotori).

Queste leghe trovano molto spazio anche per scambiatori di calore (batterie alettate).

Questi ultimi due settori non richiedono particolari proprietà meccaniche ma proprietà termiche ed elettriche. Per questo si utilizza alluminio commercialmente puro senza elementi in lega che ridurrebbero le due proprietà citate.



Fig.1.3. Blocco motore (a) e pistone (b)

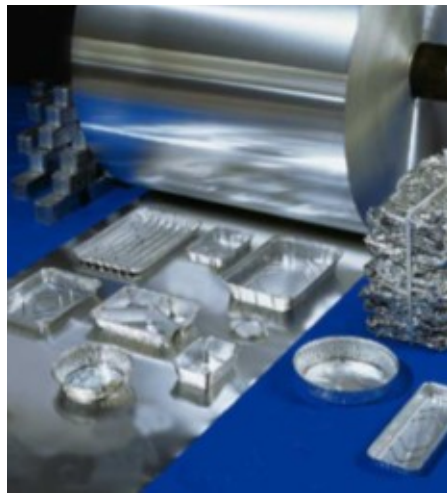


Fig.1.4. Packaging

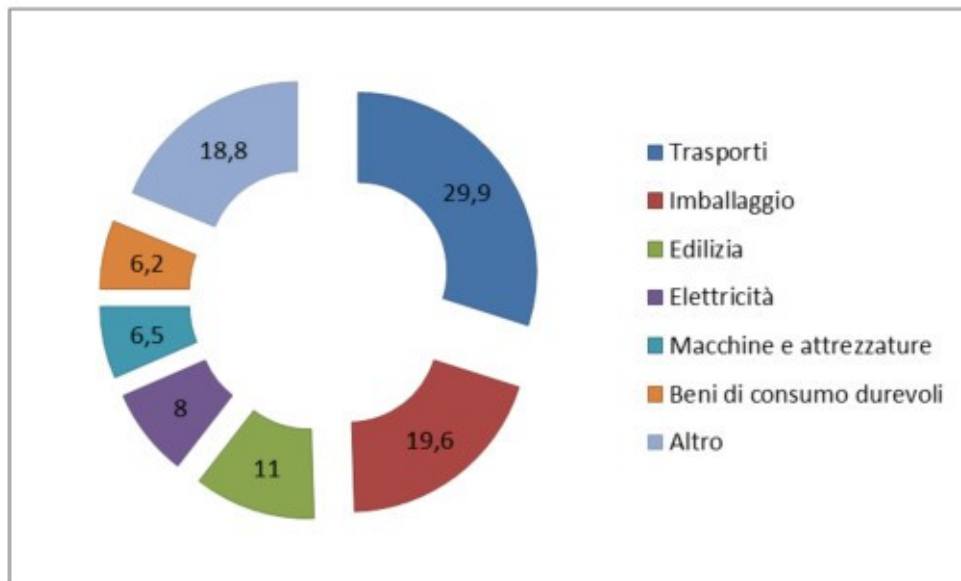


Fig.1.5. Utilizzo dell'alluminio per applicazioni tecniche

## 1.6. Le schiume di alluminio

Una schiuma metallica è una struttura costituita da un metallo solido cui buona parte del volume è costituita da pori d'aria. I pori possono essere chiusi (schiuma a celle chiuse), oppure possono formare una rete interconnessa (schiuma a celle aperte). La caratteristica distintiva delle schiume metalliche è la porosità molto elevata.



Fig.1.6. Schiuma di alluminio a celle chiuse

Le schiume metalliche a celle chiuse sono utilizzate principalmente come materiale impattassorbenti.

Sono leggere (in genere 10-25% della densità del metallo di cui sono composti, che è solitamente alluminio) e rigide, e sono spesso proposte come un materiale leggero strutturale. Tuttavia le schiume non sono ancora state ampiamente utilizzate per questo scopo.

Per produrre una schiuma bisogna in qualche modo imprigionare un gas all'interno del metallo fuso e farlo solidificare prima che il gas fuoriesca.

## 1.7. Agente soffiante e composto stabilizzante

Uno dei metodi per creare del gas all'interno del fuso è quello di utilizzare un agente soffiante.

L'agente soffiante è un composto (di solito diossido di titanio  $TiH_2$ ) che ad una certa temperatura si decompone e rilascia del gas. Il gas rilasciato formerà le bolle nel fuso.

La formazione di una schiuma metallica presenta un complicato scenario dove più processi fisici (nucleazione, crescita, coalescenza e galleggiamento delle bolle, drenaggio e altri movimenti del metallo liquido) sono presenti e strettamente collegati tra loro. Il drenaggio è costituito dal flusso di liquido che per gravità passa attraverso la struttura della schiuma dall'alto verso il basso. Come conseguenza la parte superiore della schiuma tende ad asciugarsi, le pareti delle bolle si assottigliano e si rompono più facilmente facendo uscire il gas.

Per limitare il drenaggio si utilizza un composto stabilizzante (carburo di silicio SiC o allumina  $Al_2O_3$ ) che ostacola il passaggio del liquido.

Si può vedere nella figura 1.7 [2] che la presenza dell'agente stabilizzante ingrossa la parete della bolla (cell wall). La durezza del SiC rende la parete più resistente e quindi più difficile da far

collassare.

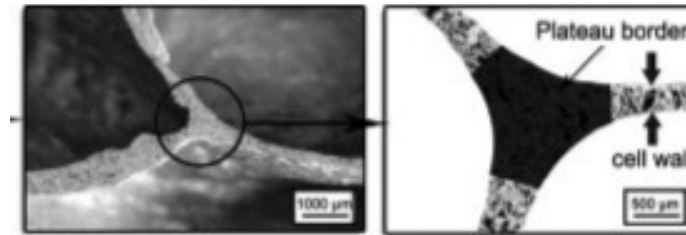


Fig.1.7. Ingrossamento “cell wall” dovuto al SiC [2]

L'agente soffiante e il composto stabilizzante cambiano notevolmente la forma e le dimensioni delle porosità.

Aumentando l'agente soffiante aumenta il gas rilasciato e di conseguenza aumenta anche la dimensione media delle bolle. Bolle troppo grandi possono essere considerate come un difetto perché possono comportare proprietà meccaniche insoddisfacenti.

L'agente stabilizzante influenza lo spessore delle celle ma influenza la forma dei pori.

Al crescere del SiC le porosità tendono ad avere una forma poliedrica. Forme a spigolo portano a concentrazioni di tensione e diventano punti di innesco di cricche.

L'immagine 1.8 [5] mostra che tipo di porosità si formano cambiando il contenuto di agente soffiante e stabilizzante.

Le schiume a sinistra hanno una maggiore percentuale di  $TiH_2$  e quindi delle porosità più grandi.

Muovendosi verso l'alto invece aumenta il SiC fa diminuire la rotondità delle bolle.



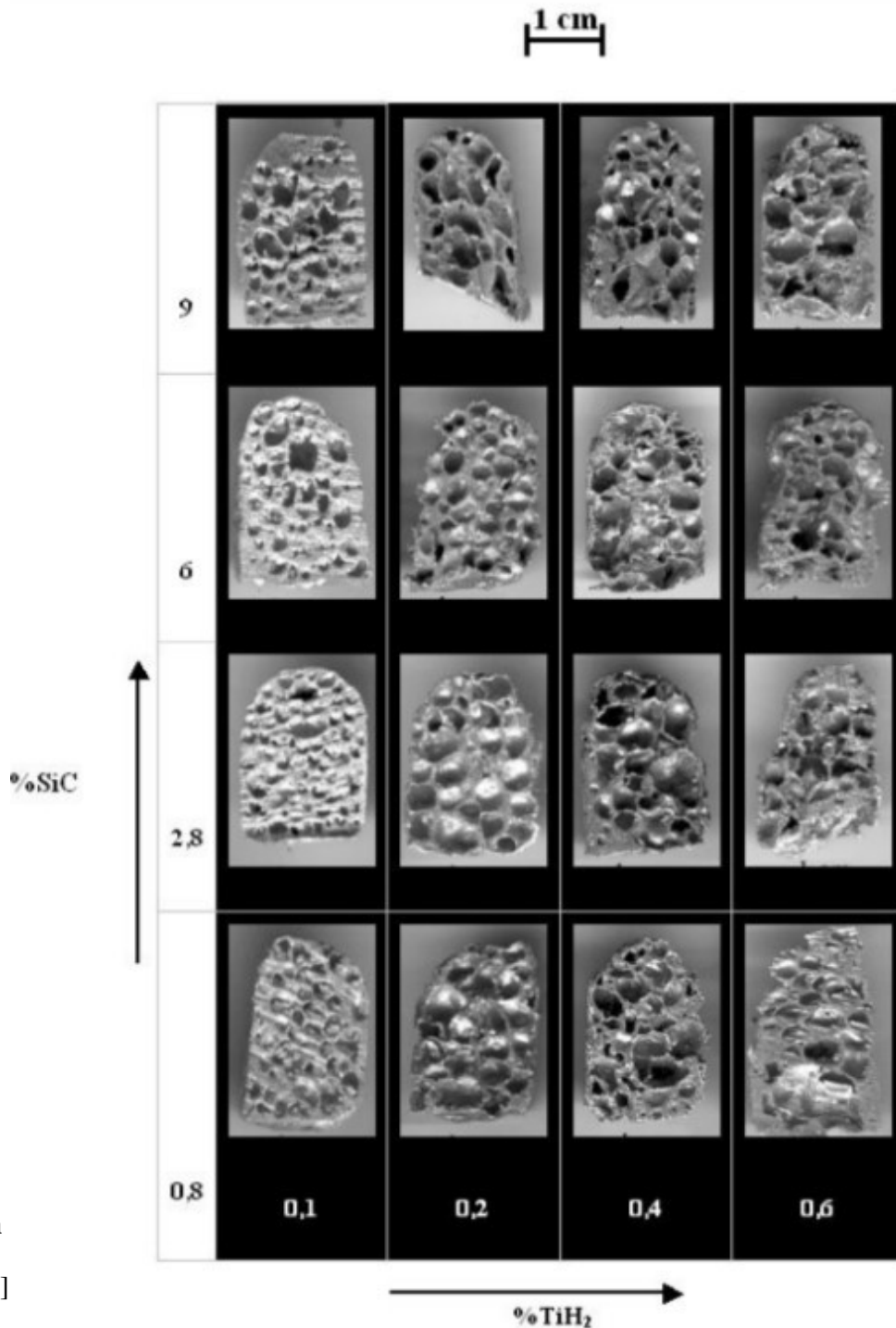


Fig.1.8.  
Morfologia  
delle porosità  
al variare di  
SiC e TiH<sub>2</sub> [5]

## 1.8. Metodi di fabbricazione

Le schiume metalliche possono essere prodotte mediante differenti procedimenti. Fra i possibili metodi di produzione c'è quello a partire da polveri, messo a punto presso l'Istituto Fraunhofer di Brema (Fig.1.9). Consiste nel mescolare in opportune proporzioni le polveri del metallo di cui si intende produrre la schiuma con quelle di un agente soffiante (in figura  $TiH_2$ ) e di un composto stabilizzante (in figura SiC).

Compattando la miscela a freddo tramite pressa si ottiene un precursore. Il precursore viene scaldato ad una temperatura superiore a quella di fusione del metallo, dove il gas prodotto dalla

decomposizione dell'agente soffiante formerà bolle nel fuso.

La fase di compattazione deve garantire la rottura del sottile strato d'ossido che ricopre le particelle di alluminio e una densità del precursore tale da trattenere gas sufficiente per la formazione delle bolle.

Un grande vantaggio di questo metodo è che a circa 400 °C comincia il processo di decomposizione di  $TiH_2$  con conseguente rilascio di idrogeno, che inizia quando la lega è ancora allo stato solido. La perdita di gas in questa fase quindi è minima.

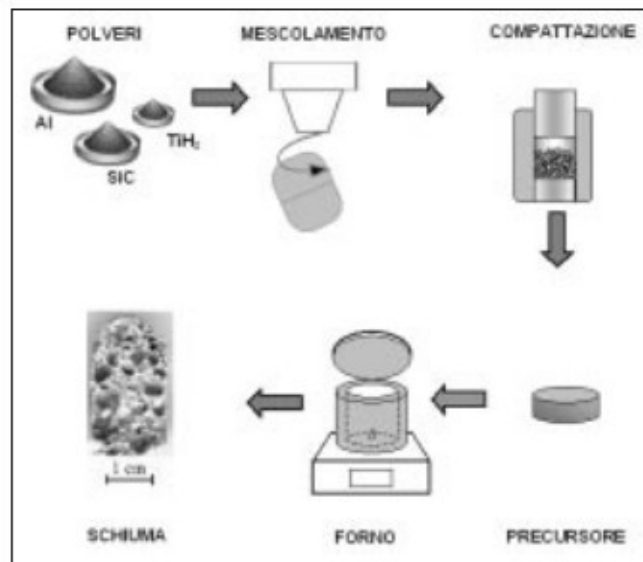


Fig.1.9. Creazione di una schiuma con precursore [5]

Seppur il metodo sopra citato sia quello che porti ai risultati migliori in termini di qualità della schiuma, è un procedimento complicato e costoso.

Degno di nota per creare i precursori in un modo più semplice ed economico è il friction stir processing (Fig.1.10). Esso è un processo allo stato solido che sfrutta il calore dell'attrito creato da un utensile per unire diverse piastre di lega, con in mezzo tra una e l'altra l'agente soffiante e lo stabilizzante.

Esso consente di utilizzare economiche leghe da deformazione plastica al posto delle costose polveri di alluminio.

La figura 1.10 descrive i passaggi fondamentali di questo processo. Nella prima parte (a) si aggiunge l'agente soffiante ed il composto stabilizzante in mezzo ai due piatti. Nelle figure (b) (c) e (d) si esegue la lavorazione per attrito in entrambe le facce dei piatti. Infine si uniscono insieme (f) con un'ulteriore passata dell'utensile.

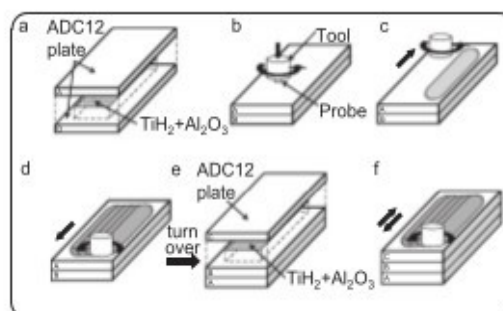


Fig.1.10. Friction stir processing [4]

Tuttavia il metodo più economico per produrre una schiuma metallica è partendo dal metallo fuso. Dopo aver fuso la lega viene aggiunto l'agente stabilizzante. Si mescola il bagno per omogeneizzare.

Infine si aggiunge l'agente soffiante continuando a mescolare. Dopo la schiumatura si raffredda velocemente la schiuma per intrappolare il gas.

Il problema principale di questo metodo è la bassa viscosità del fuso che porta ad un drenaggio rapido.

I pannelli studiati in questo lavoro sono formati utilizzando il processo Alcan (Fig.1.11). Al metallo liquido viene aggiunto il composto stabilizzante, dopodichè un gas viene iniettato nel liquido usando un ugello rotante. La schiuma che si viene formando ha una densità minore del metallo fuso, quindi galleggia sul liquido e viene asportata [7].

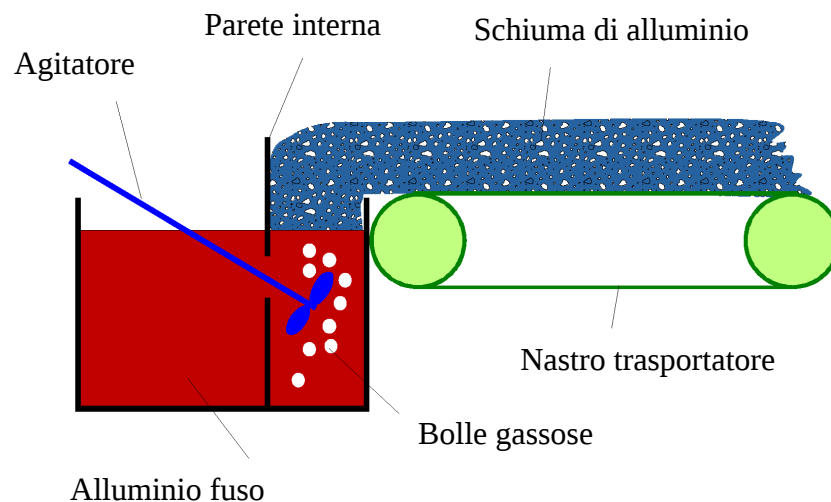


Fig.1.11. Schema del processo Alcan

## 1.9. Influenza della temperatura e del tempo sul processo di schiumatura

La temperatura ed il tempo sono due variabili fondamentali per la creazione della schiuma.

La decomposizione del diuro avviene ad una certa temperatura e non avviene istantaneamente.

Si può incappare nel problema di dover imprigionare il gas e quindi solidificare il metallo, quando c'è ancora dell'agente schiumante che deve reagire.

Aumentando la viscosità del bagno si aumenta il tempo a disposizione per far reagire il diuro.

In pezzi grandi, utilizzando il metodo con il precursore, la situazione è critica. L'agente soffiante presente all'esterno del pezzo va in temperatura prima di quello all'interno. La sua decomposizione inizia prima e per non perdere il gas rilasciato si solidifica la schiuma. Il diuro al centro però non ha ancora raggiunto la temperatura ottimale e non si è decomposto. Il risultato è una schiumatura solo esterna.

La figura 1.12 mostra un precursore di grandi dimensioni. La figura E è una sezione presa nella parte esterna della schiuma, mentre F è una sezione presa nella parte interna della schiuma. La sezione esterna ha ottenuto una buona schiumatura mentre la sezione interna non ha schiumato per

niente.

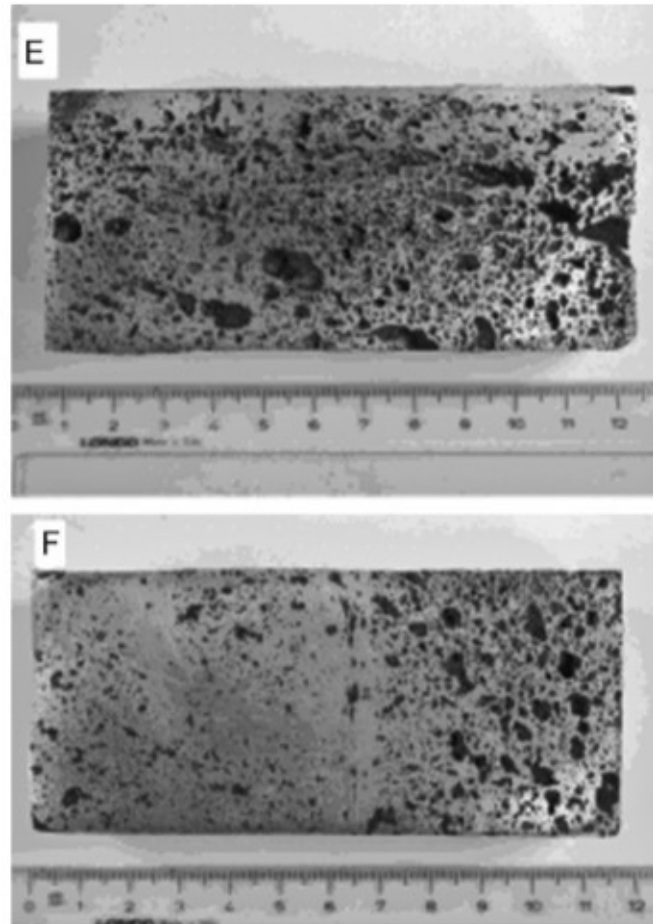


Fig.1.12. Schiumatura in precursori di grandi dimensioni [6]

## 1.10. Influenza della densità sulle caratteristiche meccaniche

La densità di una schiuma dipende direttamente dalla sua percentuale di porosità.

Le porosità indeboliscono il materiale perché riducono la quantità di materiale presente che risponde alle sollecitazioni.

La densità quindi influenza notevolmente la risposta del materiale agli sforzi meccanici.

All'aumentare della densità, la schiuma, avrà caratteristiche migliori e sempre più simili al materiale di cui è formata.

In figura 1.13 si riporta un esempio di prova di flessione a tre punti eseguita su schiume con diversa densità [2]. La schiuma con densità più alta ( $0,7 \text{ kg/dm}^3$ ) resiste ad una sforzo di flessione maggiore. La figura 1.10 (b) mostra una relazione lineare tra la densità e lo stress.

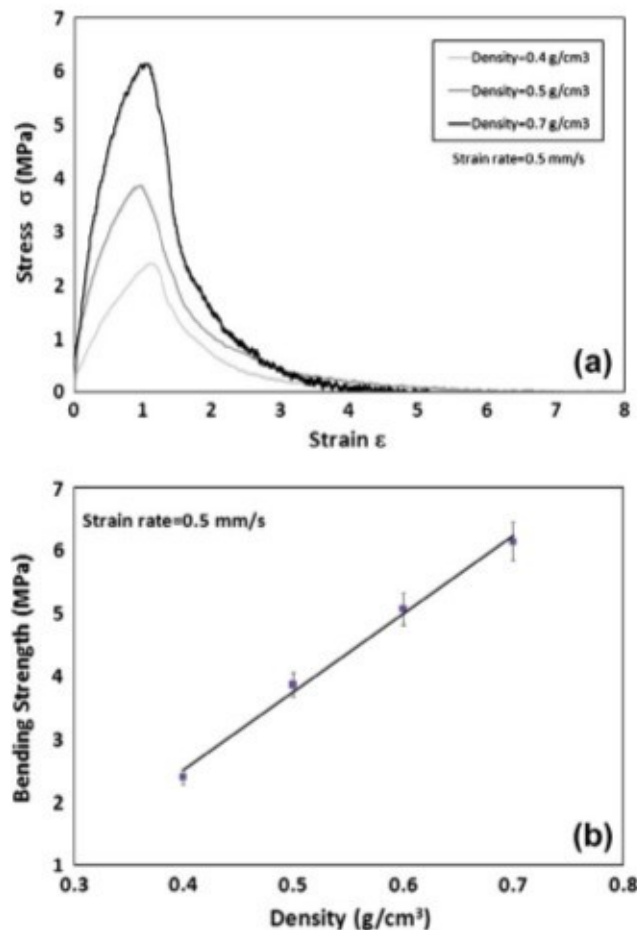


Fig.1.13. Flessione a 3 punti di schiume con diversa densità [2]

Un discorso analogo va fatto per la prova di compressione.

Le schiume più dense sono in grado di resistere a carichi maggiori e assorbono una maggior quantità di energia [2].

E' interessante soffermarsi nel comportamento che hanno le schiume sotto compressione. Esse presentano tre zone che hanno caratteristiche diverse.

La prima zona è elastoplastica con un rapido aumento dello stress e una deformazione parzialmente reversibile. La seconda è un plateau dove le porosità collassano e viene assorbita la maggior parte dell'energia totale. L'ultima zona consiste in un rapido aumento della tensione dove la schiuma presenta un comportamento simile al materiale di cui è formata, come se fosse piena visto che le celle sono collassate.

L'estensione del plateau nella seconda fase aumenta al diminuire della densità. E' un risultato molto significativo soprattutto per applicazioni di assorbimento di energia.

Nella figura 1.14 (a) si vede l'andamento delle curve stress-strain di schiume con densità di 0,7-0,5-0,4  $kg/dm^3$ . La schiuma più densa ha una curva più alta ma un plateau meno esteso. La figura 1.14 (b) mostra una relazione lineare tra stress e densità.

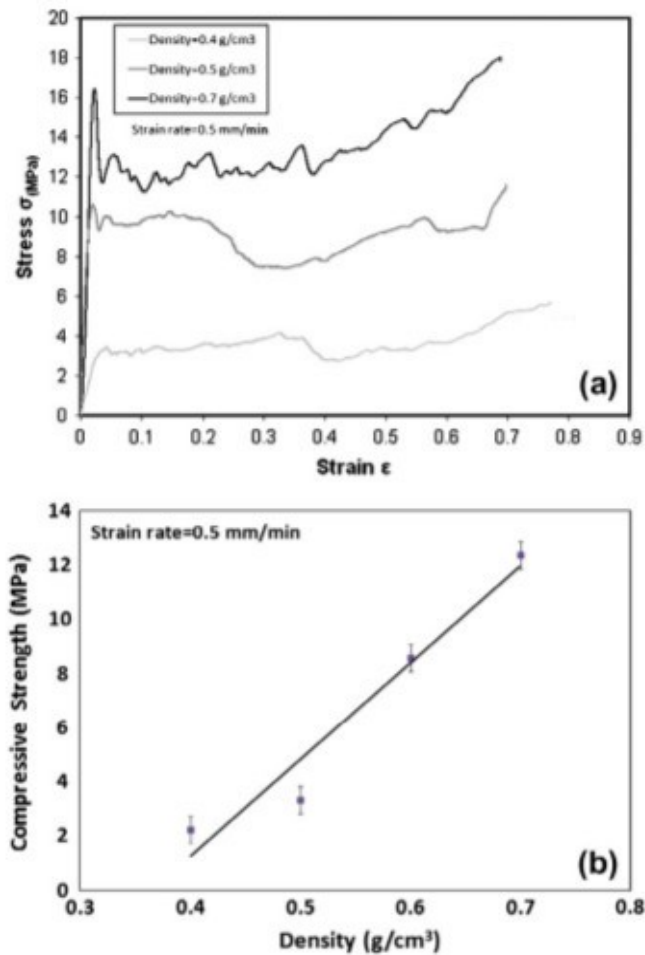


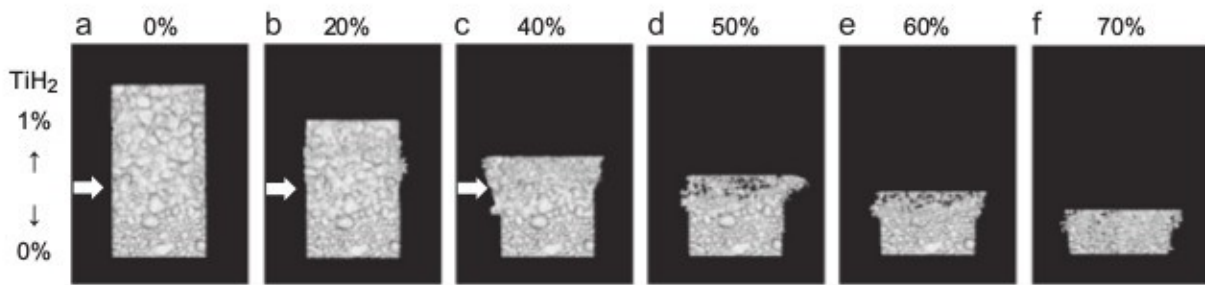
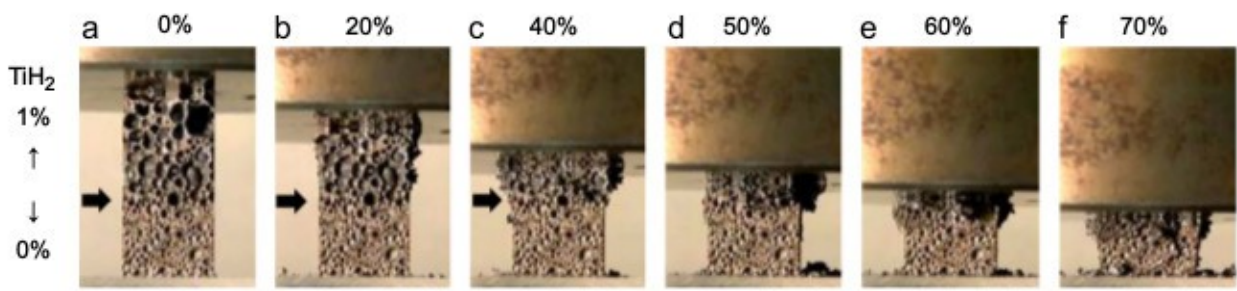
Fig.1.14. Prova di compressione di schiume con diversa densità [2]

Nell'immagine 1.15 si può vedere il comportamento di una schiuma a densità variabile [4].

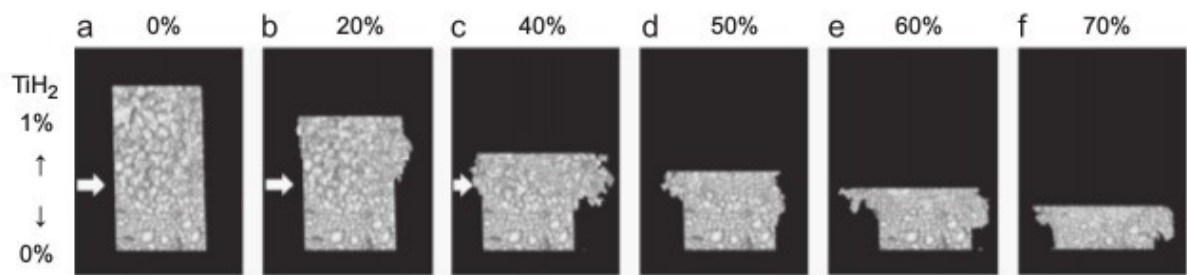
Si tratta di una schiuma creata utilizzando una percentuale di agente soffiante pari all'1% nella parte alta e 0% nella parte bassa.

La deformazione parte dalla regione meno densa e si sposta successivamente nella regione più densa quando le porosità sono collassate.

Le immagini in figura 1.15 (a) e (b) sono state ricavate utilizzando i raggi X. La figura (a) rappresenta la faccia del pezzo perpendicolare alla faccia in figura (b).



(a)



(b)

Fig.1.15. Prova di compressione di una schiuma con densità variabile [4]





# CAPITOLO 2

## Procedura sperimentale

### 2.1. Introduzione

Le schiume commerciali che sono state studiate si presentano sotto forma di pannelli e sono di due tipi: una di spessore 12 mm e l'altra 25 mm. Entrambi hanno larghezza di 150 mm e lunghezza variabile.

Entrambe sono state fornite da un'azienda che produce interni per l'arredamento.

Questi pannelli sono stati ottenuti tramite processo Alcan (Fig.1.11).

### 2.2. Prelievo dei saggi

La schiuma di spessore 12 mm è stata denominata G, mentre la schiuma di spessore 25 mm è stata denominata D.

Sono stati ricavati saggi per la misura della densità, per l'analisi di immagine e per la prova di impatto.

Le due schiume si presentavano sotto forma di pannelli di larghezza di 150 mm. I saggi sono stati prelevati tagliando trasversalmente il pannello.

Per la misura della densità da ogni pannello di schiuma sono stati ricavati 5 provini. Per la schiuma D ad esempio, il primo provino avrà nome D1, il secondo D2 e così via.

D1,D3,D5 sono di lunghezza 20 mm mentre D2 e D4 sono di lunghezza di 30 mm (Fig.2.1 (a) e Fig.2.2 (a)).

Sono stati tagliati con lunghezze differenti perchè i provini 1,3 e 5 oltre che a venire usati per il calcolo della densità verranno usati anche per l'analisi d'immagine. Da una estremità di questi provini è stato ricavato un saggio più piccolo di 20x20 mm (Fig.2.1(b) e Fig.2.2(b)).

Su di essi è stata disegnata una freccia per ricordarsi la direzione di laminazione per sapere quali sono le superfici longitudinali e quali le trasversali.

Le dimensioni dei saggi per la schiuma G sono le medesime di quelle per la schiuma D (a parte lo spessore che è diverso per le due schiume).

Per le prove d'impatto i provini sono 120x120 mm, ne sono stati ricavati 10 per la schiuma D e 9 per la G.

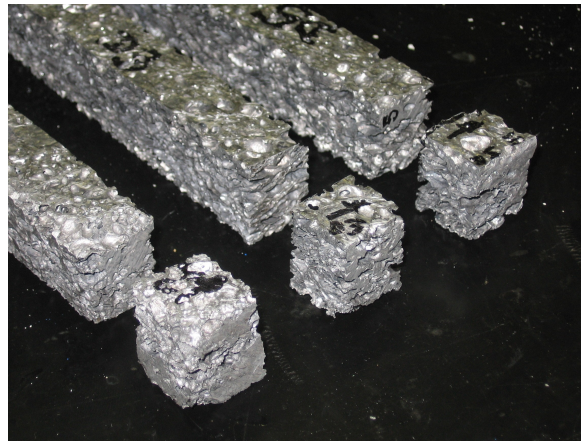
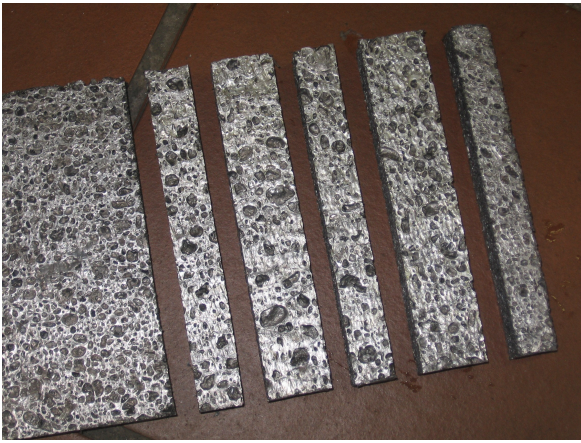


Fig.2.1. Taglio provini della schiuma D per misura densità (a) e per analisi di immagine (b)



Fig.2.2. Taglio provini della schiuma G per misura densità (a) e per analisi di immagine (b)

## 2.3. Misura della densità

Per il calcolo della densità sono stati utilizzati due metodi.

### 2.3.1. Pesata Archimedeana

Il primo metodo è quello della pesata archimedeana.

Per questo metodo sono stati utilizzati tutti i provini ricavati per la misura della densità (D1,D2,D3,D4,D5,G1,G2,G3,G4,G5).

La pesata Archimedeana si basa sul principio di Archimede: *Un corpo immerso in un fluido riceve una spinta verso l'alto uguale al peso del volume di fluido spostato.*

Il metodo consiste nel pesare in aria e poi in acqua il provino.

Per pesarlo in aria si utilizza normalmente una bilancia. Sono state eseguite 5 pesate per ogni provino e poi mediate (Fig.2.3(a)).

Per la pesata in acqua invece è necessario porre un recipiente pieno d'acqua sopra la bilancia e tararla. Successivamente si pesa il provino quando è completamente immerso e non sta toccando il fondo (Fig.2.3(b)).

Nel caso studiato entrambe le schiume galleggiavano quindi si è adottato un sistema con del filo di ferro collegato a dei supporti esterni al recipiente, per vincolare il provino. Dopo la pesata si pesa anche la parte di filo immersa e la si toglie dal dato ricavato precedentemente.

A differenza della pesata in aria si è fatta una sola misura per provino perchè le seguenti sarebbero falsate dalla presenza di acqua nelle cavità.

L'ultimo passo è usare la seguente relazione per trovare la densità:

$$\rho : \rho_{H_2O} = m_{aria} : m_{H_2O} \quad (2.1)$$

$$\rho = \frac{m_{aria}}{m_{H_2O}} * \rho_{H_2O} \quad (2.2)$$

$$\rho_{H_2O} = 1 \text{ Kg/dm}^3 \quad (2.3)$$

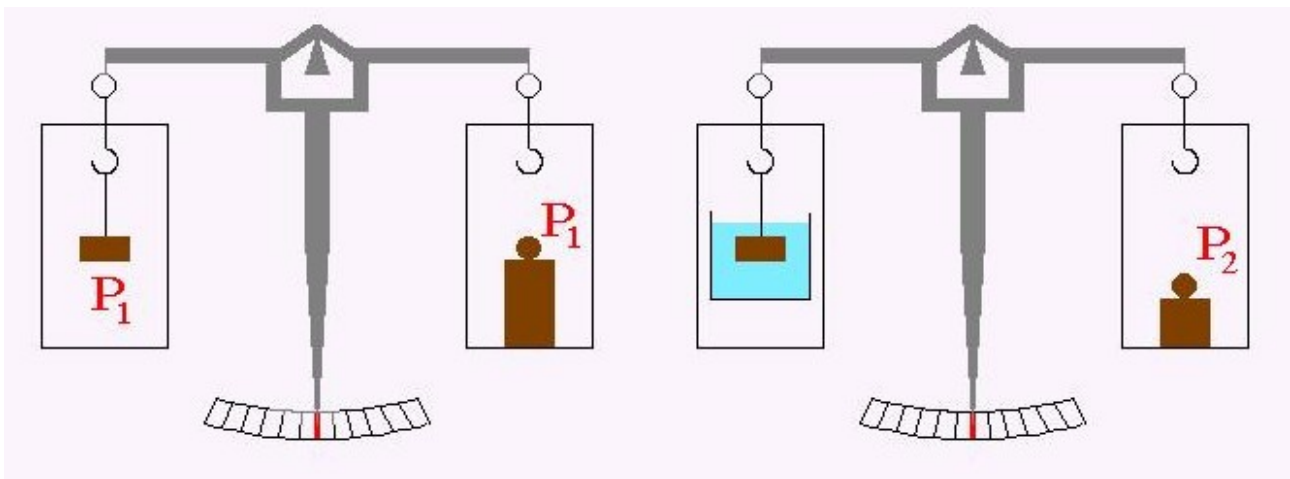


Fig.2.3. Pesata in aria (a) e pesata in acqua (b)

### 2.3.2. Analisi di immagine

Questo metodo consiste nel conteggiare la percentuale di area piena di una superficie del provino tramite software di analisi d'immagine.

Come precedentemente detto si utilizzano i provini 1,3 e 5 di dimensioni 20x20 mm.

E' stata fatta questa scelta per avere dei campioni distanti tra loro per sondare la morfologia del materiale in diverse zone.

Per prima cosa sono stati lucidati i provini, tramite lappatura, fino ad una carta 1200, per avere una superficie liscia e sullo stesso piano.

Sono state lucidate una superficie trasversale e una longitudinale per ogni provino.

Il software riconosce i colori, quindi per distinguere le parti piene è stato applicato tramite rullo, un sottile strato di vernice rossa sulle due superfici lucidate.

Tramite stereoscopio sono state acquisite le immagini con uno zoom di 3x.

A causa della grandezza delle superfici longitudinali e trasversali dei provini D, è stato necessario acquisire la superficie in due immagini.

Per il provino D è stato necessario acquisire due immagini visto che in una sola non si riusciva a catturare tutta la superficie.

L'immagine è stata binarizzata così che il software possa conteggiare l'area di colore riconosciuta.

Prima di procedere con l'esportazione dei dati però, è necessario correggere l'immagine, visto che il colore non è presente solo sulla superficie ma anche in alcune cavità ed il software le riconosce come aree piene. Queste zone vengono tolte dal conteggio.

Il software crea un documento con tutti i risultati dell'analisi. Il dato di principale interesse è la

percentuale di area conteggiata che viene moltiplicata per la densità dell'alluminio (posta a 2,7 Kg/dm<sup>3</sup>) per avere la densità della schiuma.

## 2.4. Analisi delle porosità

La forma e la dimensione delle cavità cambiano notevolmente la risposta del materiale alle sollecitazioni.

Come già accennato nel paragrafo 1.7, bolle di notevoli dimensioni possono essere considerate come un difetto.

A parità di area occupata in una sezione, bolle grandi collassano ad una sollecitazione minore rispetto a bolle piccole.

Per questo sono stati calcolati il diametro equivalente, che dà un'idea della grandezza della bolla, il numero di pori su mm<sup>2</sup> che invece descrive la loro distribuzione.

Dal momento che per applicazioni meccaniche è bene che le bolle abbiano forma sferica poiché eventuali intagli agiscono come punti di concentrazione delle tensioni, si è calcolato il parametro di circolarità C.

Infine il rapporto d'aspetto è stato utilizzato per capire se la figura è regolare e quindi risponde allo stesso modo indipendentemente dalla direzione di sollecitazione.

Per ogni immagine sono stati analizzati 8 pori. Dopo aver binarizzato la porosità, il software (lo stesso utilizzato per il calcolo della densità) crea un foglio di calcolo con i dati di alcune caratteristiche della bolla con la quale si possono calcolare i parametri descritti.

Diametro equivalente: è il diametro del cerchio di area equivalente  $D_{eq} = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$  (2.4)

Parametro di circolarità: indica se la figura ha forma circolare  $C = \frac{4\pi A}{p^2}$  (2.5)

Rapporto d'aspetto: indica se la figura è allungata  $RA = \frac{\text{larghezza}}{\text{altezza}}$  (2.6)

Numero bolle su mm<sup>2</sup>  $\frac{\text{pori}}{\text{mm}^2} = \frac{n^\circ \text{pori}}{A}$  (2.7)

Dove A è l'area e p il perimetro della porosità considerata.

## 2.5. Analisi chimica

Si è provato ad eseguire un'analisi chimica tramite spettrometro di massa ma con scarsi risultati.

Infatti l'eccessivo strato di ossido formatosi sulla superficie della schiuma ha impedito la corretta misura.

Si è provato anche a fondere un campione per poi farlo solidificare ed analizzare. Scaldandolo fino a 900° C non si è fuso completamente a causa dell'ossido eccessivo.

## 2.6. Prova di impatto

E' stata eseguita una prova d'impatto biassiale a temperatura ambiente usando una torre di caduta.

Per eseguire la prova si è seguita la norma ASTM D5628 che dà un intervallo di caduta accettabile da 0,3 a 1,4 m.

Nella prova un impattatore semisferico di diametro 20 mm, con delle masse fissate insieme, viene portato all'apposita altezza e successivamente sganciato dal supporto, in modo da farlo cadere ed urtare con il provino sottostante.

Nel nostro caso la massa è di 20 Kg più il peso del carrello di 5 Kg.

Il provino di dimensioni 120x120 mm è bloccato con un sistema di fissaggio pneumatico (figura 2.4) e colpito nel centro.

Il programma che acquisisce i dati utilizza il teorema dell'impulso e quindi necessita del valore della velocità al momento di inizio dell'urto. Per questo, all'altezza dove l'impattatore tocca il provino, viene posto un sensore che rileva la velocità.

Si può controllare se il sensore è posto adeguatamente confrontando il valore teorico di velocità dato dalla formula  $v = \sqrt{2gH}$  con il valore rilevato.

Collegata alla semisfera c'è una cella di carico da 40 kN per rilevare la forza dell'impatto.

Per entrambe le schiume è stata fornita un'energia di 221 J facendo cadere una massa di 25 kg da 900 mm.

Il valore teorico di velocità iniziale è 4,2 m/s.

La frequenza di campionamento è stata posta a 800 Hz per il provino D e 1000 Hz per il provino G.

I dati vengono raccolti da un sistema di acquisizione dati e poi mandati al computer per l'elaborazione tramite software..

Il software consente di elaborare i dati a fine prova e successivamente esportarli in un più comodo foglio di calcolo.

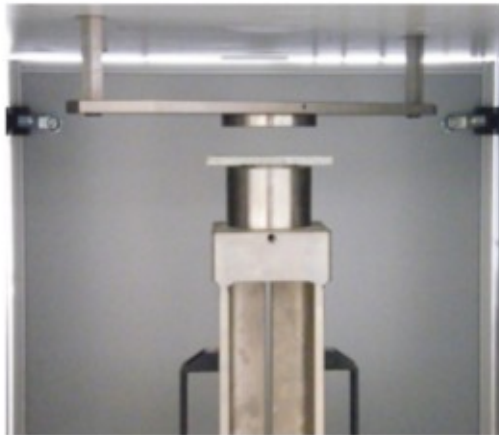


Fig.2.4. Sistema di fissaggio pneumatico

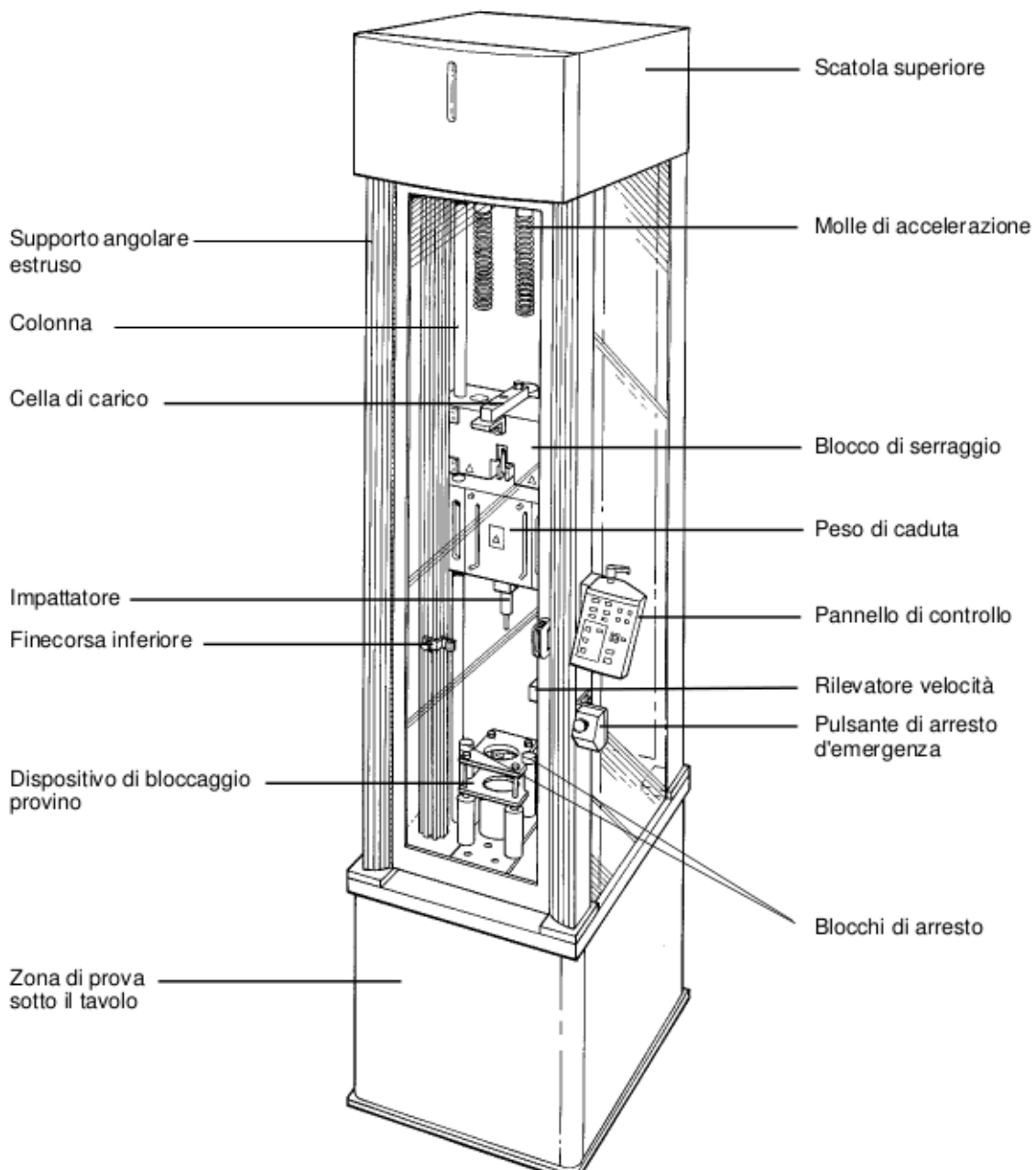


Fig.2.5. Schema della torre di caduta

## 2.7. Compattazione agente schiumante

Come spiegato nel paragrafo 1.7, per creare il gas all'interno del fuso si utilizza un agente schiumante. Lo schiumante utilizzato per la creazione delle schiume è il diuro di titanio  $TiH_2$ . Questo composto si trova sotto forma di polvere. Le polveri galleggerebbero sul fuso, creando quindi il gas all'esterno della lega. L'agente soffiante è stato quindi compattato in pastiglie.

Lo stampo utilizzato per contenere le polveri da compattare è composta da due semistampi collegati tra loro da quattro viti (Fig.2.6). Lo stampo ha una forma cilindrica che riprodurrà la forma della pastiglia. Un pistone di diametro simile al foro dello stampo, avrà la funzione di chiudere lo stampo. A stampo chiuso (Fig.2.7) il carico per compattare le polveri, sarà applicato tramite pressa (Fig.2.8) al pistone. Dopo ogni carico di 8 tonnellate, il sistema con stampo chiuso verrà messo in forno ad



una temperatura di 250° per 15 minuti. Ogni pastiglia verrà sottoposta a 3 carichi e a due permanenze in forno.

Per estrarre la pastiglia è necessario svitare le quattro viti e aprire lo stampo in due. A causa delle difficoltà di estrazione della pastiglia dallo stampo, si posiziona una moneta da 10 centesimi sul fondo, così da non far attaccare la polvere alla base dello stampo.

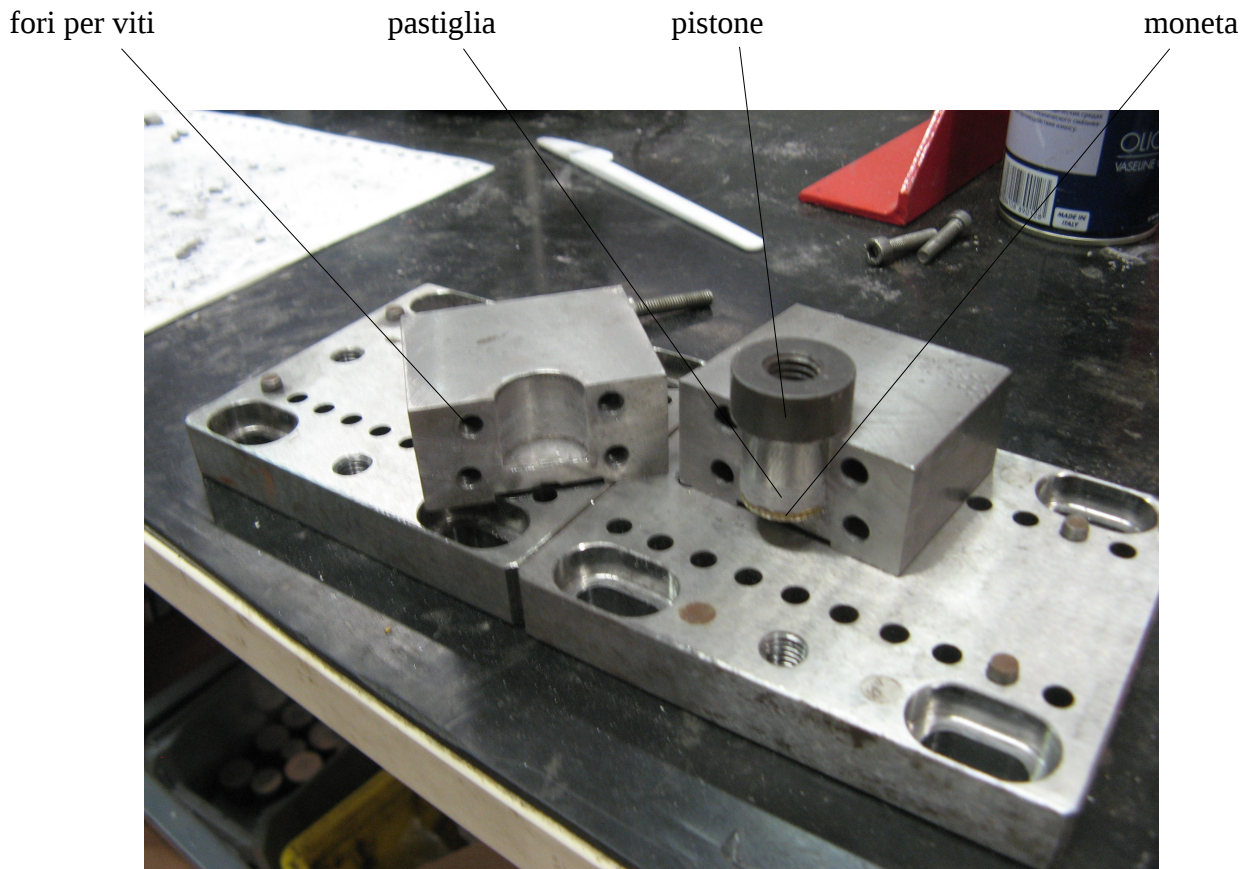


Fig.2.6. Sistema con stampo aperto con all'interno pistone, pastiglia e la moneta

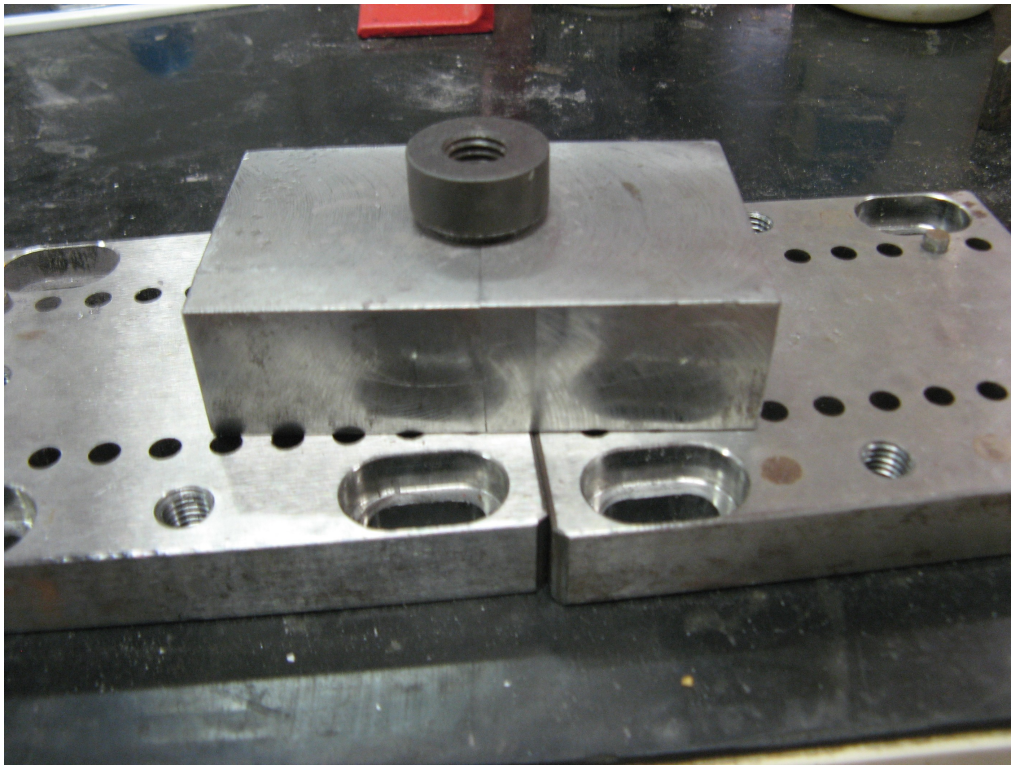


Fig.2.7. Sistema con stampo chiuso e pistone

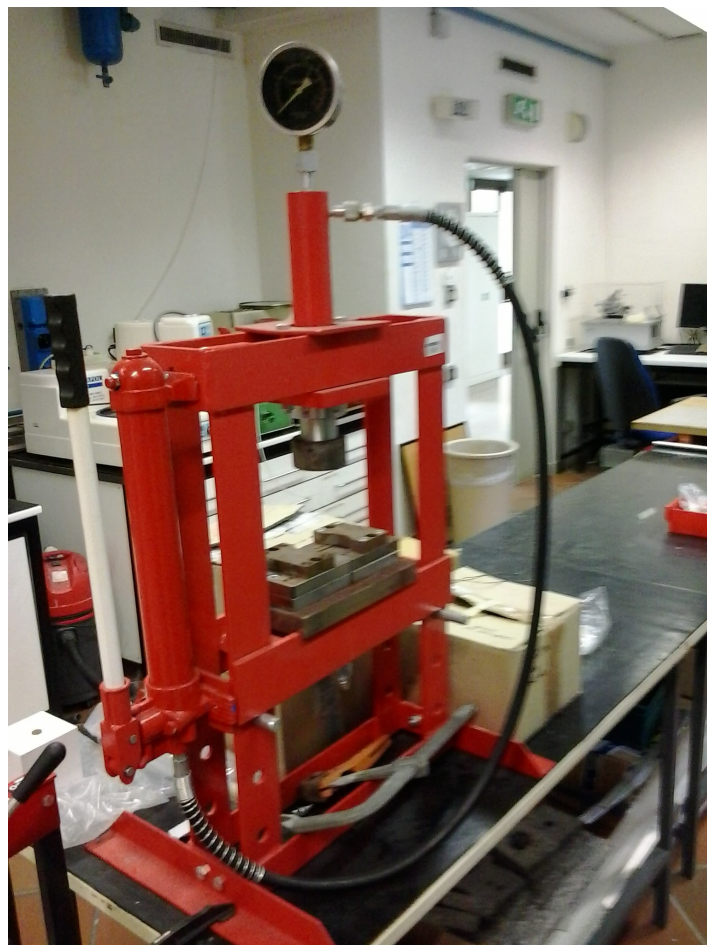


Fig.2.8. Pressa



## 2.8. Realizzazione della schiuma

Per la creazione della schiuma sono state fatte diverse prove.

Tutte quante iniziano con il taglio della lega. Non ci sono delle dimensioni particolari per il taglio.

E' stata utilizzata una lega EN AB 46100 (Al Si 11 Cu 2 (Fe)) per tutte le prove a parte le ultime due dove è stata utilizzata una EN AB 46000 (Al Si 9 Cu 3 (Fe)).

E' stata utilizzata una procedura *trial and error*, che consiste nel cambiare opportuni parametri per migliorare il risultato precedente.

Nel corso delle prove è stata variata la percentuale di agente soffiante, passando dal 2% al 20%. E' stata variata anche la temperatura del forno passando da 750° a 575°. Infine è stata cambiata la modalità di aggiunta del  $TiH_2$ . Si è provato con diuro sotto forma di pastiglie, polveri, pastiglie avvolte in un foglio di domopack e polveri avvolte in un foglio di domopack.

La procedura per creare la schiuma parte dalla fusione della lega all'interno di un crogiolo messo in forno. Alla lega viene tolta la scoria che si forma in superficie. Il fuso viene mescolato, viene misurata la temperatura con una termocoppia, viene aggiunto il diuro, con un successivo mescolamento. Il raffreddamento viene eseguito con dell'aria compressa. La schiuma viene poi sezionata con una troncatrice per vedere i risultati.

Le ultime due prove sono state eseguite allo stato semisolido per avere una viscosità più alta. La temperatura di queste ultime due prove è stata scelta per avere il 25% di solido.

Grazie ad un software di analisi termodinamica (JMatPro), sono state ottenute le curve temperatura-percentuale di solido delle due leghe in condizioni di equilibrio termodinamico (figure 2.9 e 2.10).

Queste due curve sono servite per stimare la temperatura del forno per avere il 25% di fase solida.

### Phases details

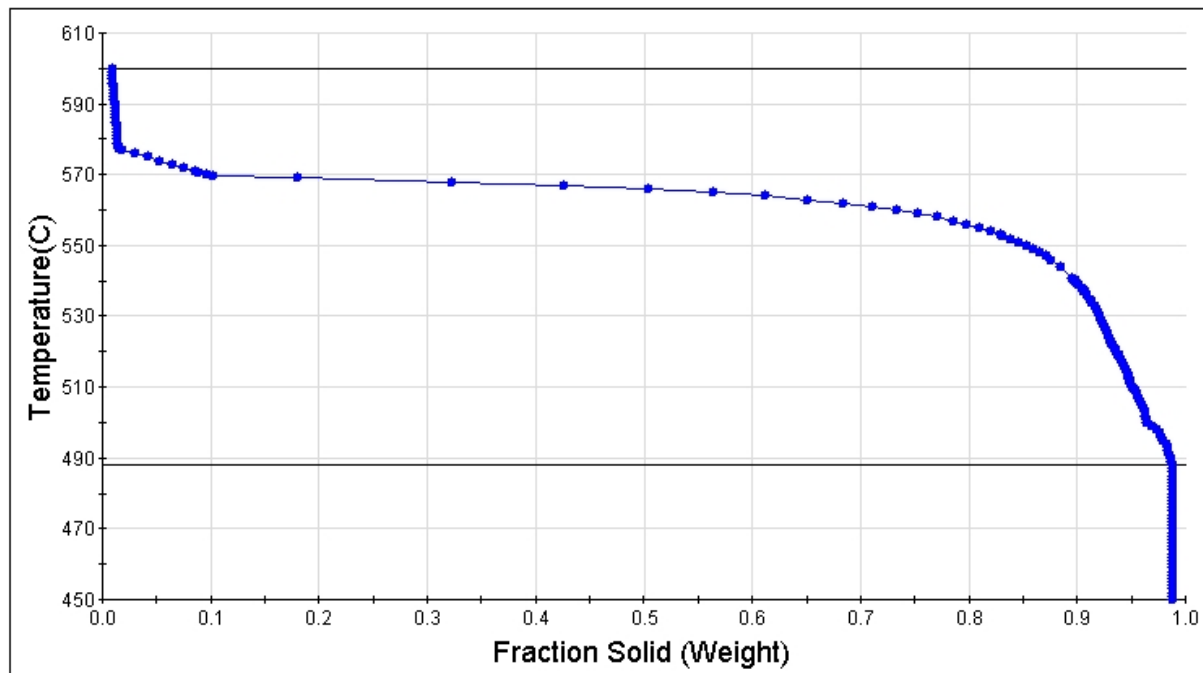


Fig.2.9. Grafico temperatura-percentuale di solido della lega EN AB 46100

## Phases details

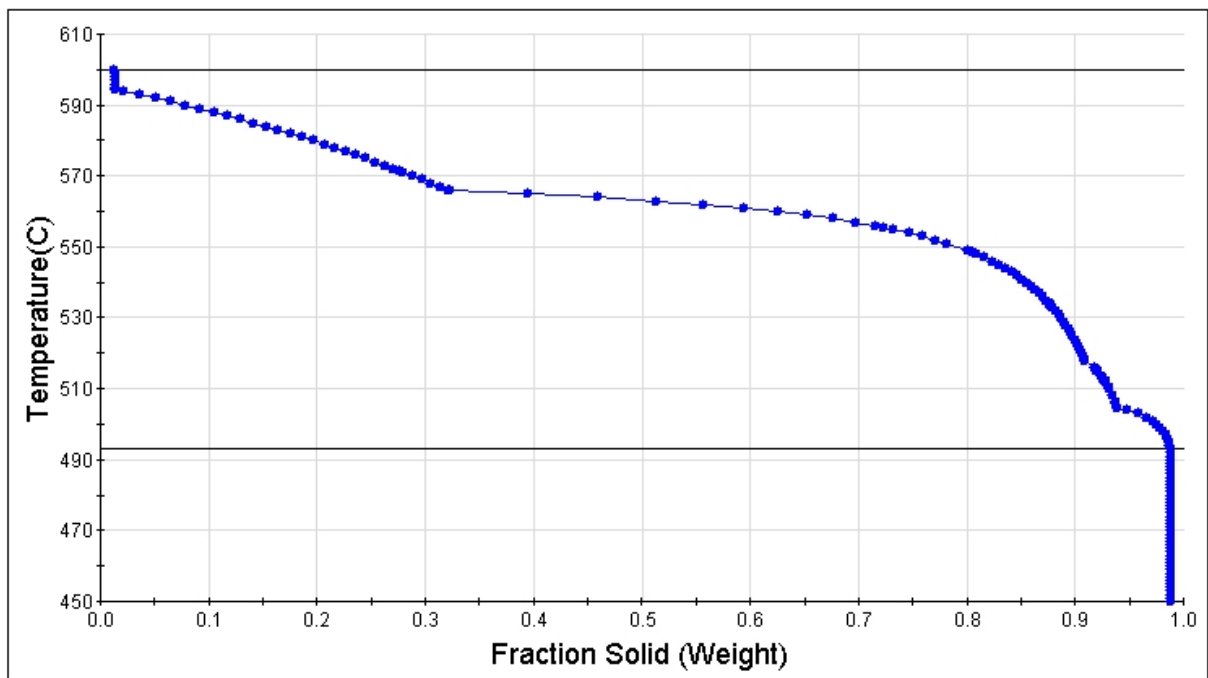


Fig.2.10. Grafico temperatura-percentuale di solido della lega EN AB 46000

# CAPITOLO 3

## Risultati ottenuti

### 3.1. Densità

I dati del calcolo della densità tramite pesata archimedeica vengono riportati nei grafici in figura 3.1 e 3.2. L'asse x presenta i nomi dei provini. Come spiegato nel paragrafo 2.2, la prima lettera indica la schiuma a cui appartiene il provino e la cifra successiva indica il numero del provino.

L'asse y presenta la densità in  $kg/dm^3$  calcolata con le formule (2.1) (2.2) (2.3) dopo pesata Archimedeica.

La linea rossa indica il valore medio.

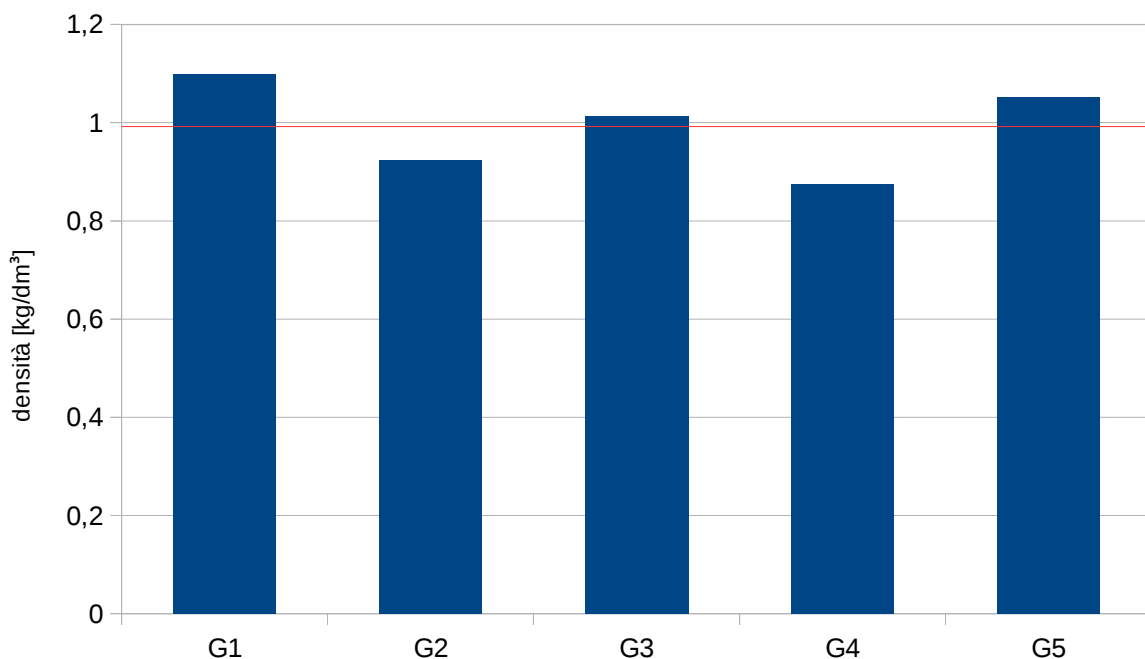


Fig.3.1. Grafico con la densità misurata tramite pesata Archimedeica dei provini della schiuma G

Il grafico di figura 3.1 presenta una densità non costante con andamento variabile. Si passa da un valore massimo di  $1,1 \text{ kg/dm}^3$  fino ad un valore minimo di  $0,9 \text{ kg/dm}^3$ .

La densità media del provino G è  $1,0 \text{ kg/dm}^3$ , mentre la deviazione standard è  $0,09 \text{ kg/dm}^3$ .

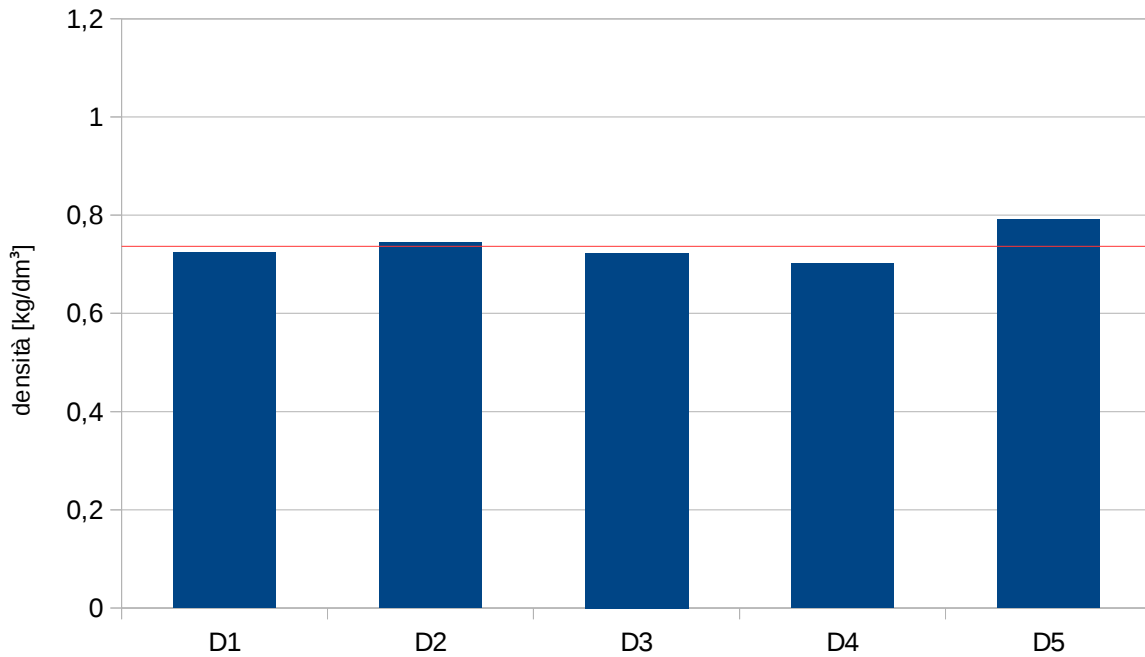


Fig.3.2. Grafico con la densità misurata tramite pesata Archimedeica dei provini della schiuma D

Il grafico di figura 3.2 presenta una densità non costante con andamento variabile. Si passa da un valore massimo di  $0,8 \text{ kg/dm}^3$  fino ad un valore minimo di  $0,7 \text{ kg/dm}^3$ .

La densità media del provino D è  $0,7 \text{ kg/dm}^3$ , mentre la deviazione standard è  $0,03 \text{ kg/dm}^3$ .

Tutti i provini della schiuma G presentano una densità maggiore dei provini della schiuma D. Anche il valore medio risulta quindi maggiore. La schiuma D inoltre presenta dei risultati meno variabili, descritti dalla deviazione standard più bassa.

Le immagini da 3.3 a 3.10 presentano le sezioni acquisite e la loro binarizzazione. La nomenclatura dei provini è quella spiegata nel paragrafo 2.2, la prima lettera indica la schiuma a cui appartiene il provino e la cifra successiva indica il numero del provino. Per questa analisi sono stati utilizzati i provini di dimensione 20x20 mm.

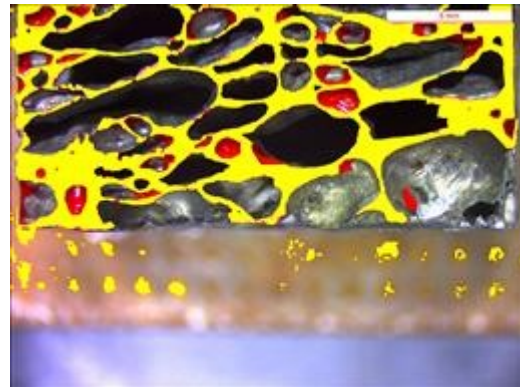
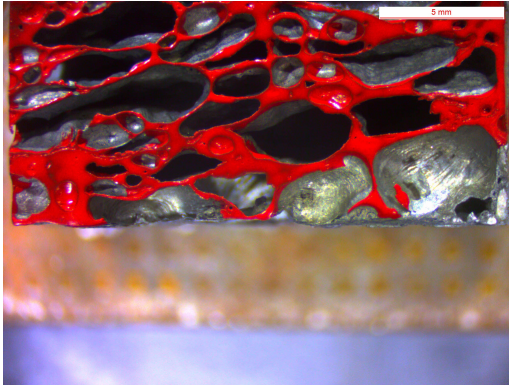
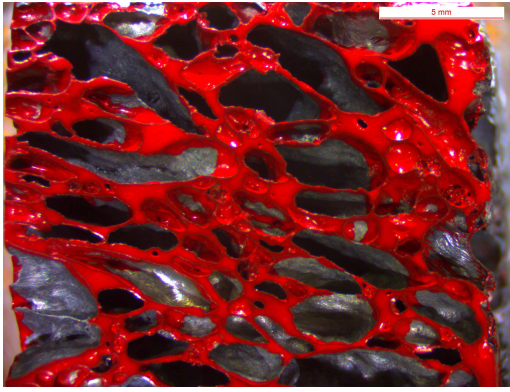


Fig.3.3. Sezione longitudinale del provino D1

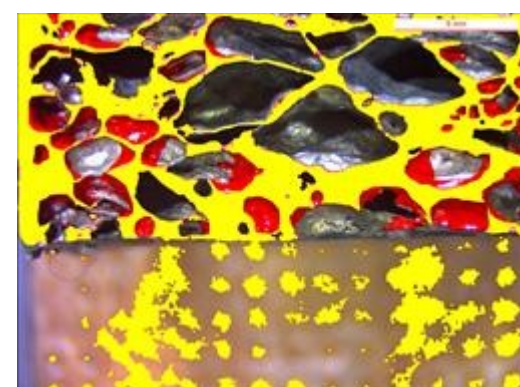
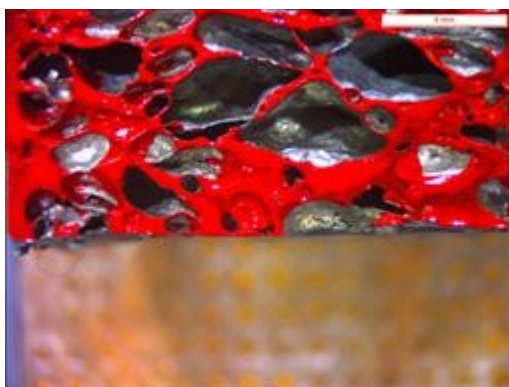
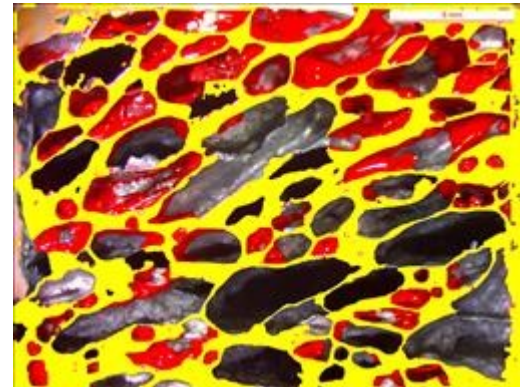


Fig.3.4. Sezione trasversale del provino D1



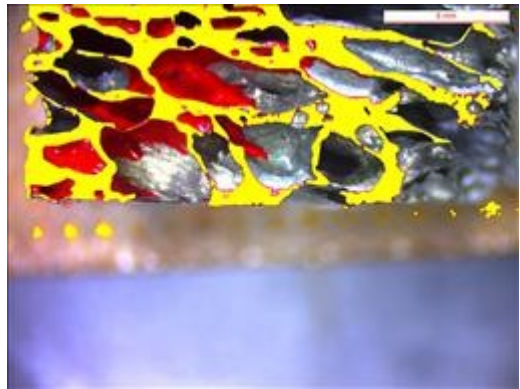
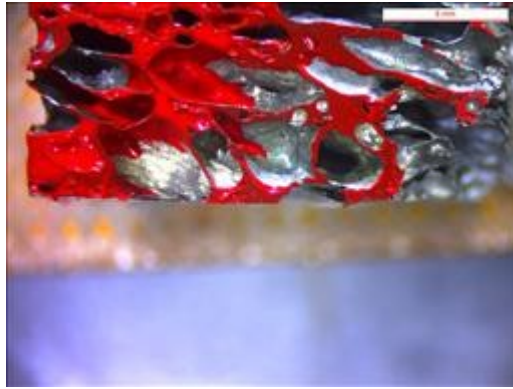
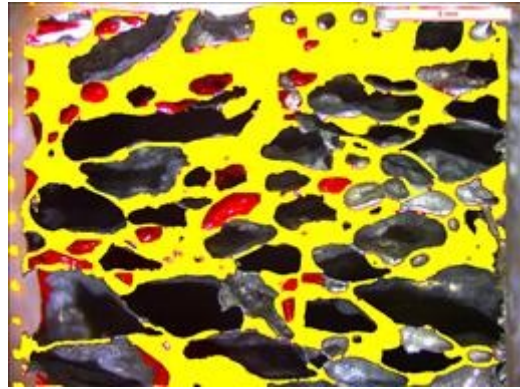
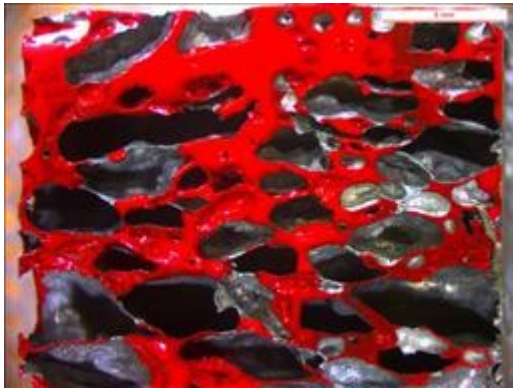


Fig.3.5. Sezione longitudinale del provino D3

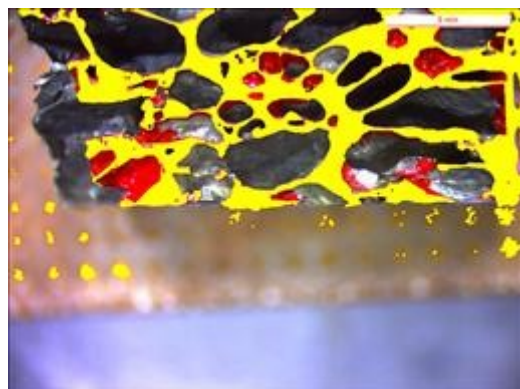
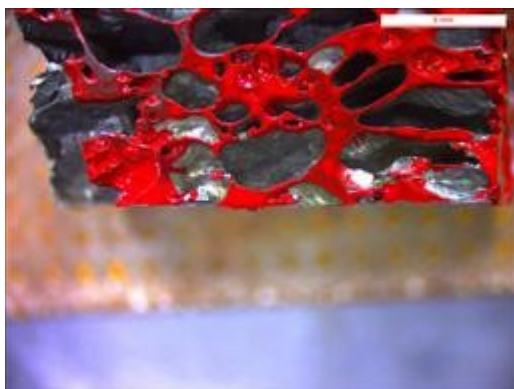
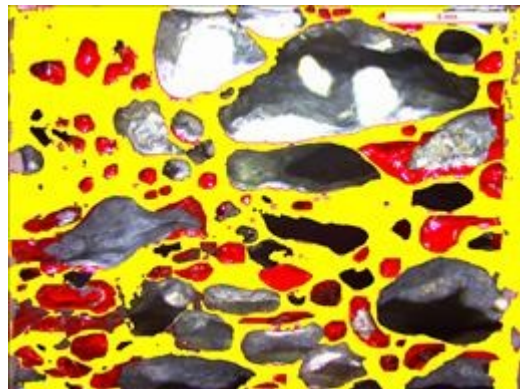
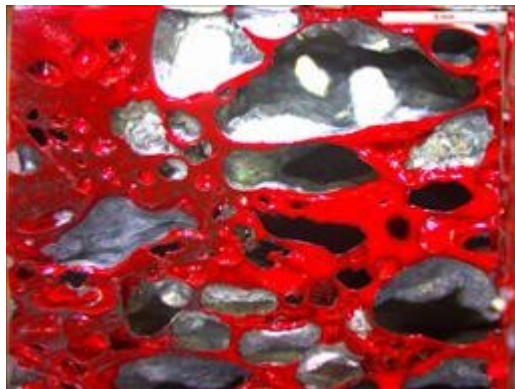


Fig.3.6. Sezione trasversale del provino D3



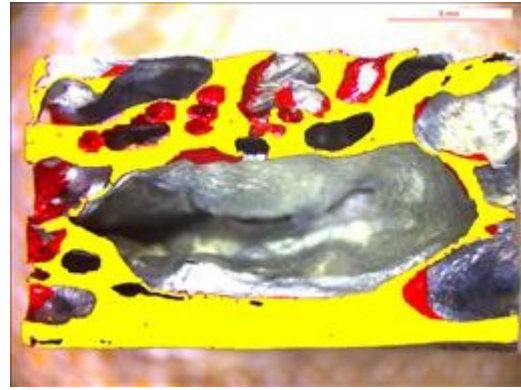


Fig.3.7. Sezione longitudinale del provino G1

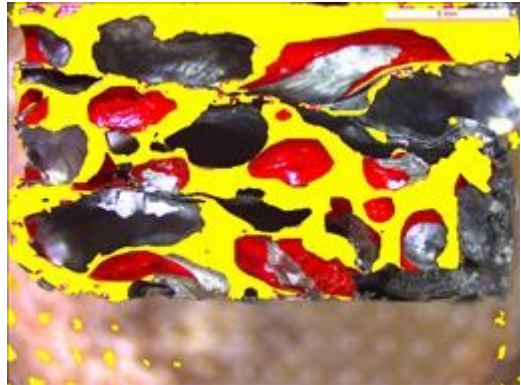
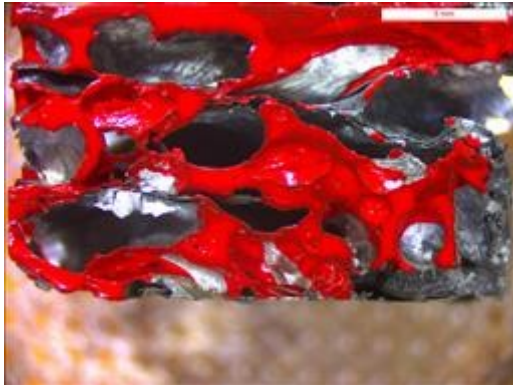


Fig.3.8. Sezione trasversale del provino G1

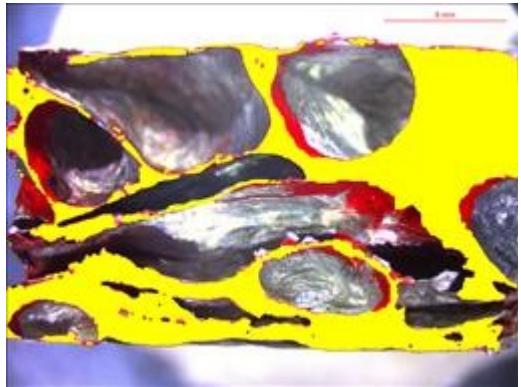
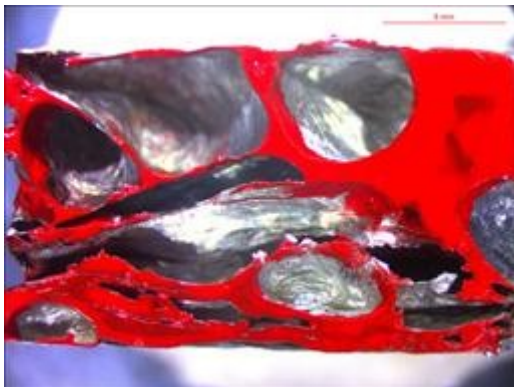


Fig.3.9. Sezione longitudinale del provino G3



Fig.3.10. Sezione trasversale del provino G3

Per i commenti sulla morfologia della schiuma e delle porosità si rimanda al paragrafo successivo (paragrafo 3.2).

La fase di lucidatura ha causato la rottura dell'angolo di alcuni provini (ad esempio, ben visibile nel provino D3 nelle figure 3.5 e 3.6). Quelle aree inizialmente piene sono state conteggiate come vuote. La vernice è penetrata anche in alcune porosità. Inizialmente il software le riconosceva come aree piene ma sono state tolte dal conteggio successivamente.

In tutti i provini si può vedere vicino ai bordi un'assenza di porosità.

Le figure 3.11 e 3.12 mostrano i grafici ottenuti con l'analisi di immagine. Nell'asse x vengono indicati provini. Come spiegato nel paragrafo 2.2, la prima lettera indica la schiuma a cui appartiene il provino e la cifra successiva indica il numero del provino. Con LONG si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione longitudinale del provino. Con TRASV si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione trasversale del provino.

L'asse y invece presenta la densità in  $kg/dm^3$  calcolata moltiplicando la percentuale di area piena per la densità dell'alluminio (posta a  $2,7 kg/dm^3$ ). La linea rossa rappresenta il valore medio.

Si ricorda che le sezioni dei provini D sono state acquisite in due immagini. Il valore indicato nel grafico è quindi una media tra due valori.

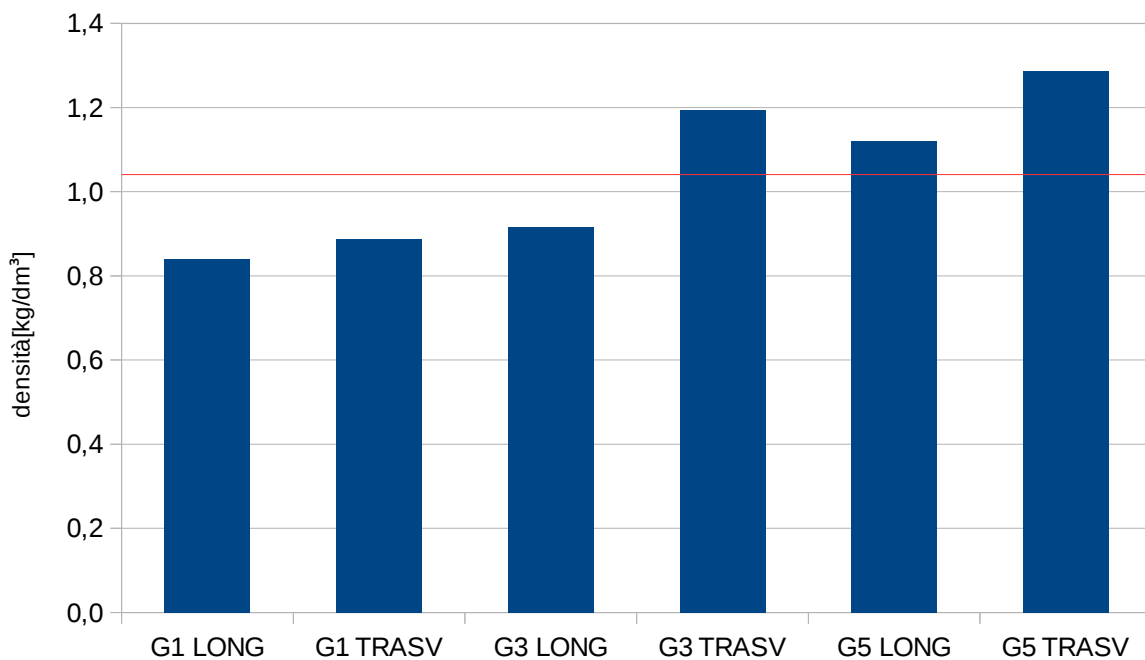


Fig.3.11. Densità nei provini G misurata con analisi di immagine

La densità media dei singoli provini presenta un andamento non costante. Il provino G1 presenta una densità costante tra le due sezioni, questo non si può dire per i provini G3 e G5. La densità sembra avere un andamento crescente che parte dal valore minimo del provino G1 di  $0,8 kg/dm^3$  fino ad andare al provino G5 con  $1,3 kg/dm^3$ . L'assenza di porosità nelle zone vicine alla superficie sembra avere un peso rilevante sul risultato che si ottiene dall'analisi di immagine.

La densità media della schiuma G è  $1,0 kg/dm^3$  con una deviazione standard di  $0,18 kg/dm^3$ .



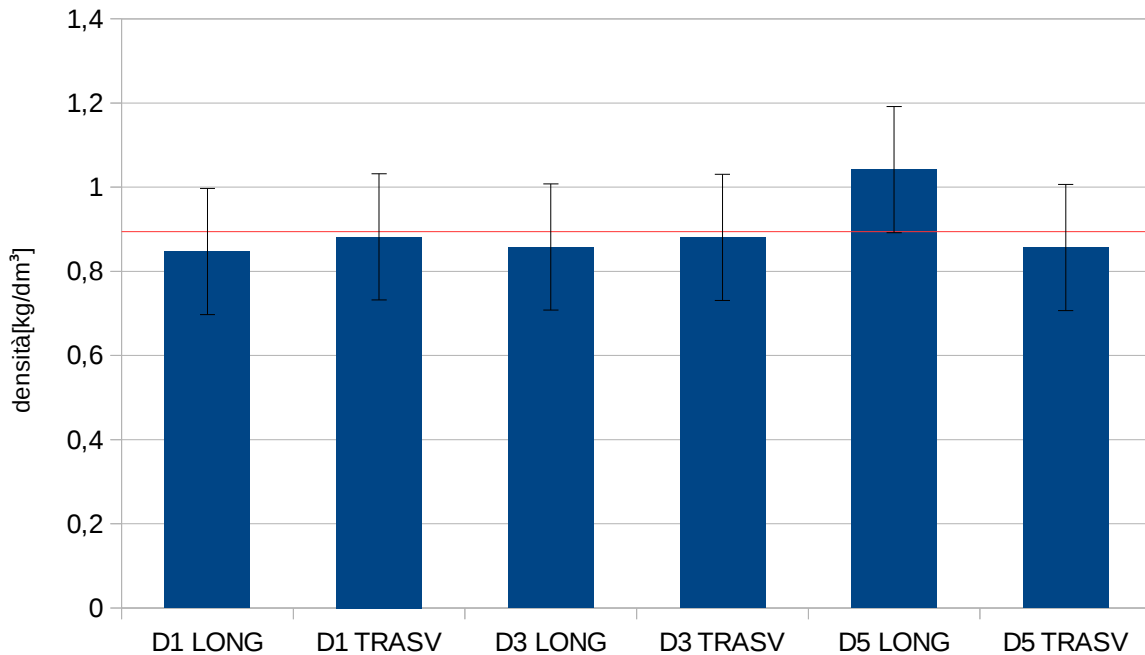


Fig.3.12. Densità nei provini D misurata con analisi di immagine

La densità media dei singoli provini presenta un andamento non costante. Il valore minimo è  $0,8 \text{ kg/dm}^3$  e il valore massimo è  $1,0 \text{ kg/dm}^3$ . La schiuma D sembra avere dei risultati meno variabili rispetto alla schiuma G. A parte la sezione longitudinale del provino D5, le altre sezioni oscillano tra  $0,8$  e  $0,9 \text{ kg/dm}^3$ .

La densità media della schiuma D è  $0,9 \text{ kg/dm}^3$  con una deviazione standard di  $0,15 \text{ kg/dm}^3$ .

In complessivo, la schiuma D ha ancora una densità minore di G. Anche se i valori di deviazione standard sono simili, la variazione dei risultati della schiuma D sembra minore.

### 3.2. Analisi delle porosità

Vengono riportate di seguito solo le immagini binarizzate delle porosità studiate. Le immagini acquisite sono le stesse utilizzate per il calcolo della densità. La nomenclatura dei provini è quella spiegata nel paragrafo 2.2, la prima lettera indica la schiuma a cui appartiene il provino e la cifra successiva indica il numero del provino. Per questa analisi sono stati utilizzati i provini di dimensione  $20 \times 20 \text{ mm}$ .

Per ogni immagine sono state analizzate 8 bolle.

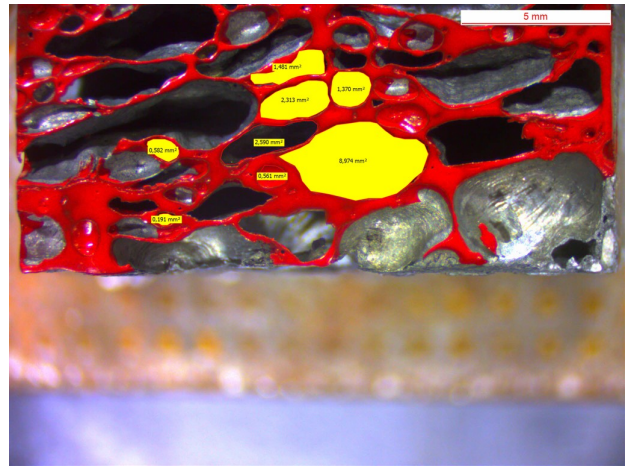
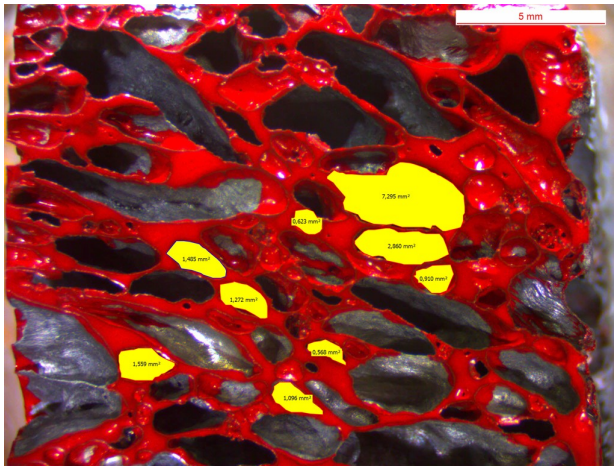


Fig.3.13. Analisi delle porosità della sezione longitudinale del provino D1

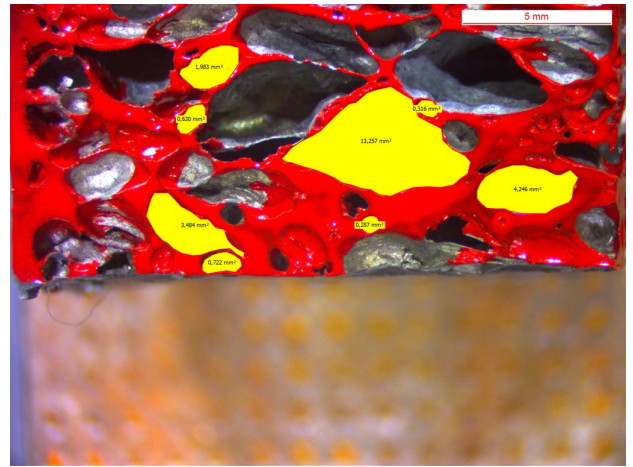
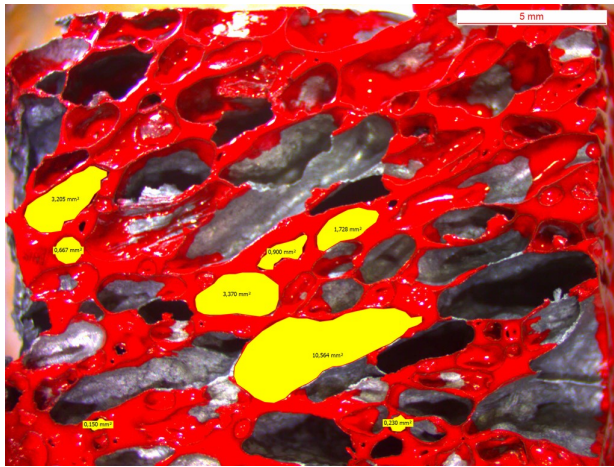


Fig.3.14. Analisi delle porosità della sezione trasversale del provino D1

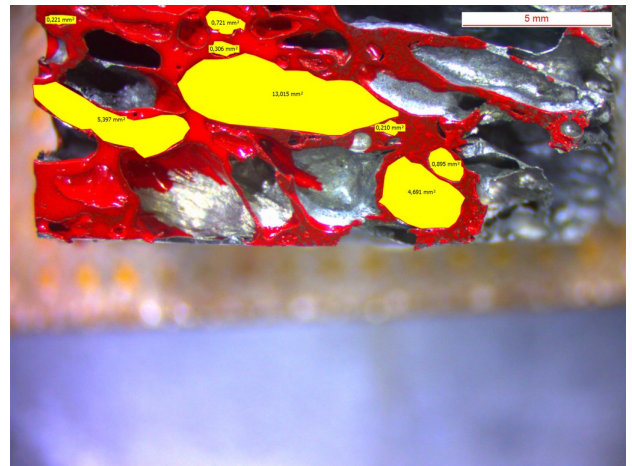
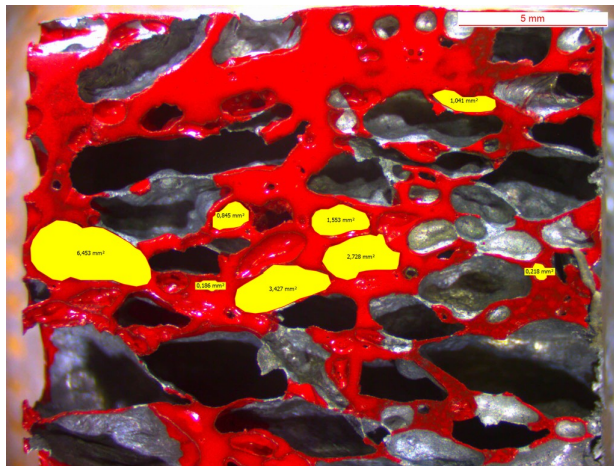


Fig.3.15. Analisi delle porosità della sezione longitudinale del provino D3



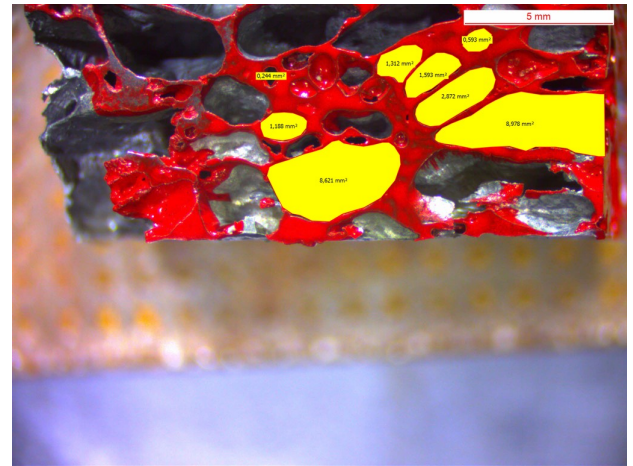
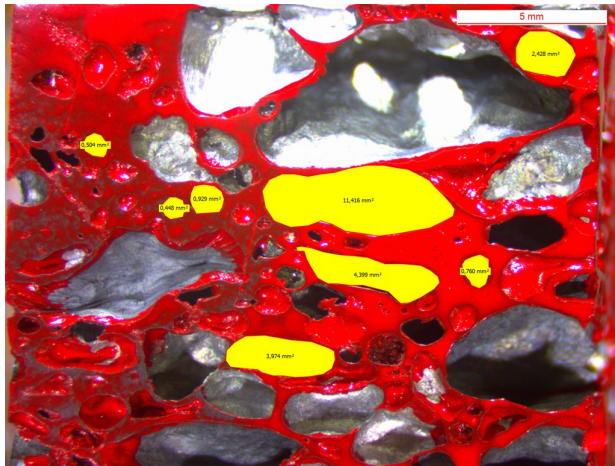


Fig.3.16. Analisi delle porosità della sezione trasversale del provino D3

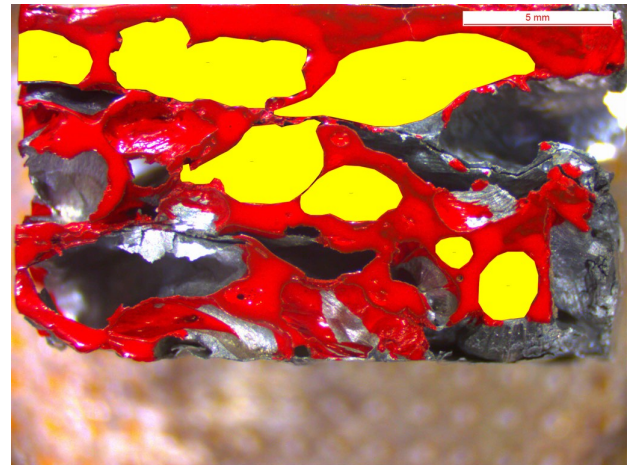
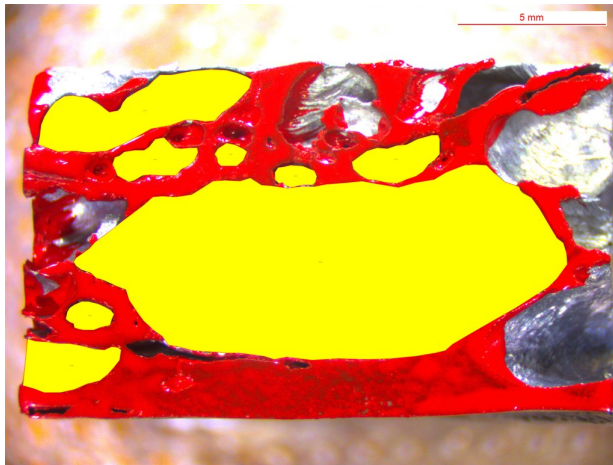


Fig.3.17. Analisi delle porosità delle sezioni longitudinale e trasversale del provino G1

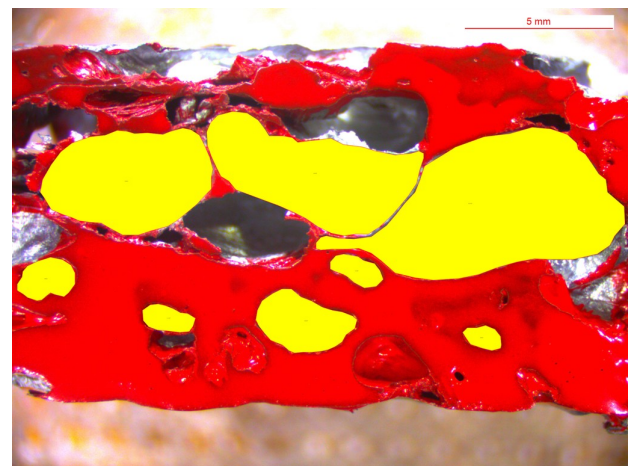
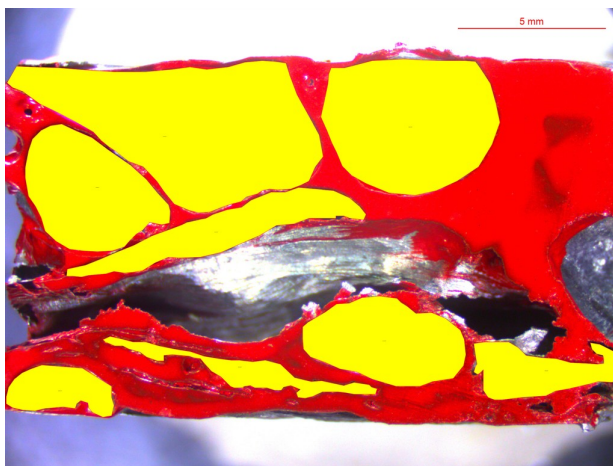


Fig.3.18. Analisi delle porosità delle sezioni longitudinale e trasversale del provino G3

Visivamente le porosità non sembrano avere forma o dimensione costante. Le bolle hanno tutte una forma allungata, sia sulla superficie longitudinale che su quella trasversale. Non sembrano esserci particolari cambiamenti tra le due sezioni, quindi il materiale si può dire che è localmente isotropo. Si sottolinea nuovamente l'assenza di porosità nella parte esterna dei provini.

I grafici in figura 3.19 e 3.20 mostrano la media dei diametri equivalenti calcolati in ogni provino con la formula (2.4).

Per ogni immagine sono stati calcolati 8 diametri equivalenti. Con long si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione longitudinale del provino. Con trasv si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione trasversale del provino. La lettera identifica sempre la schiuma e la cifra il numero del provino. La linea media è segnata in rosso.

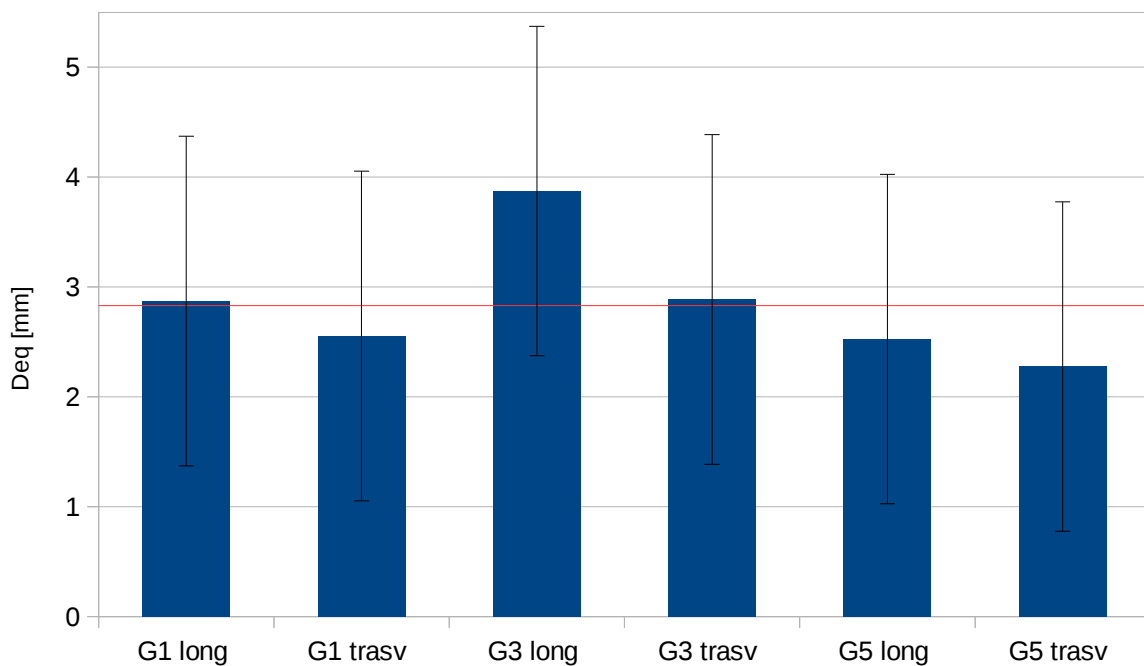


Fig.3.19. Diametro equivalente nei provini G

La deviazione standard del singolo provino è molto alta (circa 1,5 mm) rispetto al valore medio. La dimensione delle porosità non è costante e non segue un andamento regolare. Il valore massimo è 3,8 mm e il valore minimo è 2,3 mm.

La media del diametro equivalente della schiuma G è 2,8 mm con una deviazione standard di 0,5 mm.

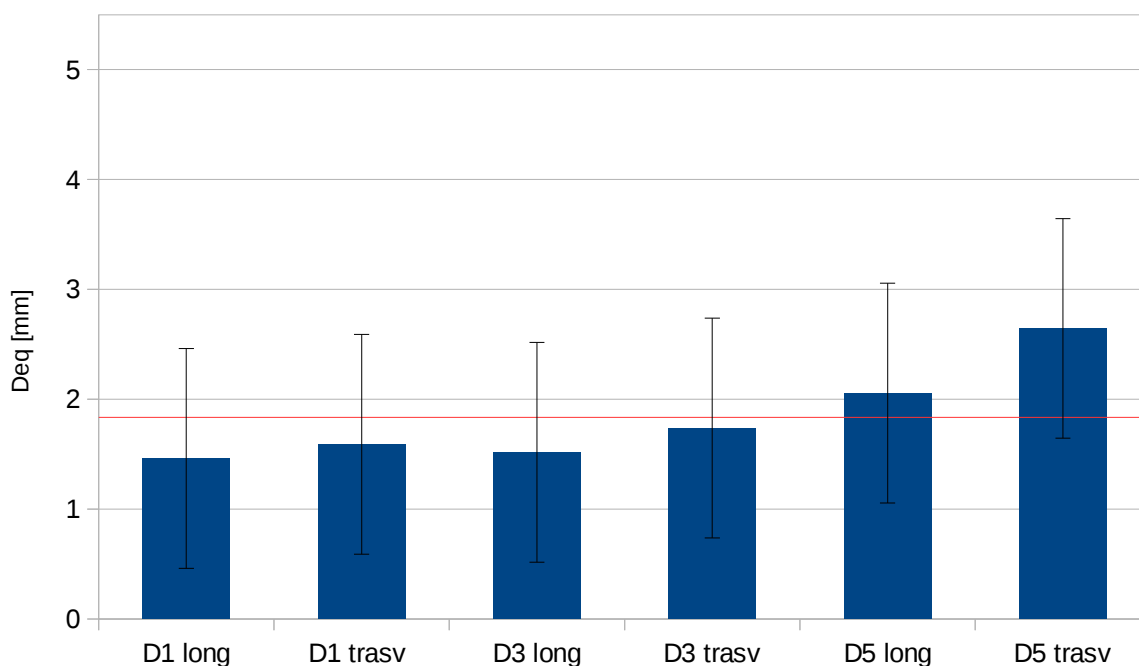


Fig.3.20. Diametro equivalente nei provini D

La deviazione standard del singolo provino è molto alta (circa 1 mm) rispetto al valore medio. La dimensione delle porosità non è costante e non segue un andamento regolare. Il valore massimo è 2,9 mm e il valore minimo è 1,4 mm.

La media del diametro equivalente della schiuma D è 1,8 mm con una deviazione standard di 0,5 mm.

La schiuma D presenta delle porosità di dimensione minore rispetto a G. Tuttavia la variazione dei diametri equivalenti delle singole bolle è molto alta in entrambe le schiume.

I grafici in figura 3.21 e 3.22 mostrano la media dei parametri di circolarità calcolati in ogni provino con la formula (2.5).

Per ogni immagine sono stati calcolati 8 parametri di circolarità. Con long si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione longitudinale del provino. Con trasv si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione trasversale del provino. La lettera identifica sempre la schiuma e la cifra il numero del provino. La linea media è segnata in rosso.

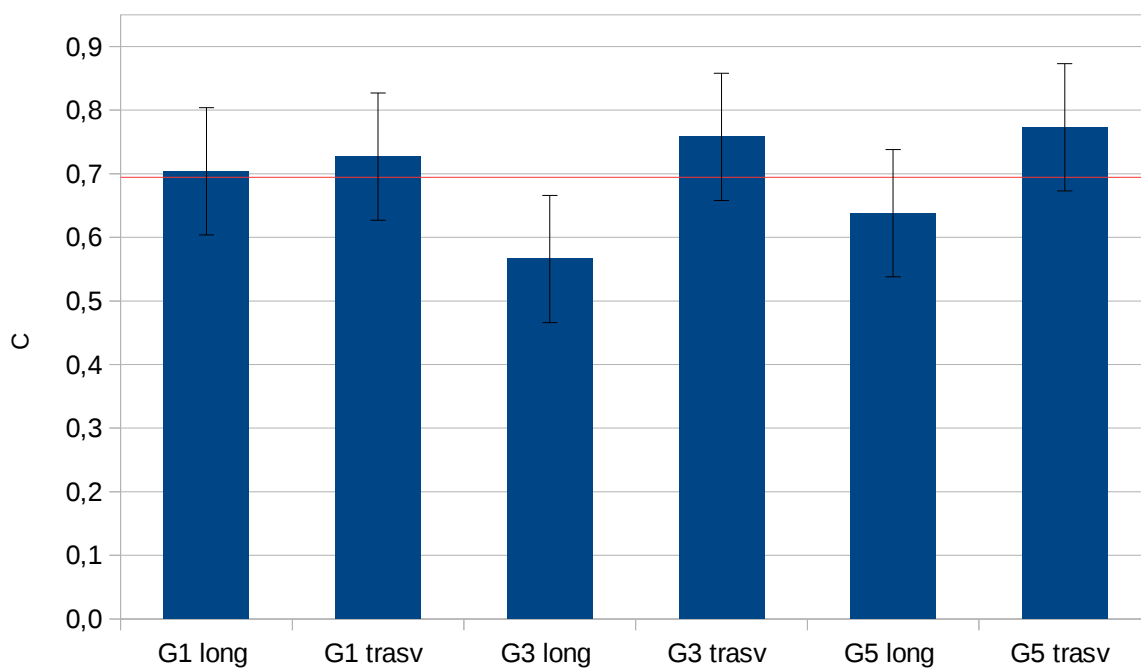


Fig.3.21. Parametro di circolarità nei provini G

Il parametro di circolarità non presenta un andamento costante. Il valore massimo è 0,8 e il valore minimo è 0,6. La variazione dei risultati nel singolo provino è più contenuta rispetto al Deq, con una deviazione standard di circa 0,1.

La media del parametro di circolarità della schiuma G è 0,7 con una deviazione standard di 0,08.

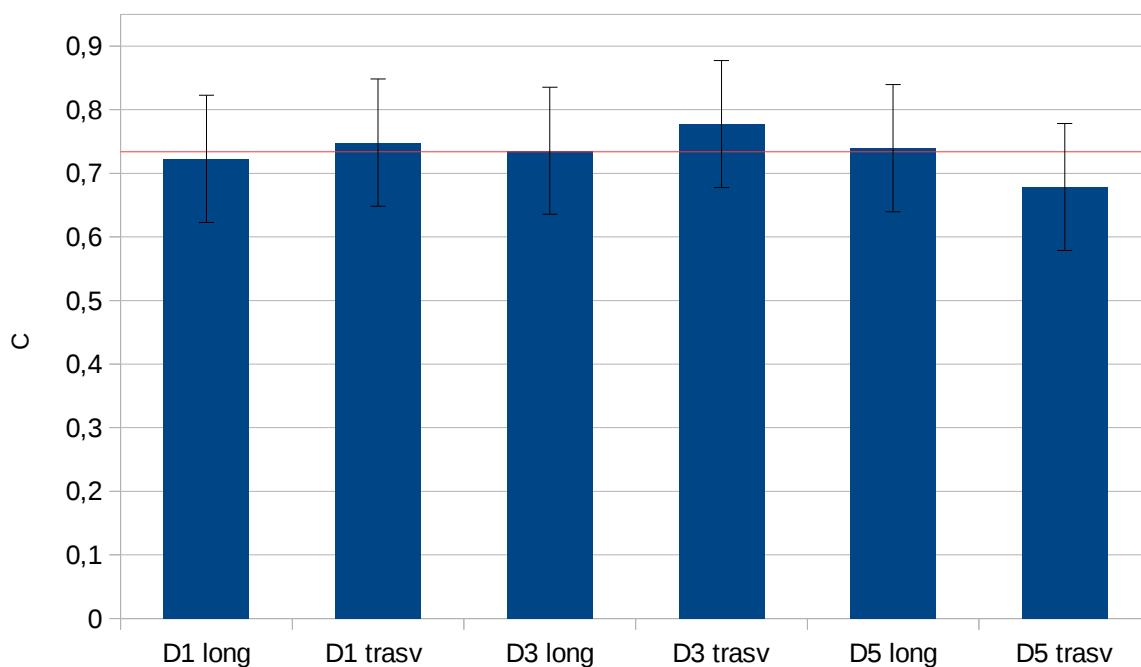


Fig.3.22. Parametro di circolarità nei provini D

Il parametro di circolarità non presenta un andamento costante. Il valore massimo è 0,8 e il valore minimo è 0,6. La variazione dei risultati nel singolo provino è più contenuta rispetto al Deq, con una deviazione standard di circa 0,1.

La media del parametro di circolarità della schiuma D è 0,7 con una deviazione standard di 0,04.

Entrambe le schiume presentano il medesimo parametro di circolarità. La schiuma D presenta ancora una volta una variazione dei risultati leggermente minore.

I grafici in figura 3.23 e 3.24 mostrano la media dei rapporti d'aspetto calcolati in ogni provino con la formula (2.6).

Per ogni immagine sono stati calcolati 8 rapporti d'aspetto. Con long si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione longitudinale del provino. Con trasv si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione trasversale del provino. La lettera identifica sempre la schiuma e la cifra il numero del provino. La linea media è segnata in rosso.

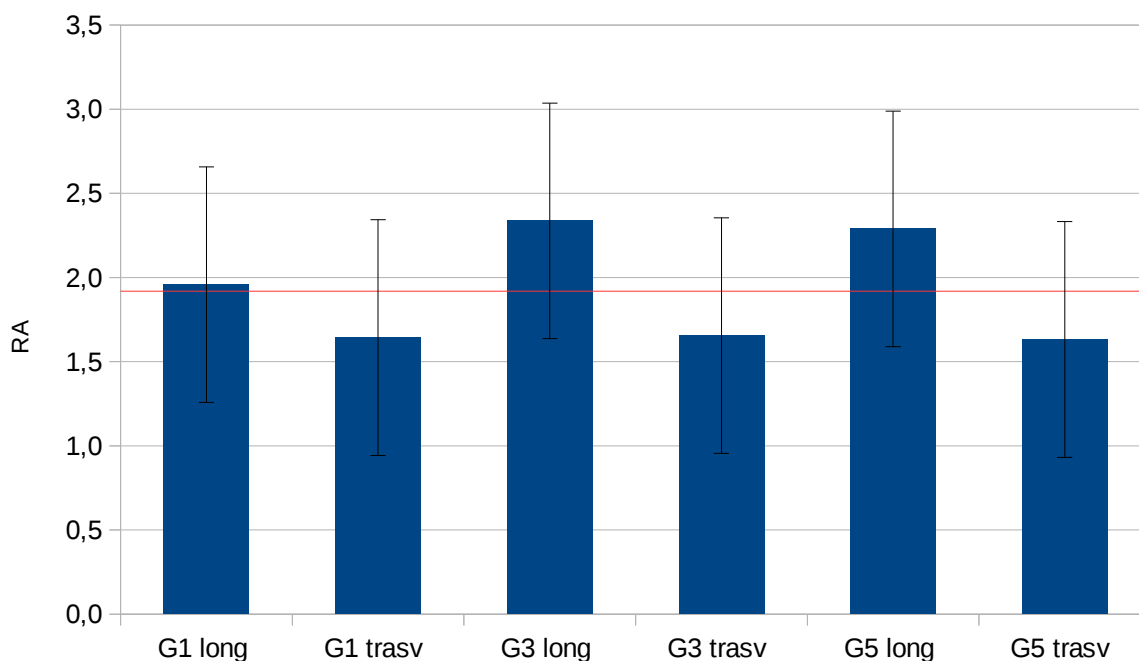


Fig.3.23. Rapporto d'aspetto nei provini G

Il rapporto d'aspetto non presenta un andamento costante. Il valore massimo è 2,3 e il valore minimo è 1,6. La variazione dei risultati nel singolo provino non è molto contenuta, con una deviazione standard di circa 0,7.

La media del rapporto d'aspetto della schiuma G è 1,9 con una deviazione standard di 0,3.

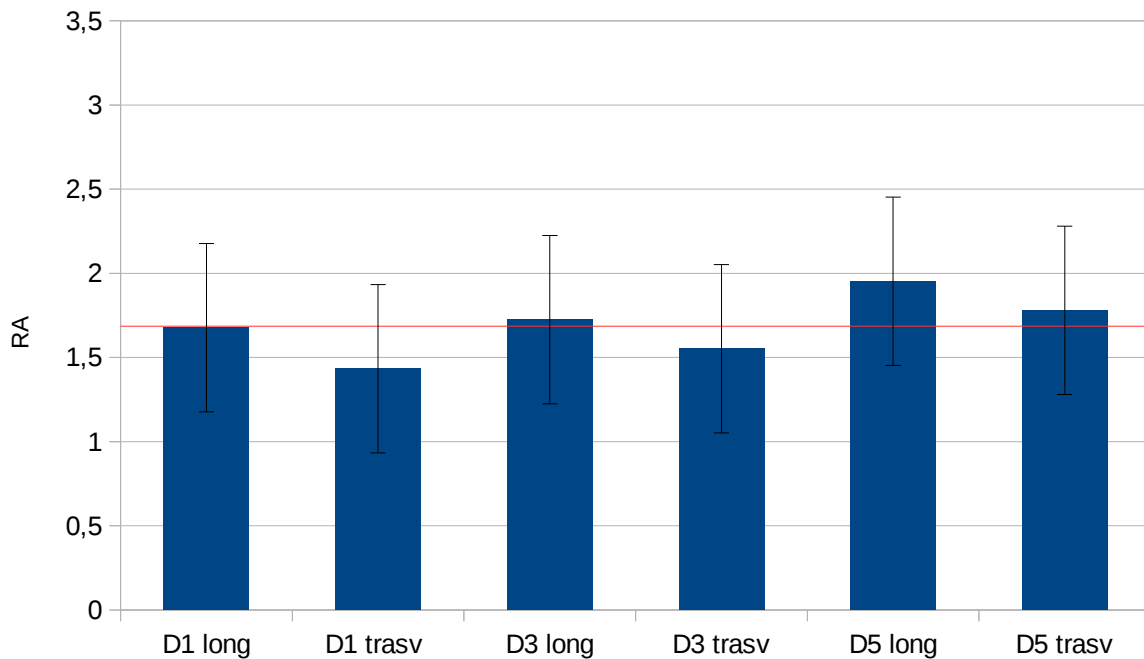


Fig.3.24. Rapporto d'aspetto nei provini D

Il rapporto d'aspetto non presenta un andamento costante. Il valore massimo è 1,9 e il valore minimo è 1,4. La variazione dei risultati nel singolo provino non è molto contenuta, con una deviazione standard di circa 0,5.

La media del rapporto d'aspetto della schiuma D è 1,7 con una deviazione standard di 0,2.

I valori del parametro di circolarità sono vicini a 2 per entrambe le schiume. Questo indica che la lunghezza della bolla è quasi il doppio della sua altezza. E' indice di una forma allungata delle porosità.

I grafici in figura 3.25 e 3.26 mostrano la distribuzione delle porosità calcolata in ogni provino con la formula (2.7).

Per ogni immagine è stata calcolata la distribuzione delle porosità in 4 punti diversi della sezione prendendo un'area casuale e contando i pori al suo interno. Con long si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione longitudinale del provino. Con trasv si indica l'immagine acquisita riguardante la sezione trasversale del provino. La lettera identifica sempre la schiuma e la cifra il numero del provino. La linea media è segnata in rosso.



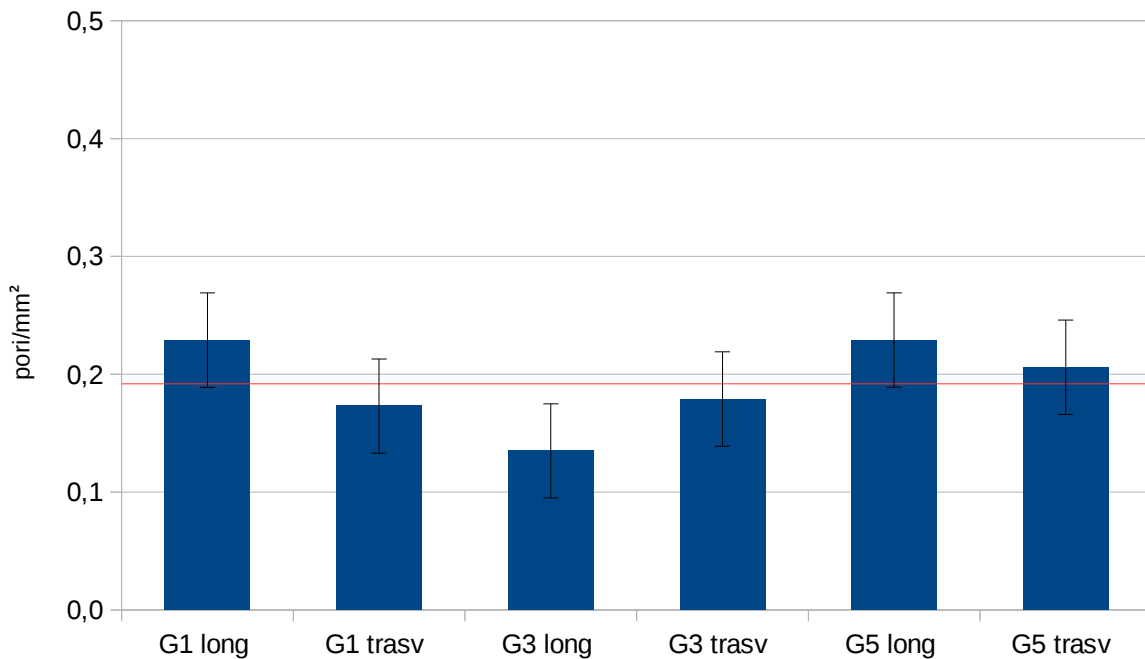


Fig.3.25. Distribuzione porosità nei provini G

Le porosità non sono distribuite omogeneamente e non seguono un particolare andamento. Il valore massimo della distribuzione è  $0,2 \text{ pori/mm}^2$  e il valore minimo è  $0,1 \text{ pori/mm}^2$ . La variazione dei risultati nel singolo provino non è molto contenuta, con una deviazione standard di circa  $0,04$ . La media del numero di pori su unità di area della schiuma G è  $0,2 \text{ pori/mm}^2$  con una deviazione standard di  $0,04 \text{ pori/mm}^2$ .

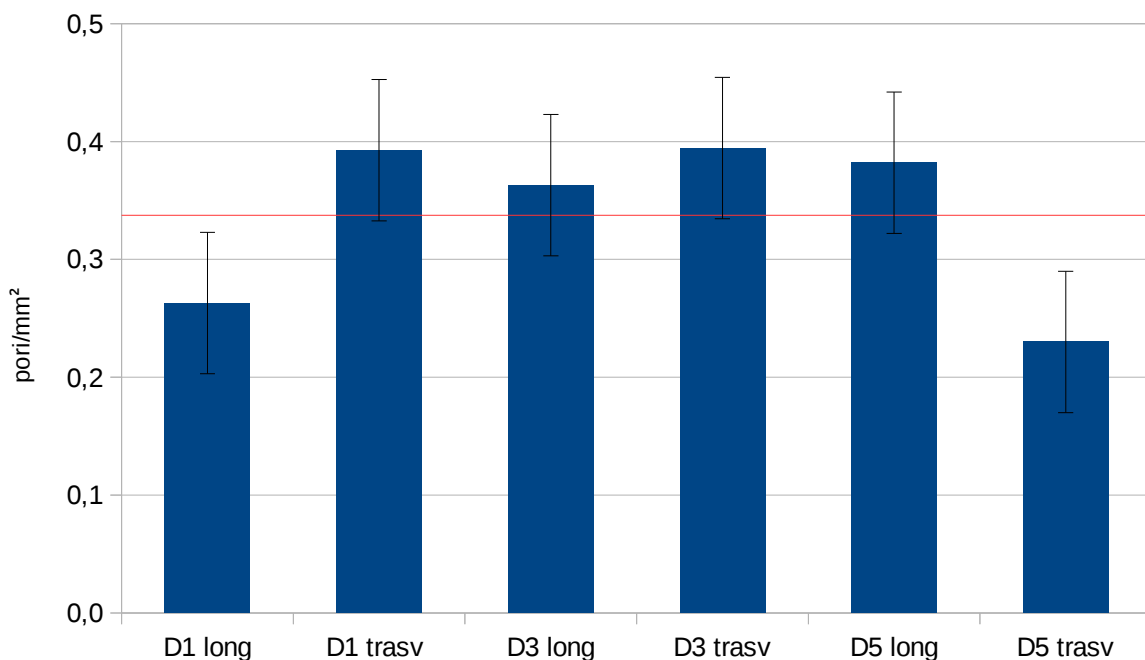


Fig.3.26. Distribuzione porosità nei provini D

Le porosità non sono distribuite omogeneamente e non seguono un particolare andamento. Il valore

massimo della distribuzione è  $0,4 \text{ pori/mm}^2$  e il valore minimo è  $0,2 \text{ pori/mm}^2$ . La variazione dei risultati nel singolo provino non è molto contenuta, con una deviazione standard di circa 0,07. La media del numero di pori su unità di area della schiuma D è  $0,3 \text{ pori/mm}^2$  con una deviazione standard di  $0,08 \text{ pori/mm}^2$ .

### 3.3. Prova d'impatto

Le figure da 3.27 a 3.32 mostrano le prove di impatto eseguite sui provini D01,D02,D03,G03,G04,G05. La nomenclatura segue le regole precedenti: la lettera identifica la schiuma e la cifra il numero del provino. E' bene precisare che se anche alcuni nomi sono i medesimi utilizzati per la misura della densità o per l'analisi di immagine, essi non hanno niente a che vedere con i provini della prova di impatto.

I provini sono di dimensione  $120 \times 120 \text{ mm}$  con spessore di 25 mm per D e 12 mm per G. I grafici sono stati "tagliati" ad un tempo di 10 ms per la schiuma D e 6 ms per la schiuma G. Questo perché dopo il tempo citato le prove erano già concluse. Per la schiuma D sono state eseguite 10 prove (da D01 a D10). Invece per G sono state eseguite 9 prove (da G03 a G11).

Nell'asse delle x troviamo il displacement in mm, che in italiano si può tradurre come spostamento. Nell'asse delle y troviamo la forza in N.

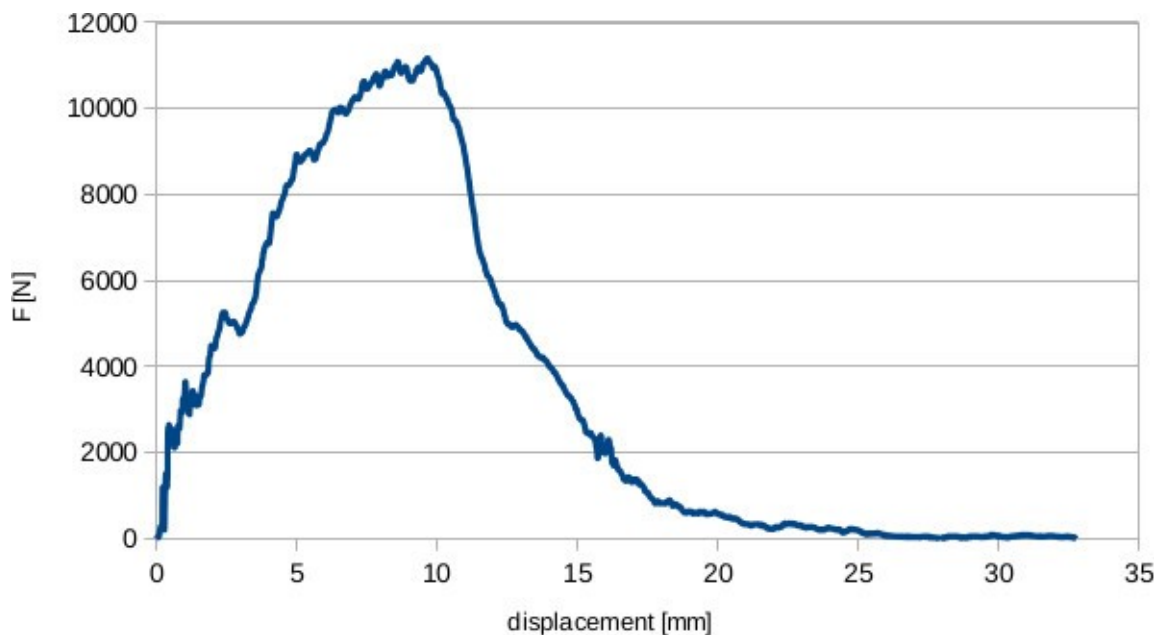


Fig.3.27.Prova di impatto del provino D01

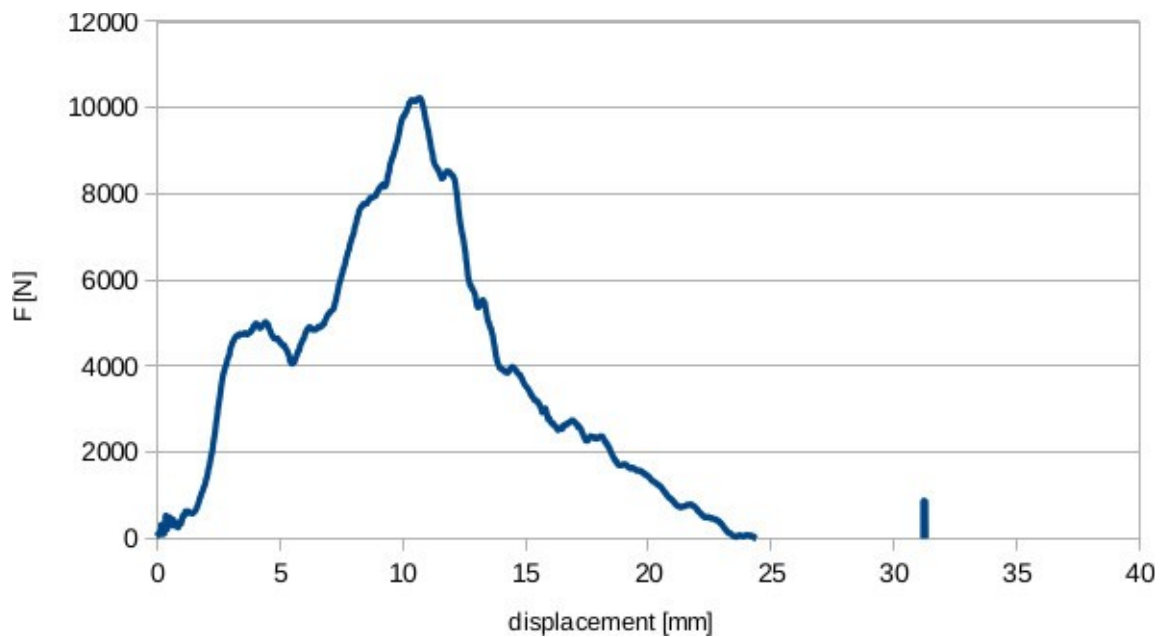


Fig.3.28.Prova di impatto del provino D02

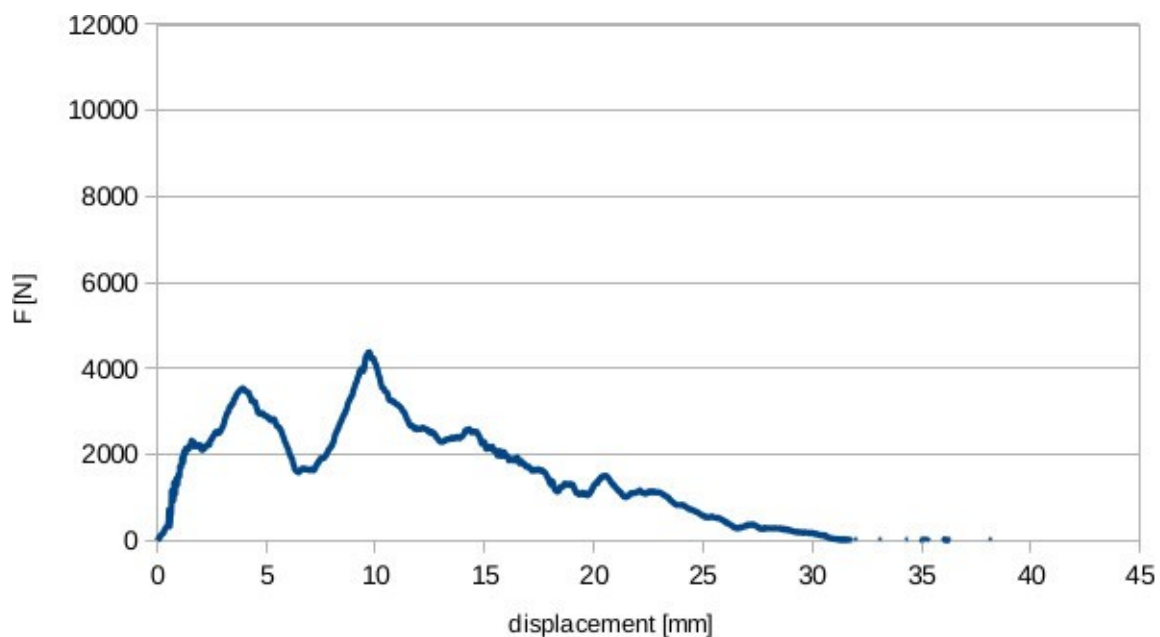


Fig.3.29.Prova di impatto del provino D03

Le curve ricavate mostrano una rottura fragile del provino con propagazione instabile della frattura. Dopo un tempo di soli 10 ms la prova è già conclusa, segno che con ferma le considerazioni della frase precedente. Le curve presentano un ripido innalzamento ed abbassamento della forza. I grafici inoltre presentano dei picchi e degli avvallamenti. Gli spostamenti e le forze presenti durante la prova cambiano da provino a provino. In particolare il provino D03 (Fig.3.29) presenta una forza nettamente inferiore alle altre due prove.

La forza nelle prove con la schiuma D varia tra un valore di 11 e 4 kN.

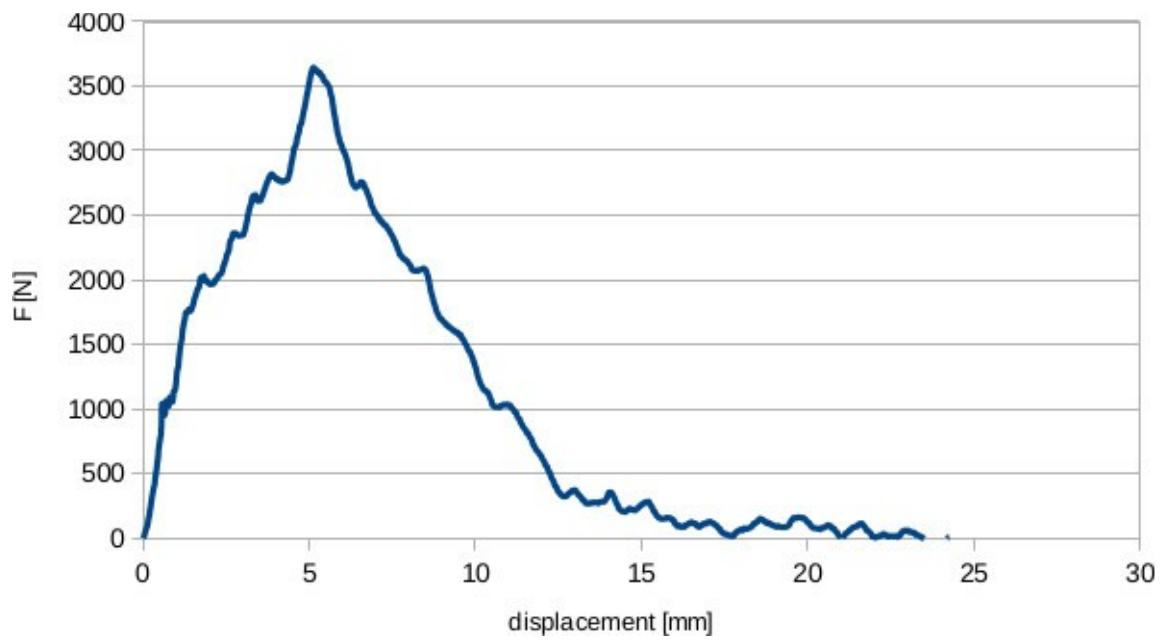


Fig.3.30.Prova di impatto del provino G03

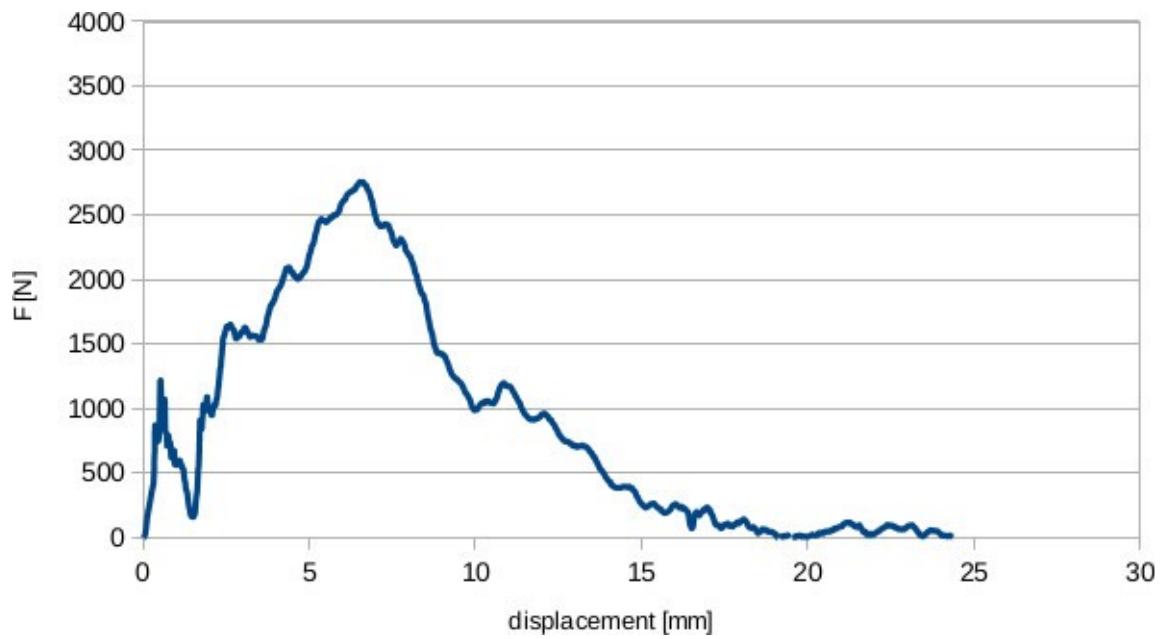


Fig.3.31.Prova di impatto del provino G04

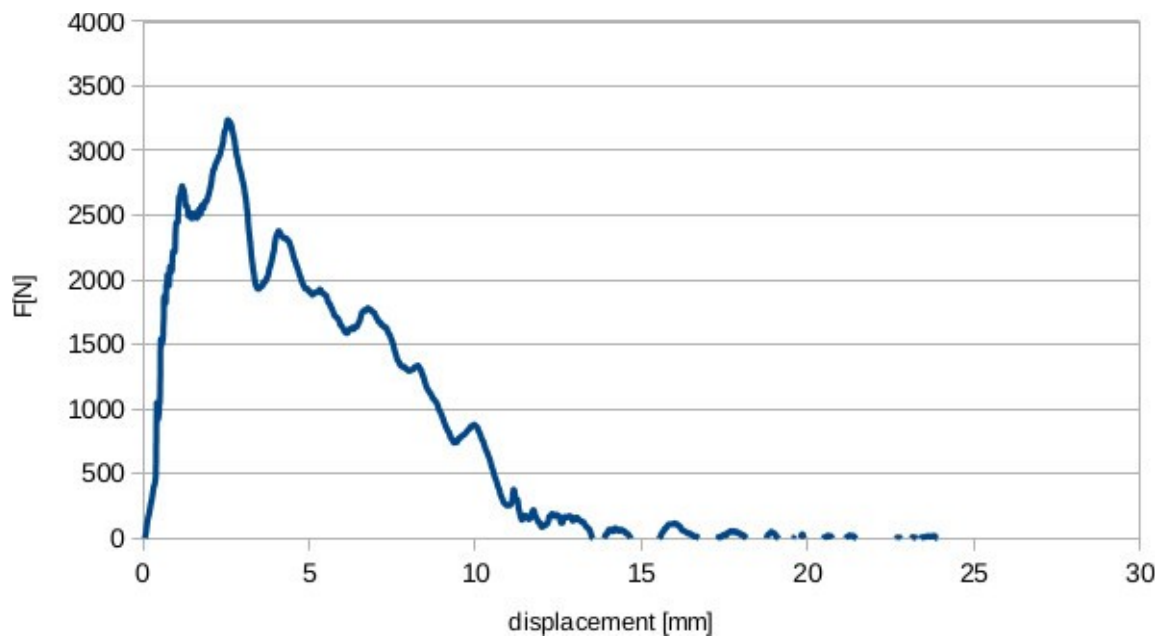


Fig.3.32.Prova di impatto del provino G05

Le considerazioni sono simili ai provini D. Le curve ricavate mostrano una rottura fragile del provino con propagazione instabile della frattura. Dopo un tempo di soli 6 ms la prova è già conclusa. Le curve presentano un ripido innalzamento ed abbassamento della forza. I grafici inoltre presentano dei picchi e degli avvallamenti. Anche qui gli spostamenti e le forze presenti durante la prova cambiano da provino a provino.

La forza nelle prove con la schiuma G varia tra 4 e 2,5 kN.

In complessivo le curve della schiuma D sono più alte delle curve della schiuma G. Anche per gli spostamenti vale la stessa cosa, complice anche il fatto che la D ha una spessore maggiore. Per quanto riguarda la forma delle curve delle due schiume è simile. Entrambe hanno un ripido innalzamento iniziale e presentano entrambe numerosi picchi.

L'energia assorbita da ogni provino si può vedere nelle figure 3.33 e 3.34. I grafici presentano l'energia assorbita nell'asse y e i vari provini nell'asse x. Per la schiuma D sono state eseguite 10 prove (da D01 a D10). Invece per G sono state eseguite 9 prove (da G03 a G11). La linea media è segnata in rosso.

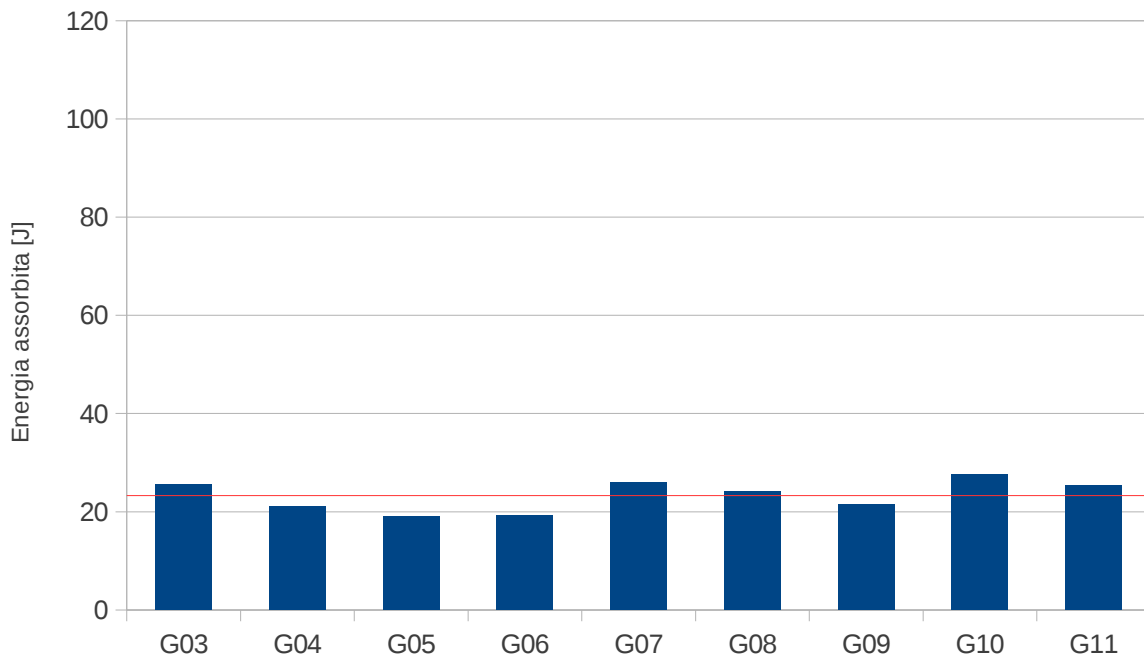


Fig.3.33. Energia assorbita dai provini G

L'assorbimento di energia è abbastanza costante nella schiuma G. Si va da un valore massimo di 27 J e un valore minimo di 19 J.

La media dell'energia assorbita dal provino è G 23 J, con deviazione standard di 3 J.

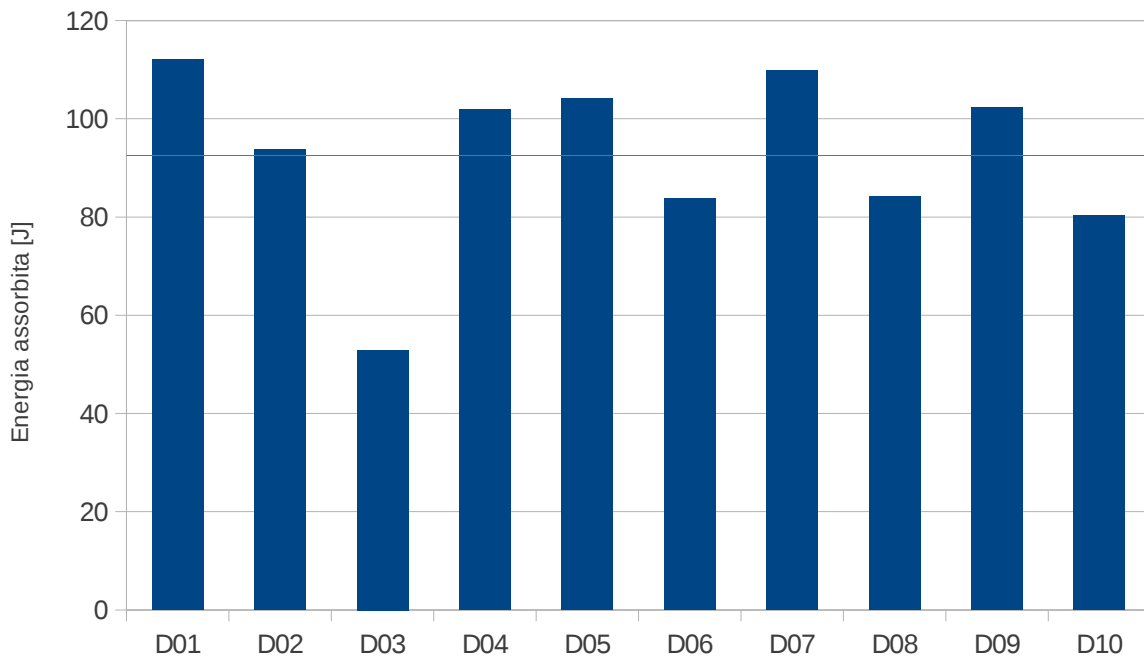


Fig.3.34. Energia assorbita dai provini D

L'assorbimento di energia è meno costante nella schiuma D. Si va da un valore massimo di 112 J e un valore minimo di 52 J.

La media dell'energia assorbita dal provino è D 92 J, con deviazione standard di 18 J.

In complessivo la schiuma D, anche se con risultati più variabili, riesce ad assorbire più energia di G. Si ricorda che le due schiume non sono a parità di spessore.

### 3.4. Realizzazione di schiume in lega di alluminio

Prova 1: la prima prova si è svolta con il 2% di schiumante. Dopo non aver visto alcuna reazione si è aggiunto un ulteriore 10%.

La lega EN AB 46100 era 114 g, lo schiumante 2,28 g e l'aggiunta successiva di 11,4 g. Il forno era impostato a 750 °C.

Dopo aver estratto il crogiolo dal forno e tolto la scoria, è stata misurata la temperatura con una termocoppia. Il fuso era ad una temperatura di 730 °. Il diuro è stato immerso nel fuso e la lega è stata mescolata, poi la schiuma è stata raffreddata con aria compressa.

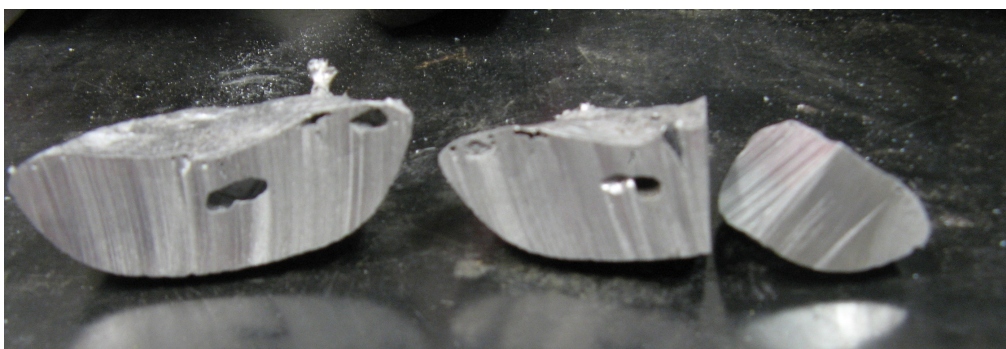


Fig.3.35. Sezione della prova 1

Il risultato è una porosità principale al centro e alcune porosità nella parte alta. Queste ultime sono derivanti dal gas che cercava di fuoriuscire o è parzialmente uscito. Non si riesce a far reagire adeguatamente il diuro. Durante la prova le pastiglie tornavano in superficie.

Prova 2: la seconda prova si è svolta provando ad aumentare la percentuale di diuro (20%).

La lega EN AB 46100 era 93 g, lo schiumante 18,6 g. Il forno era impostato a 750 °C. Estratto il crogiolo dal forno e tolto la scoria, è stata misurata la temperatura con una termocoppia. Il fuso era ad una temperatura di 720 °. Il diuro è stato immerso nel fuso e la lega è stata mescolata, poi la schiuma è stata raffreddata con aria compressa.



Fig.3.55. Sezione della prova 2

Le porosità continuano ad essere concentrate al centro. L'aumento di diuro non ha dato benefici alla schiumatura. Non si riesce a far reagire adeguatamente il diuro. Durante la prova le pastiglie tornavano in superficie.

Prova 3: questa prova si è svolta provando ad aumentare la quantità di lega. A causa delle basse quantità di lega delle prove 1 e 2 si è pensato che la temperatura calasse troppo rapidamente appena estratto il crogiolo. Ad una temperatura troppo bassa il diuro cessa di rilasciare gas.

La lega EN AB 46100 era 460 g, lo schiumante 23 g. Il forno era impostato a 750 °C. Estratto il crogiolo dal forno e tolto la scoria, è stata misurata la temperatura con una termocoppia. Il fuso era ad una temperatura di 730 °. Il diuro è stato immerso nel fuso e la lega è stata mescolata, poi la schiuma è stata raffreddata con aria compressa.



Fig.3.56. Sezione della prova 3

Le porosità continuano a concentrarsi al centro e nella parte alta. La bolla centrale sembra leggermente più grande delle prove precedenti. Il gas non si è propagato bene in tutto il fuso. Durante la prova le pastiglie tornavano in superficie.

Prova 4: questa prova si è svolta provando a far affondare le pastiglie di diuro. A causa della bassa densità, le pastiglie tornano in superficie. Avvolgendole in un foglio di domopack (fatto di alluminio commercialmente puro, quindi con una densità più elevata) per aumentare la loro densità.

La lega EN AB 46100 era 536 g, lo schiumante 27 g (5%). Il forno era impostato a 750 °C. Estratto il crogiolo dal forno e tolto la scoria, è stata misurata la temperatura con una termocoppia. Il fuso era ad una temperatura di 730 °. Il diuro è stato immerso nel fuso e la lega è stata mescolata, poi la schiuma è stata raffreddata con aria compressa.



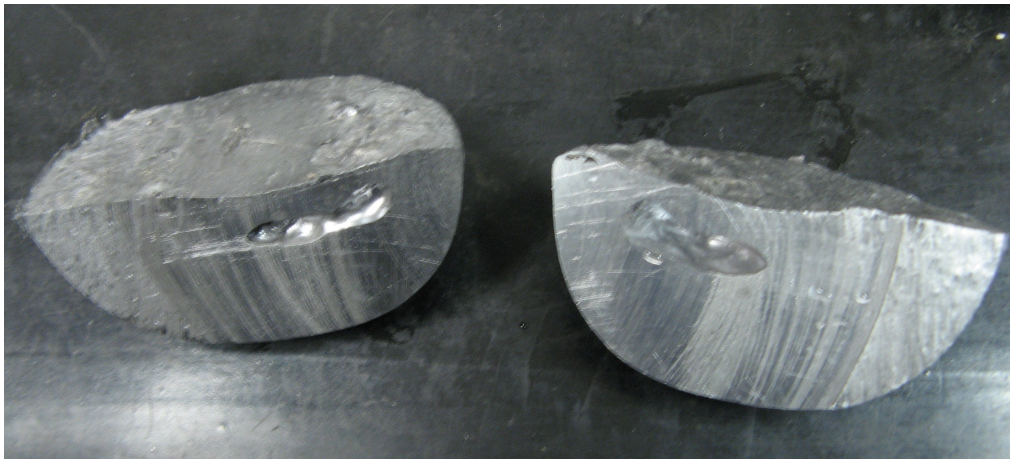


Fig.3.57. Sezione della prova 4

Porosità concentrata senza alcuna distribuzione di bolle. Il diuro non reagisce bene e il gas non si propaga. Il foglio di domopack non ha dato miglioramenti. Dopo la fusione del foglio le pastiglie tornavano in superficie.

Prova 5: anche questa prova si è svolta provando a far affondare le pastiglie di diuro avvolgendole nel domopack.

La lega EN AB 46100 era 261 g, lo schiumante 13 g (5%). Il forno era impostato a 750 °C. Estratto il crogiolo dal forno e tolto la scoria, è stata misurata la temperatura con una termocoppia. Il fuso era ad una temperatura di 730 °. Il diuro è stato immerso nel fuso e la lega è stata mescolata, poi la schiuma è stata raffreddata con aria compressa.



Fig.3.58. Sezione della prova 5

Conferma della prova precedente (prova 4). Il domopack non migliora la reazione delle pastiglie. Anche in questa prova dopo la fusione del foglio le pastiglie tornavano in superficie.

Prova 6: la prova 6 si è svolta cercando accelerare la formazione del gas e quindi la decomposizione del diuro. Questa prova differisce dalle altre in quanto è stato utilizzato l'agente soffiante sotto forma di polvere. La polvere è stata posizionata sul fondo di un secondo crogiolo. La lega fusa è stata versata sopra. La lega è stata mescolata, poi la schiuma è stata raffreddata con aria compressa. La lega EN AB 46100 era 395 g, lo schiumante 20 g (5%). Il forno era impostato a 750 °C. La temperatura della lega misurata con la termocoppia segnava 730°. Raffreddamento con aria compressa.



Fig.3.59. Risultato della prova 6

La parte opaca nella superficie è il diuro che non ha reagito. In questa prova non si sono formate porosità. Aggiungere il diuro in pastiglie non ha accelerato la reazione. Il contatto con il crogiolo freddo ha fatto raffreddare ancor più velocemente la lega, peggiorando le condizioni di schiumatura.

Prova 7: prova simile alla 6. Si è svolta cercando di accelerare la formazione del gas. Per evitare un eventuale risalita della polvere, è stata avvolta in un foglio di domopack. La polvere avvolta nel foglio è stata posizionata sul fondo di un secondo crogiolo. La lega fusa è stata versata sopra. La lega è stata mescolata, poi la schiuma è stata raffreddata con aria compressa.

La lega EN AB 46100 era 395 g, lo schiumante 20 g (5%). Il forno era impostato a 750 °C. La temperatura della lega misurata con la termocoppia segnava 700°. Raffreddamento con aria compressa.

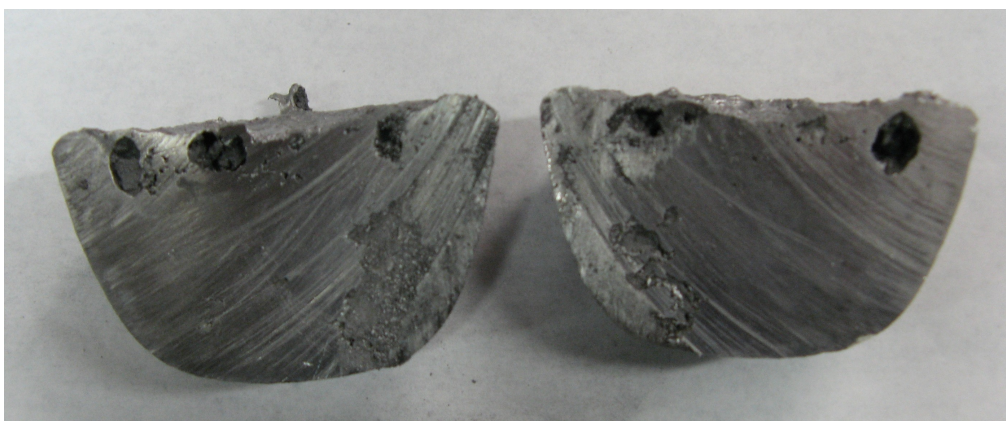


Fig.3.60. Sezione della prova 7

Non c'è una porosità principale al centro come le altre prove. Le porosità sembrano più distribuite ma presenti solo nella parte alta. La polvere dopo la fusione del foglio probabilmente sarà risalita rapidamente verso l'alto. Stessa cosa vale anche per il gas.

Prova 8: questa prova è stata svolta cercando di aumentare la viscosità del fuso. Per fare questo è



stata utilizzata una lega in fase semisolidi (25% circa). Per stimare la temperatura di lavoro è stata utilizzata una simulazione termodinamica fatta dal software JmatPro (Fig.). La lega EN AB 46000 presenta un comportamento più favorevole. La sua curva infatti presenta una curva che scende più gradualmente prima del plateau. Questo permette di controllare la percentuale di solido grazie alla sola temperatura. La lega EN AB 46100 avrebbe richiesto di lavorare all'interno del plateau. Per controllare la percentuale di solido in questa zona è necessario controllare anche il tempo oltre alla temperatura.

La lega EN AB 46000 era 381 g, lo schiumante 19 g corrispondenti al 5%. Il forno era posto inizialmente a 750° e poi abbassato gradualmente fino ad una temperatura di 578°. Il diuro è stato aggiunto nel fuso e poi il crogiolo è stato rimesso in forno per circa 8 minuti. Raffreddamento con aria compressa.

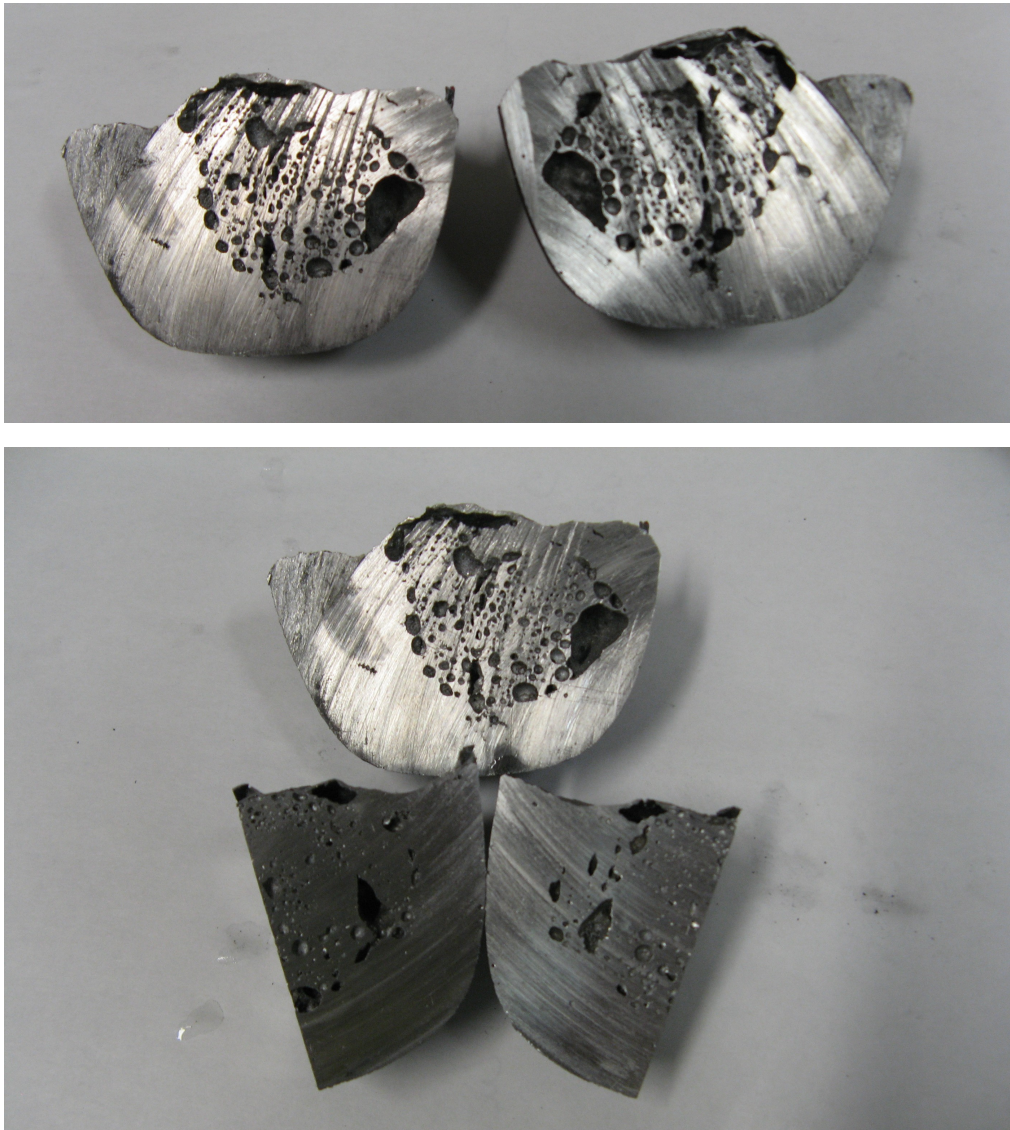


Fig.3.61. Sezione della prova 8

La quantità di gas creato e intrappolato è superiore alle prove precedenti. Le porosità sono meglio distribuite (anche nella parte bassa) e con una morfologia accettabile. Le dimensioni non sono molto omogenee. In alcune zone la lega si è solidificata prima che il diuro iniziasse a reagire.

Prova 9: prova analoga alla prova 8. Si è cercato di rendere il bagno più viscoso.

La lega EN AB 46000 era 382 g, lo schiumante 19 g corrispondenti al 5%. Il forno era posto inizialmente a 750° e poi abbassato gradualmente fino ad una temperatura di 578°. Il diuro è stato aggiunto nel fuso e poi il crogiolo è stato rimesso in forno per circa 8 minuti. Raffreddamento con aria compressa.



Fig.3.62. Sezione della prova 9

Porosità meno circolari della prova precedente. Distribuzione non paragonabile alla prova 8, ma comunque distribuzione più omogenea delle prime prove e presenza di pori anche nella parte bassa. I parametri di processo erano gli stessi della prova 8. La prova 9 però presenta un risultato più scadente. Il processo utilizzato risulta quindi molto sensibile alla minima variazione, rendendo il risultato molto variabile se non sono fissati bene i parametri.

# CAPITOLO 4

## Discussione dei risultati ottenuti

### 4.1. Risultati densità

Si può notare che i dati di densità trovati con l'analisi d'immagine sono leggermente superiori a quelli trovati con le pesate Archimedee.

E' importante sottolineare che l'analisi d'immagine dà informazioni solo sulla superficie considerata e non sull'intero volume del campione. E' possibile infatti aver trovato superfici con poche cavità che hanno alterato i dati, visto lo scarso campionamento (3 provini per schiuma).

Un'ulteriore errore è stato considerare la densità dell'alluminio puro visto che il materiale probabilmente è una lega Al-Si.

I dati raccolti hanno una notevole variazione. I campioni a disposizione non erano molti quindi non è stato possibile arrivare ad un risultato statistico adeguato.

Inoltre sono notevoli gli errori presenti nel risultato finale: l'impossibilità di più misurazioni nella pesata in acqua, la densità della lega sconosciuta e la binarizzazione dell'immagine non perfetta.

In conclusione possiamo affermare che la schiuma G ha una densità di circa  $1 \text{ kg/dm}^3$  mentre la D oscilla tra 0,7 e 0,9  $\text{kg/dm}^3$ .

### 4.2. Risultati analisi delle porosità

L'analisi delle porosità fornisce una conferma di quello che si può vedere anche visivamente sulla forma delle porosità.

La schiuma D presenta delle caratteristiche migliori in ogni parametro calcolato. Il suo Diametro equivalente è 1 mm inferiore della schiuma G. Le sue bolle quindi sono di dimensione minore.

Il parametro di circolarità è abbastanza simile tra le due e indica una buona rotondità.

Il rapporto d'aspetto è alto in entrambe le schiume, quindi porosità schiacciate, sicuramente derivanti dal passaggio tra rulli nella formazione della schiuma. E' interessante notare che nelle sezioni longitudinali questo aspetto è più marcato, con un RA maggiore rispetto alla sezione trasversale.

La schiuma D presenta più pori su unità di area rispetto a G, risultato derivante dalla loro dimensione minore.

In conclusione la schiuma D ha una morfologia delle porosità migliore della schiuma G. Ci si aspetta che anche la risposta alle sollecitazioni meccaniche sia migliore da parte di D. Questa affermazione potrà essere confermata con i risultati della prova di impatto.

### 4.3. Risultati prova di impatto

I risultati ottenuti presentano una capacità maggiore di assorbire energia e delle forze di picco più alte da parte della schiuma D. Questi dati sono ovviamente influenzato dallo spessore della schiuma. Per considerare le caratteristiche delle due schiume per unità di spessore si può dividere l'energia totale assorbita per lo spessore della schiuma.

Risulta:

$$G=23/15=1,5 \text{ J/mm}$$

$D=92/25=3,7 \text{ J/mm}$

Si può notare che anche per unità di spessore la schiuma D ha una capacità maggiore di assorbire energia. Questo risultato si può attribuire alla dimensione minore delle porosità e dalla loro migliore distribuzione, come precedentemente visto nell'analisi di immagine.

## 4.4. Risultati ottenuti nella creazione della schiuma

La creazione di una schiuma è un processo complicato dove entrano in gioco molti fattori difficili da controllare. Le prime prove sicuramente non hanno dato i risultati sperati, ma hanno permesso di escludere alcuni parametri che hanno un'importanza minore rispetto ad altri.

La prima e la seconda prova sono state fatte cambiando la percentuale di diuro. Una quantità maggiore di schiumante non ha dato miglioramenti, si è deciso quindi che la percentuale di agente schiumante non è un parametro che influenza fortemente la schiumatura. Se le condizioni del fuso al momento della schiumatura non sono ottimali, il diuro non reagisce efficacemente, la sua quantità quindi passa in secondo piano.

Le prove successive sono state fatte cercando di trovare una condizione ottimale per far reagire il diuro.

Un primo accorgimento è stato utilizzare una quantità maggiore di lega, per evitare che appena fuori dal forno il fuso cali di temperatura troppo in fretta.

Un altro problema è stato sicuramente la densità dello schiumante. La densità del fuso è più alta e le pastiglie galleggiano. Se galleggiano, il gas si disperde subito senza passare per la lega fusa, annullando la possibilità di intrappolarlo. Un primo accorgimento è stato avvolgere le pastiglie in un foglio di domopack per farle affondare. Il domopack è alluminio commercialmente puro, la sua densità è maggiore della lega 46100 utilizzata.

Questo accorgimento ha dato un miglioramento parziale, quando il foglio si scioglieva le pastiglie fuoriuscivano e tornavano a galla.

Per velocizzare la reazione del diuro si è provato ad utilizzarlo sotto forma di polvere. La prova 6 è stata di particolare interesse. Il diuro in polvere non ha reagito per niente, ma quando è stata versata sopra la lega fusa si è spalmato tra il crogiolo e la lega. Questo risultato ha fatto capire che la reazione per rilasciare gas richiede più tempo.

Il fornitore delle polveri ha fornito un video che mostra la fase di schiumatura di un precursore, con indicate la temperatura ed il tempo istante per istante. La reazione nel video ci mette circa 4 minuti.

Il video suggerisce di lasciare più tempo allo schiumante per reagire. Contemporaneamente però si deve raffreddare in fretta per non far scappare il gas formato, cosa che va in contrasto con le considerazioni precedenti.

Lo scopo delle ultime prove è stato quello di aumentare la viscosità del fuso, per far sì che il gas faccia più fatica a fuoriuscire grazie ad un drenaggio più lento. Il tempo guadagnato è tutto sfruttabile dal diuro che ha la possibilità di fare una reazione più lunga.

La soluzione più semplice sarebbe stata quella di usare un agente stabilizzante, purtroppo la sua quantità a nostra disposizione era troppo poca. Si è deciso di lavorare in semisolido. La viscosità alta ha dato anche un secondo vantaggio: le pastiglie non tornavano a galla perché contrastate dalle forze viscosive.

Il risultato è ottimo, soprattutto nella prima delle due prove. Considerando che le parti dove non ci sono porosità probabilmente si erano solidificate prima dell'inizio della reazione, la distribuzione delle bolle nelle restanti zone è buona.

Queste prove hanno fatto capire che la viscosità è il parametro fondamentale per una buona schiumatura. Permette di intrappolare il gas e lascia più tempo al diuro per reagire.

# CONCLUSIONI

I risultati ottenuti dallo studio di ognuno dei due pannelli, presentano dei materiali fortemente disomogenei. La risposta del materiale alle sollecitazioni meccaniche può variare di molto spostandosi lungo il pannello.

I due pannelli commerciali che sono stati studiati hanno caratteristiche differenti.

Dal capitolo introduttivo si è visto che avvicinandosi sempre più ad una densità simile a quella del materiale base, le caratteristiche meccaniche si avvicinano anch'esse a quelle del materiale pieno. In questo lavoro invece si è visto che la morfologia e le dimensioni delle porosità possono rendere una schiuma meno densa, più performante.

Le bolle risultano quindi il parametro principale che detta sia le proprietà fisiche della schiuma (densità) che le proprietà meccaniche.

Per applicazioni più spinte quindi, è necessario un processo produttivo che controlli le dimensioni e la forma delle porosità.

Proprio lo studio del processo produttivo è stato la parte finale di questo lavoro.

Il processo produttivo, è fino adesso il principale ostacolo per un impiego maggiore delle schiume di alluminio.

I risultati ottenuti sono stati quasi tutti per esclusione. A differenza di come ci si possa aspettare, la quantità di agente schiumante non dà un gran beneficio alla schiumatura. Risulta infatti difficile far reagire tutto lo schiumante utilizzato, soprattutto con quantità elevate.

In questo lavoro si è lavorato con una quantità del 5%. Già con questa percentuale si è raggiunto un risultato accettabile, con un numero di prove limitato e non studiando al meglio le variabili in gioco.

Come variabile fondamentale è stata individuata la viscosità, che dà diversi vantaggi. Il gas creato dallo schiumante trova più difficoltà a muoversi in una lega più viscosa. Intrappolare il gas quindi risulta più facile e non richiede di dover raffreddare velocemente il fuso. Con un bagno più stabile si può lasciare più tempo al diuro per reagire, con perdite inferiori di gas.

La viscosità inoltre contrasta la spinta di Archimede che fa risalire le pastiglie.

Per migliorare un processo produttivo per la creazione di una schiuma di alluminio, è bene concentrarsi nello studio delle condizioni ideali per far reagire lo schiumante piuttosto che la sua quantità.

Il metodo utilizzando la fase semisolida ha mostrato delle potenzialità. Aumenta la viscosità senza dover utilizzare del composto stabilizzante che essendo un ceramico rende la schiuma più fragile diminuendo la sua capacità di assorbire energia. L'unica controindicazione di questo metodo è la rapida solidificazione di alcune zone. Queste zone non risultano schiumare.

In conclusione, il metodo in fase semisolida per la creazione di una schiuma di alluminio, è un metodo semplice ed economico, che non richiede particolari attrezzature. E' adatto soprattutto alla creazione di schiume che non devono sopportare elevate sollecitazioni meccaniche, oppure in casi dove non si ha a disposizione agente stabilizzante.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Materials Science and Engineering A 572 (2013) 75-82, “Nano-deposition on 3-D open-cell aluminum foam materials for improved energy absorption capacity” ,Wei Wanga,Rigoberto Burguen˜o,Jung-Wuk Hong,Ilsoon Leea.
- [2] Materials and Design 42 (2012) 8–12,”Closed-cell Al alloy composite foams: Production and characterization”,Malekjafarian, S.K. Sadrnezhad.
- [3] Frattura ed Integrità Strutturale, 17 (2011) 32-41; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.17.04,”Computed Tomography analysis of damage in composites subjected to impact loading”, V.Crupi, G. Epasto, E. Guglielmino.
- [4] Materials Science & Engineering A 556 (2012) 678–684, “Nondestructive observation of pore structure deformation behavior of functionally graded aluminum foam by X-ray computed tomography”, Yoshihiko Hangai, Kazuya Takahashi, Ryo Yamaguchi, Takao Utsunomiya, Soichiro Kitaharac ,Osamu Kuwazurud, Nobuhiro Yoshikawa.
- [5] La metallurgia italiana p.41-47 G. Costanza, R. Montanari, M. E. Tata, “Ottimizzazione del contenuto di TiH<sub>2</sub> e SiC nelle schiume di Al”.
- [6] Materials Science & Engineering A 556 (2012) 400–407, “Property variations in large AlSi7 alloy foam ingots”, Francesca Campana, Luca Cortese, Daniela Pilone.
- [7] Legnopan S.P.A ([www.legnopan.com](http://www.legnopan.com)), novembre 2014.