

# **MODELLAZIONE NUMERICA DEL COMPORTAMENTO DI RETICOLI PRODOTTI MEDIANTE MANIFATTURA ADDITIVA**

NEL PRESENTE LAVORO È STATO STUDIATO IL COMPORTAMENTO DI UNA STRUTTURA RETICOLARE IN AL A357 PRODOTTA MEDIANTE PROCESSO SLM (SELECTIVE LASER MELTING). IL MODELLO DI CALCOLO SI BASA SU PLASTICITÀ INCREMENTALE IN COMBINAZIONE AL CONCETTO DI INCRUDIMENTO ISOTROPICO E DANNEGGIAMENTO DUTTILE. A VALLE DI UN PROCESSO DI CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI DANNEGGIAMENTO, SONO STATE CONDOTTE SIMULAZIONI FEM I CUI RISULTATI SONO STATI SUCCESSIVAMENTE CONFRONTATI CON QUELLI SPERIMENTALI. IL CONFRONTO HA MOSTRATO COME LA METODOLOGIA PERMETTA, SEPPUR CON ALCUNI LIMITI, DI PREVEDERE IN MODO ACCURATO IL COMPORTAMENTO DELLA STRUTTURA.

## **Introduzione**

La manifattura additiva ha scritto nuovi paradigmi nel mondo manifatturiero. Essa permette di realizzare componenti altrimenti non producibili come strutture reticolari su scala mini e micro e strutture lattice. Tali soluzioni possono essere impiegate, ad esempio, per l'alleggerimento di sistemi complessi garantendo importanti aumenti prestazionali o riduzione dei costi.

Tra le molte tecnologie, per presente studio si è selezionata la SLM (a disposizione presso il Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano).

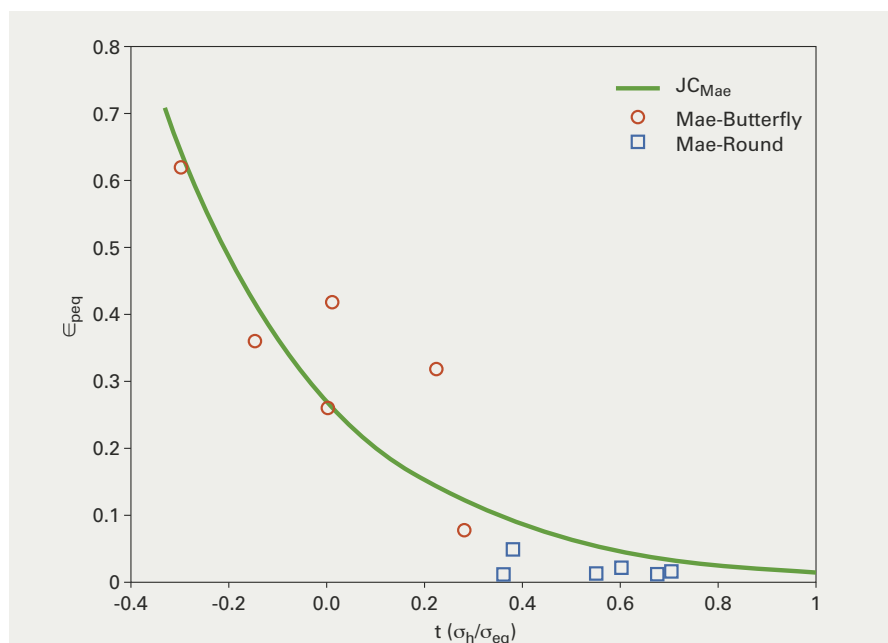
Queste nuove possibilità hanno posto nuove sfide ai progettisti. La modellazione di strutture reticolari o lattice, infatti, può avvenire a differenti scale con accuratezze in termini di risultati e campo di applicabilità. Una struttura reticolare, ad esempio, può essere simulata mediante elementi finiti "beam", come mostrato da Savio et al. Un'altra strategia che introduce forti semplificazioni è quella che prevede di modellare numericamente una cellula elementare del reticolo adottando un "materiale equivalente" le cui proprietà meccaniche non hanno un vero significato fisico ma permetto-

no di modellare, sempre in campo elastico, la risposta della struttura alleggerendo significativamente la parte di modellazione (Hadi et al).

Oltre lo snervamento, il modello con "materiale equivalente" non è più in grado di prevedere in modo corretto la risposta della struttura. L'approccio basato su "beam" è invece applicabile, a patto di conoscere la legge costitutiva del materiale oltre il campo elastico. Essa mostra problemi solo quanto il modello reale, comincia a collassare e nascono contatti tra le aste, cosa che non può essere modellata numericamente utilizzando elementi beam.

Per superare questa limitazione, si è adottato un approccio di tipo "full-3D" per cui ogni asta del reticolo è stata modellata con elementi solidi, un modello di contatto, considerando il legame costitutivo del materiale oltre l'elasticità ed introducendo un opportuno modello di danneggiamento duttile (Gilioli et al.) che permettesse di andare a "rompere" gli elementi della mesh qualora la deformazione plastica raggiungesse il valore critico (modello di Johnson-Cook). Come si mostrerà nel seguito, questo tipo di modellazione è molto accurato ma comporta tempi di calcolo significativi.

Figura 1 - fracture locus secondo Mae et al.



## Materiali e metodi

### Materiale

Il materiale studiato è una lega di Al A357. Esso ha ottime proprietà a fatica e resistenza alla corrosione (Es-Said et al). Convenzionalmente viene prodotto per colata e trattato T6, ovvero con un riscaldamento a 530-540°C per 1-12h seguito da una tempra in aria ed un invecchiamento artificiale a 150-225°C di 3-6h (Saboori et al).

I dati necessari per la modellazione sono il legame costitutivo ed il fracture locus. Il primo è un elemento fondamentale per la modellazione del comportamento plastico e può essere ricavato combinando misure sperimentali su un pro-

vino (curve F- $\Delta L$ ) con una procedura iterativa FEM. In presenza di strizione, infatti, non risulta immediato il passaggio dalle forze misurate allo sforzo in quanto non è nota l'area della sezione critica. Questa però può essere ricavata per via iterativa andando a simulare numericamente la prova di trazione utilizzando la curva sforzo-deformazione calcolata con l'area nominale e confrontando i valori di forza e spostamento predetti numericamente con quelli misurati. A questo punto, modificando iterativamente il legame costitutivo alla luce dell'area (nella sezione critica) predetta numericamente finché le curve F- $\Delta L$  numerica e sperimentale non risultano sovrapposte.

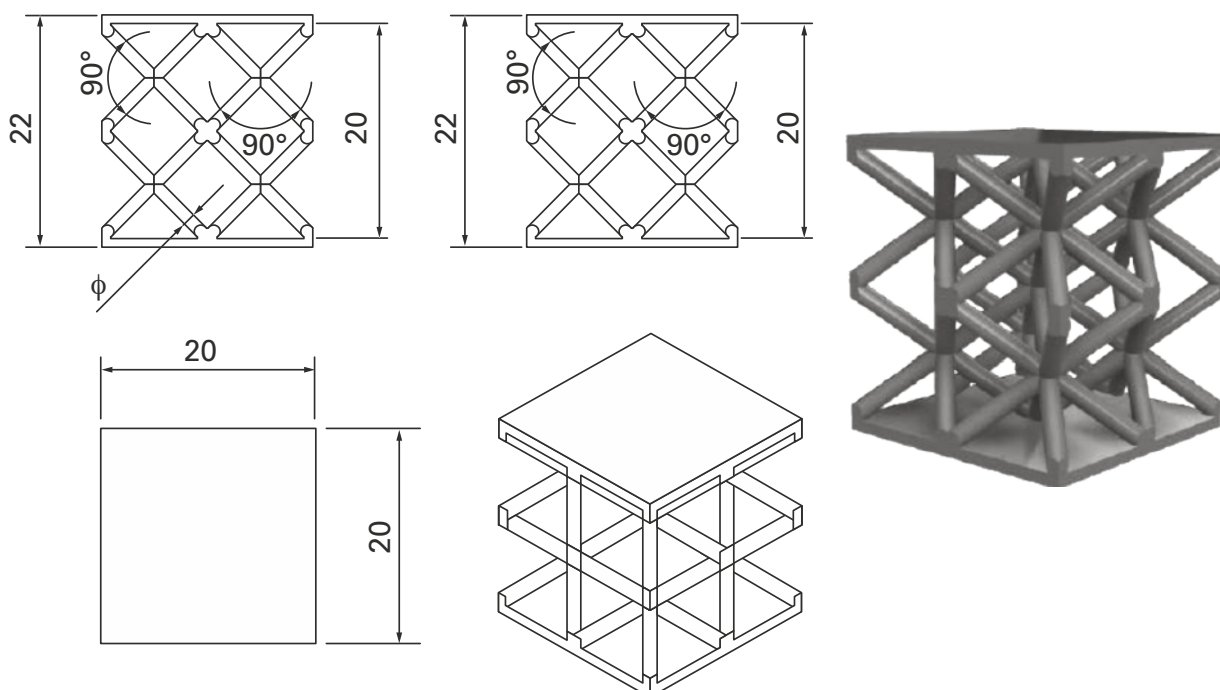


Figura 2 - geometria del reticolo analizzato

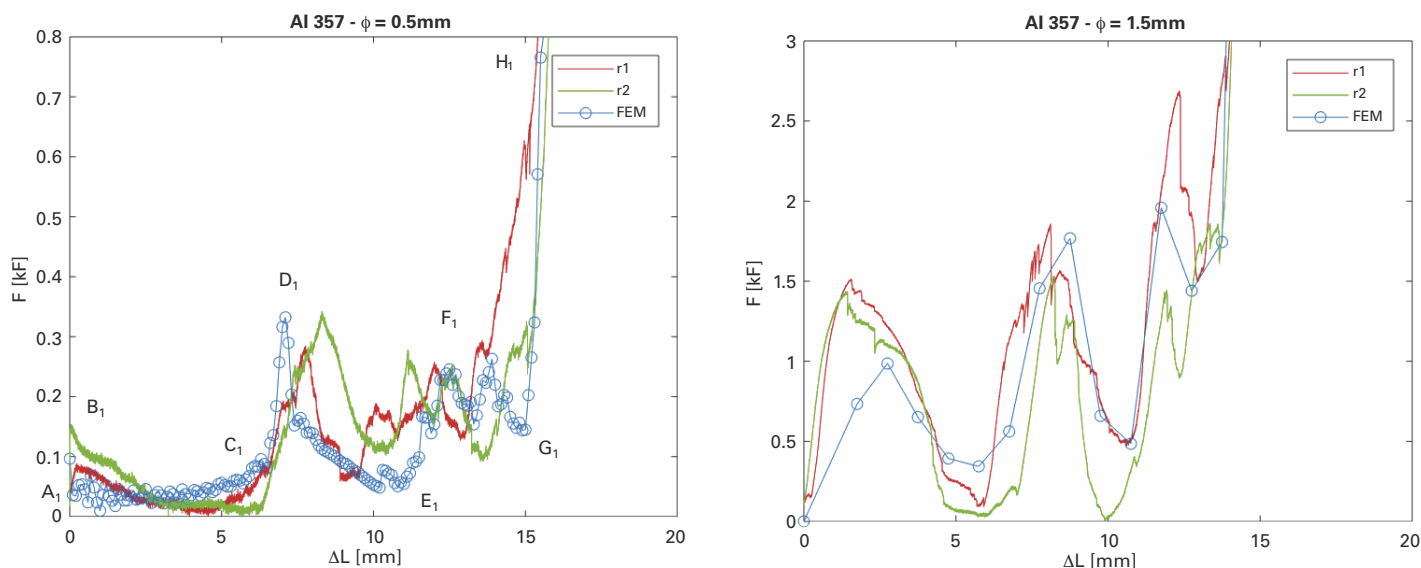


Figura 3 – confronto numerico sperimentale per le due geometrie considerate

Questo permette di modellare il comportamento plastico del materiale ma non permette ancora di prevedere le rotture. A questo scopo serve introdurre il modello di danneggiamento. Nel caso specifico è stato utilizzato un modello di danneggiamento secondo Johnson-Cook. Questo altro non è che l'insieme dei punti deformazione plastica equivalente ( $\epsilon_{peq}$ ) e triassialità ( $t$ ) che, sperimentalmente, si è visto porti al cedimento il materiale.

Tali dati, per il materiale in esame, sono stati presi da letteratura (Mae et al) come mostrato in figura 1a.

### Strutture reticolari Kagome

Le strutture reticolari sono state stampate mediante il supporto del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano utilizzando una macchina Renishaw AM250. Figura 2 mostra la geometria del reticolo. Ne sono state stampate due versioni, che si differenziava per il diametro delle aste, 0,5 e 1,5 mm rispettivamente.

### Test sperimentali – compressione

Entrambe le strutture sono state schiacciate utilizzando una macchina MTS Criterion 45 a disposizione presso la Facoltà di Scienze e Tecnologie della Libera Università di Bolzano/Bozen. I reticoli sono stati posizionati tra due piattelli e le prove condotte in controllo di spostamento (1 mm/s). Per ogni tipologia di reticolo sono state effettuate due ripetizioni.

### Simulazioni numeriche

Le analisi numeriche sono state condotte sfruttando la simmetria del modello. Ogni quarto di cella elementare del reticolo è stato discretizzato utilizzando circa 100000 elementi strutturati. Le simulazioni sono state condotte utilizzando un solutore dinamico. Come modello di danneggiamento è stato utilizzato, come precedentemente accennato, il modello di Johnson-Cook nella forma

$$\epsilon_{peq} = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \cdot t)] [1 + D_4 \exp(\epsilon_p^*)] [1 + D_5 \exp(T^*)]$$

Per questa fase si è assunto che il fracture locus fosse indipendente dalla temperatura e dalla velocità di deformazione, per cui, tarandolo sui dati di Mae et al, le costanti sono risultate

$$D_1 = 0, D_2 = 0.27, D_3 = -2.90, D_4 = 0 \text{ e } D_5 = 0$$

### Risultati

Figura 3 mostra i risultati relativi alle due geometrie. Le linee continue rappresentano le due ripetizioni sperimentali mentre la linea blu i risultati delle simulazioni.

Si nota una forte dispersione delle misure legata alla nota bassa qualità del reticolo as-build. Questo effetto risulta particolarmente significativo sulla struttura avente diametro minore.

Osservando nel dettaglio (figura 4 e 5) le fasi del collasso, si nota come le due strutture abbiano modalità di cedimento differenti.

Il reticolo con diametro minore mostra una prima fase ( $A_1$ - $B_1$ ) puramente elastica oltre cui le aste della fila intermedia della struttura cedono per instabilità. Questo porta ad una repentina diminuzione della rigidità del reticolo. Il valore minimo lo si ha in  $C_1$  dove si ha un cedimento plastico delle cerniere. Questa fase ( $C_1$ - $D_1$ ) produce un aumento della rigidità dovuta all'incrudimento. Lo stesso avviene poi per le altre file di aste. In  $F_1$  si ha un secondo cedimento per instabilità seguito da una fase plastica ( $F_1$ - $G_1$ ). In  $G_1$ , le cerniere di connessione delle aste con le piastre sono completamente deformate ma comunque attaccate. Da  $G_1$  a  $H_1$ , l'aumento repentino della forza è dovuto al completo impaccamento della struttura.

Il reticolo avente diametro delle aste maggiore si comporta in modo differente in quanto l'instabilità gioca un ruolo mi-

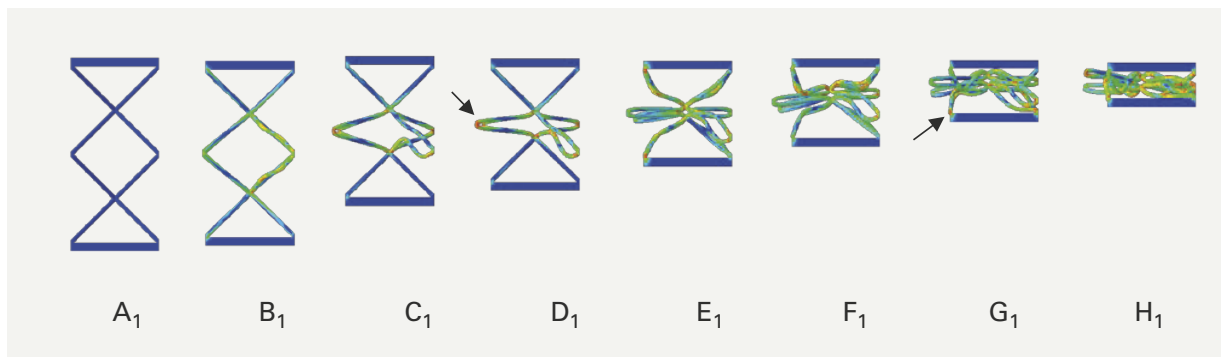


Figura 4 – danneggiamento progressivo della struttura avente diametro 0.5 mm

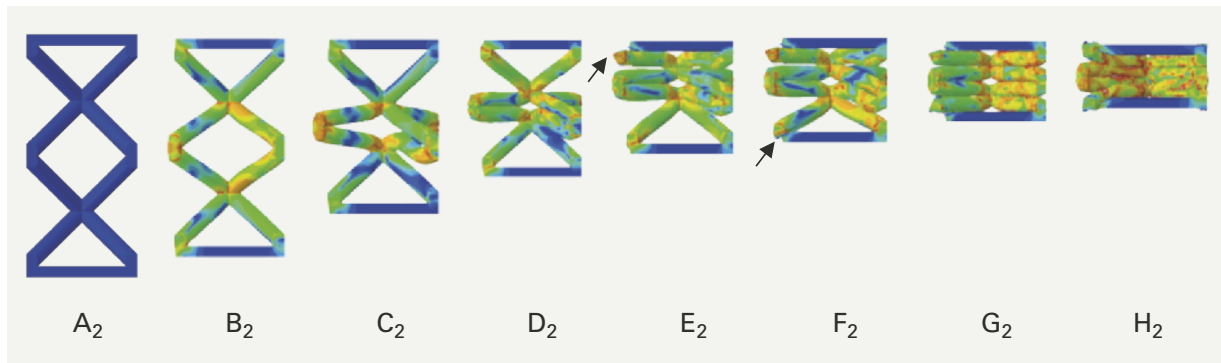


Figura 5 – danneggiamento progressivo della struttura avente diametro 1.5 mm

nore. La fase elastica ( $A_2$ - $B_2$ ) è molto più estesa. L'instabilità di manifesta solamente dopo uno schiacciamento pari a 2 mm (solo 0.1 mm per la struttura più snella). Il secondo picco, corrispondente alla fine della fase elastica delle aste della fila centrale mostra, come atteso, un valore molto maggiore rispetto a quello misurato per la struttura più snella. Il cedimento proprio della fila centrale è dovuto alla differente rigidità delle varie file (cella full Kagome vs. mezza cella Kagome). Oltre  $D_2$ , la diminuzione della forza non è legata a fenomeni di instabilità ma alla completa rottura delle cerniere (fila centrale). Lo stesso accade in  $F_2$  per le connessioni aste-piastra. Da  $G_2$  ad  $H_2$  l'aumento repentino della rigidità è dovuto all'impaccamento complete della struttura.

### Performance numeriche

Le simulazioni, condotte su una macchina da 76.8 GFLOPS hanno impiegato circa 30h l'una.

### Conclusioni

È stata condotta una vasta campagna sperimentale per la caratterizzazione di strutture reticolari in Al.

Oltre ai test sperimentali sono state condotte simulazioni agli elementi finiti modellando la geometria con elementi full-3D, attivando modelli di contatto, plasticità e danneggiamento duttile. I dati per quest'ultimo sono stati presi da letteratura mentre il legame costitutivo ricavato con prove ad hoc.

Il confronto numerico sperimentale, mostra risultati più che soddisfacenti anche se l'onere computazionale è ancora significativo.

### Bibliografia

- Es-Said, O S, D Lee, W D Pfof, D L Thompson, M Patterson, J Foyos, and R Marloth. 2002. "Alternative Heat Treatments for A357-T6 Aluminum Alloy." *Engineering Failure Analysis* 9 (1): 99–107. [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(00\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(00)00034-0).
- Gilioli, A, A Manes, M Giglio, and T Wierzbicki. 2015. "Predicting Ballistic Impact Failure of Aluminium 6061-T6 with the Rate-Independent Bao-Wierzbicki Fracture Model." *International Journal of Impact Engineering* 76: 207–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.10.004>.
- Johnson, G R, and W H Cook. 1983. "A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures." *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures*, 541–47.
- Mae, H, X Teng, Y Bai, and T Wierzbicki. 2007. "Calibration of Ductile Fracture Properties of a Cast Aluminum Alloy." *Materials Science and Engineering: A* 459 (1): 156–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.01.047>.
- Saboori, A, M Pavese, C Badini, and A R Eivani. 2017. "Studying the Age Hardening Kinetics of A357 Aluminum Alloys through the Johnson–Mehl–Avrami Theory." *Metal Powder Report* 72 (6): 420–24. <https://doi.org/10.1016/j.mprp.2016.08.006>.
- Savio Gianpaolo, Gaggi Flavio, Meneghello Roberto, Concheri Gianmaria. 2015. "Design Method and Taxonomy of Optimized Regular Cellular Structures for Additive Manufacturing Technologies." In ICED.
- Concli F., Gilioli A., 2018. "Numerical and experimental assessment of the static behavior of 3d printed reticular Al structures produced by Selective Laser Melting: progressive damage and failure. *Structural Integrity Procedia*, 00: 000–000.