

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica A.A. 2022/2023 Sessione di Laurea Aprile 2023

Studio numerico e validazione sperimentale di strutture lattice sottoposte ad impatto per la progettazione di crash box

Relatore:

Prof. Davide Salvatore Paolino

Co-relatori:

Prof. Andrea Tridello Prof. Carlo Boursier Niutta Candidato:

Alessandro De Michele

Abstract

Negli ultimi anni l'avvento dell'additive manufacturing ha permesso la realizzazione di geometrie complesse, come le strutture lattice. Esse si sono rivelate molto interessanti dal punto di vista delle proprietà meccaniche, in particolare in termini di energia assorbita specifica.

L'oggetto della tesi è la modellazione numerica di prove di compressione quasi-statica e di impatto di strutture lattice in lega d'alluminio AlSi10Mg. A tal fine sono stati realizzati dei modelli FE dei provini tramite il software LS-Dyna, utilizzando elementi beam monodimensionali. Tramite scansioni alla Micro Computed Tomography è stata evidenziata un'elevata presenza di difetti all'interno dei provini, da imputare al processo di fabbricazione additiva, che influiscono notevolmente sulle proprietà di assorbimento delle strutture. La difettosità, definita in termini di numerosità e dimensione del difetto, dei provini in struttura lattice è stata considerata nel modello FE variando opportunamente il diametro delle beam monodimensionali. È stato, quindi, creato uno script MATLAB per l'inserimento dei difetti all'interno del modello, disponendoli di volta in volta in maniera casuale. Ciò ha permesso di ottenere ottimi risultati, con curve numeriche forzaspostamento che replicano correttamente quelle ricavate dai test in laboratorio, sia in campo statico che dinamico. In questo modo è stato possibile validare il modello agli elementi finiti con l'obiettivo di utilizzarlo per la progettazione di una crash box per autoveicoli.

Indice

Abstractii
Indiceiii
Elenco delle figureiv
Elenco delle tabellevi
1 Introduzione1
1.1 Strutture lattice
1.2 Stato dell'arte
1.3 Obiettivi del presente lavoro di tesi
2 Materiali
2.1 Caratteristiche del materiale
2.2 Geometria del provino
3 Metodi
3.1 Metodologia
3.2 Prove sperimentali
3.2.1 Test di compressione quasi-statica
3.2.2 Test d'impatto14
3.3 Scansioni tomografiche17
3.4 Modello FE
3.5 Inserimento dei difetti nel modello FE
3.5.1 Verifica preliminare
3.5.2 Script MATLAB27
4 Risultati
4.1 Test di compressione quasi-statica del modello senza difetti
4.2 Test di compressione quasi-statica del modello con difetti
4.3 Test di impatto del provino con difetti
4.4 Curve di progettazione
Conclusioni
Appendice
Bibliografia

Elenco delle figure

Figura 1.1. Particolare di traversa anteriore e crash box di un autoveicolo	1
Figura 1.2. Esempi di configurazioni di celle unitarie per strutture lattice	2
Figura 2.1. Curva sforzo-deformazione plastica della lega d'alluminio AlSi10Mg	6
Figura 2.2. Provino di struttura lattice realizzato in lega d'alluminio AlSi10Mg	7
Figura 2.3. Immagini della faccia superiore del provino restituite dal microscopi	0
elettronico a scansione	7
Figura 2.4. Immagini della faccia laterale del provino restituite dal microscopio elettronic	0
a scansione	8
Figura 3.1. Flowchart del processo seguito1	1
Figura 3.2. Curve forza-spostamento relative a due prove quasi-statiche1	2
Figura 3.3. Curve forza-spostamento tagliate relative a due prove quasi-statiche1	3
Figura 3.4. Rottura a 45° dei provini al termine dei test	4
Figura 3.5. Macchinario CEAST 9350 per test d'impatto14	4
Figura 3.6. Curve forza-spostamento relative a quattro test d'impatto 1	6
Figura 3.7. Confronto tra curve forza-spostamento ottenute dalle prove quasi-statiche	e
curve forza-spostamento ricavate dai test d'impatto1	6
Figura 3.8. Schema del processo di scansione tomografica1	8
Figura 3.9. Ricostruzione tridimensionale di un provino sulla base della scala dei grigi 1	9
Figura 3.10. Vista sul piano XZ di una scansione1	9
Figura 3.11. Vista sul piano YZ di una scansione2	0
Figura 3.12. Vista sul piano XY di una scansione	0
Figura 3.13. Geometria del modello numerico del provino2	2
Figura 3.14. Geometria del modello numerico del provino con i due rigidwall2	2
Figura 3.15. Modello semplice di trave incastrata con intaglio con: d/D=0.5 e L=2 mm	n
(sx); d/D=0.875 e L=2 mm (centro); d/D=0.5 e L=0.5 mm (dx)2	5
Figura 3.16. Mappa delle tensioni assiali nella trave con intaglio con d/D=0.5 e L=1.6 mr	n
	5
Figura 3.17. Andamento della tensione massima in funzione del rapporto tra diametri d/I)
	6
Figura 3.18. Andamento della tensione massima in funzione della lunghezza d'intaglio L2	7
Figura 3.19. Istogramma per il calcolo della probabilità2	8
Figura 3.20. Estratto del file dei nodi tratto dal modello FE di partenza2	8
Figura 3.21. Grafico a barre per il calcolo del numero di nodi per ogni intervallo di	li
diametri del difetto2	9
Figura 3.22. Estratto del file degli elementi tratto dal modello FE di partenza 34	0
Figura 3.23. Estratto del file degli elementi aggiornato	1
Figura 3.24. Estratto del file delle section beam aggiornato	1
Figura 3.25. Estratto del file delle parti aggiornato3	1
Figura 3.26. Provino con difetti ottenuto in LS-Dyna	2
Figura 4.1. Provino reale dopo la rottura	3
Figura 4.2.Deformata del modello numerico dopo la rottura con fail=0.18786634	4
Figura 4.3. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove quasi	i-
statiche con fail=0.187866	5

Figura 4.4. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove quasi-
statiche nel caso di modello di provino con difetti
Figura 4.5. Confronto tra curve sperimentali e curve numeriche relativo alle prove quasi-
statiche con cinque differenti disposizioni dei difetti
Figura 4.6. Confronto tra curve sperimentali e banda di curve numeriche relativo alle prove
quasi-statiche
Figura 4.7. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove d'impatto
1 e 2 nel caso di modello di provino con difetti
Figura 4.8. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove d'impatto
3 e 4 nel caso di modello di provino con difetti
Figura 4.9. Confronto tra curve sperimentali e curve numeriche relativo alle prove
d'impatto 1 e 2 con cinque differenti disposizioni dei difetti
Figura 4.10. Confronto tra curve sperimentali e curve numeriche relativo alle prove
d'impatto 3 e 4 con cinque differenti disposizioni dei difetti41
Figura 4.11. Confronto tra curve sperimentali e banda di curve numeriche relativo alle
prove d'impatto 1 e 241
Figura 4.12. Confronto tra curve sperimentali e banda di curve numeriche relativo alle
prove d'impatto 3 e 442
Figura 4.13. Confronto tra curve sperimentali, banda di curve numeriche e curva di
progettazione relativo alle prove quasi-statiche
Figura 4.14. Confronto tra curve sperimentali, banda di curve numeriche e curva di
progettazione relativo alle prove d'impatto 1 e 244
Figura 4.15. Confronto tra curve sperimentali, banda di curve numeriche e curva di
progettazione relativo alle prove d'impatto 3 e 444

Elenco delle tabelle

Tabella 2.1. Proprietà meccaniche della lega d'alluminio AlSi10Mg	5
Tabella 3.1. Parametri di scansione	
Tabella 3.2. Estratto dei dati sui difetti restituiti dal software per le scans	sioni alla Micro
Computed Tomography	

1 Introduzione

Gli assorbitori di energia sono dispositivi di sicurezza passivi introdotti negli autoveicoli per la salvaguardia delle persone a bordo. Durante un impatto, infatti, è presente un'elevata quantità di energia di deformazione che, in assenza di crash box, comporterebbe un serio pericolo per i passeggeri all'interno dell'abitacolo. Lo scopo di questi dispositivi è l'assorbimento del quantitativo più alto possibile di energia in caso di urto. Per assolvere a questo compito, però, essi sono stati inizialmente progettati con masse molto elevate che implicavano un aumento dei consumi ed una riduzione delle prestazioni dei veicoli. Per questo motivo, l'obiettivo, ad oggi, è la riduzione del peso totale delle crash box.



Figura 1.1. Particolare di traversa anteriore e crash box di un autoveicolo

1.1 Strutture lattice

Le strutture reticolari hanno suscitato grande interesse negli ultimi anni grazie alle importanti proprietà meccaniche che presentano. In particolare, dopo averne osservato l'elevata capacità di assorbimento di energia in rapporto alla massa totale, si è pensato di utilizzarle per la progettazione di crash box per autoveicoli.

Con l'avvento dell'additive manufacturing, infatti, è stato possibile ottenere geometrie complesse con il grande vantaggio di poter ridurre notevolmente il peso rispetto alle tecnologie di fabbricazione tradizionali. Le strutture lattice ne sono un esempio. Esse sono realizzate mediante stampanti 3D, partendo dal modello del componente in formato STL

che consente di approssimare le superfici tramite una serie di triangoli. Si procede con l'impostazione dei parametri di processo e poi alla fase di suddivisione in strati della parte. Il processo reale, infatti, prevede una stampa stratificata del componente. Esistono diverse tecniche di addizione di materiale, divise per tipologie di materia prima impiegata. Per le parti in metallo, una delle tecniche più utilizzate è la Selective Laser Melting (SLM). Essa si basa sulla fusione di polveri metalliche tramite un laser ad alta potenza. La deposizione di questo materiale in ogni strato comporta, purtroppo, la presenza di molti difetti. Nello specifico, spesso si possono osservare diversi vuoti di dimensioni più o meno elevate che provocano delle intensificazioni di tensione e rendono le strutture meno resistenti.

Per quanto riguarda la geometria, le strutture lattice sono costituite da una o più celle unitarie, composte a loro volta da più elementi connessi tra loro e disposti in maniera diversa a seconda della configurazione della cella. Alcune tipologie di celle unitarie sono riportate in Figura 1.2. Ognuna di esse viene scelta di volta in volta in base alle proprietà meccaniche che presenta ed alle esigenze delle diverse applicazioni. Le strutture lattice, infatti, si dividono principalmente in due categorie: le "bending-dominated" che risultano più flessibili e le "stretch-dominated" che sono, in generale, più resistenti [1].



Figura 1.2. Esempi di configurazioni di celle unitarie per strutture lattice

Le celle possono essere dislocate in maniera casuale nello spazio oppure possono ripetersi con una certa periodicità. Quest'ultimo caso è quello delle strutture trattate in questa tesi, le cosiddette "strutture ordinate". Oltre che dalla configurazione della cella, le strutture reticolari sono caratterizzate dalle dimensioni degli elementi beam e dal numero di celle unitarie presenti.

Una delle problematiche principali delle strutture lattice fabbricate tramite additive manufacturing è la presenza di difettosità che rende molto complicata la previsione numerica del comportamento statico e dinamico. I difetti, infatti, sono molto numerosi e di dimensioni variabili. Inoltre, le loro disposizioni all'interno dei provini sono del tutto casuali. Questo inconveniente, insieme alla complessità della geometria, rende molto difficile la progettazione di componenti con questo tipo di struttura.

1.2 Stato dell'arte

Nello studio *Experimental and Numerical Investigation of a Lattice Structure for Energy Absorption: Application to the Design of an Automotive Crash Absorber* [2] è stato dimostrato che l'energia assorbita per unità di massa (SEA, Specific Energy Absorption) non dipende dal numero di celle unitarie. Questo risultato è di fondamentale importanza per l'analisi degli assorbitori di energia in struttura lattice, poiché ha permesso di affermare che è sufficiente studiare un provino di piccole dimensioni per caratterizzare le proprietà di un intero componente.

Yu et al. [3] hanno evidenziato la presenza di almeno quattro diverse possibili modalità di cedimento di strutture in lega d'alluminio AlSi10Mg. In base alla configurazione della cella unitaria sono state osservate relazioni differenti tra la tensione di snervamento e la densità, le quali indicano la grande variabilità delle proprietà meccaniche e l'elevata sensibilità ai diversi parametri.

È stata individuata la tipologia di cella unitaria più adatta alla progettazione di crash box per autoveicoli [4]. Sono stati effettuati test di compressione con provini costituiti da celle con diverse configurazioni. Andando a confrontare i valori di SEA e forza massima raggiunta, è stata scelta la cella denominata *octet* (la terza in Figura 1.2), appartenente alla categoria delle strutture "stretch-dominated" e che consente di ottenere il miglior compromesso tra energia assorbita e massa totale.

Magarò et al. [5] hanno dimostrato che è necessario modellare la geometria del provino in struttura reticolare considerando anche la presenza dei vuoti per poter ottenere una risposta numerica che riproduce con precisione il comportamento sperimentale. Per valutare la difettosità hanno effettuato scansioni tomografiche ed hanno utilizzato elementi tridimensionali, con costi computazionali abbastanza elevati. L'accuratezza del modello a livello locale è stata verificata confrontando la deformazione di un nodo specifico con quella misurata sperimentalmente.

Anche lo studio *Strain concentrations in BCC micro lattices obtained by AM* [6] ha affrontato il problema dei difetti derivanti dal processo di additive manufacturing. Sono state analizzate sperimentalmente le concentrazioni di deformazione e si è concluso che un modello basato su una geometria ideale non permette di ricavare informazioni veritiere sulla resistenza statica e a fatica delle strutture.

Smith et al. [7] hanno confrontato due modelli numerici differenti di strutture lattice: uno con elementi 3D ed uno con elementi beam monodimensionali. Hanno asserito che la

risposta quasi-statica ottenuta riproduce con buona precisione i risultati sperimentali con entrambi i modelli, anche in termini di energia assorbita, tensione di snervamento e rigidezza iniziale. Dall'analisi si evince che, con un numero di elementi molto elevato, la modellazione numerica diventa proibitiva a causa degli elevati tempi di calcolo. Questo problema viene amplificato nel caso relativo al modello con elementi tridimensionali. Negli ultimi tempi sono stati presentati diversi articoli sulle strutture lattice e sui vantaggi e gli inconvenienti del loro utilizzo in diverse applicazioni. I limiti principali riguardano la difficoltà di prevedere il comportamento dei provini in campo statico e dinamico. L'obiettivo del presente studio è, quindi, fornire dei risultati utili alla semplificazione della fase di progettazione delle strutture reticolari.

1.3 Obiettivi del presente lavoro di tesi

In questa tesi, nello specifico, viene affrontato il problema della progettazione di strutture reticolari per l'assorbimento di energia d'impatto. Sono stati creati dei modelli agli elementi finiti per replicare il comportamento sperimentale di provini in struttura lattice, considerando anche la presenza di difetti osservati con scansioni alla Micro Computed Tomography. L'utilizzo di elementi beam 1D ha permesso di ottenere risultati soddisfacenti con costi computazionali contenuti. In questo modo, è stato possibile riprodurre con buona precisione la risposta statica e dinamica dei provini.

Nel capitolo successivo sarà dettagliata la tipologia di materiale impiegato e la configurazione dei provini studiati. Nel terzo capitolo, invece, sarà illustrata la metodologia e saranno riportati i risultati delle prove sperimentali eseguite. Inoltre, saranno descritte le scansioni tomografiche effettuate e sarà presentato il modello FE con relativa procedura per l'inserimento dei difetti. Nel quarto capitolo, infine, saranno esposti i risultati numerici e saranno tratte le conclusioni dello studio.

2 Materiali

In questo capitolo sarà presentato innanzitutto il materiale utilizzato e le sue proprietà meccaniche. Successivamente si descriverà la geometria scelta per realizzare i campioni analizzati.

2.1 Caratteristiche del materiale

I test sperimentali sono stati effettuati su provini prodotti in lega d'alluminio AlSi10Mg mediante additive manufacturing con tecnologia SLM. Si tratta di un materiale ampiamente utilizzato in diversi settori, grazie alla sua bassa densità, ad un'elevata resistenza alla corrosione e ad un'alta conducibilità termica. In particolare, esso presenta un'elevata durezza ed ottime proprietà in termini di resistenza statica e dinamica in rapporto alla massa. Per questo motivo, questa lega d'alluminio viene impiegata anche per componenti soggetti a carichi elevati. Inoltre, date le buone caratteristiche di colabilità, questo materiale consente la realizzazione di geometrie complesse come le strutture reticolari.

Le principali proprietà sono riassunte in Tabella 2.1, in cui sono stati inseriti i valori forniti dal produttore dei provini BeamIT.

AlSi10Mg				
Densità ρ	2.9 g/cm^3			
Modulo elastico E	69000 MPa			
Coefficiente di Poisson v	0.33			

Tabella 2.1. Proprietà meccaniche della lega d'alluminio AlSi10Mg

La curva sforzo-deformazione reale del materiale è stata ricavata a partire dalla curva di trazione ingegneristica, tratta a sua volta dallo studio *VHCF response of as-built SLM AlSi10Mg specimens with large loaded volume* [8]. Dopo aver ottenuto la curva di trazione reale, sono stati selezionati i dati relativi al tratto plastico tagliando la parte elastica ed ottenendo la curva sforzo-deformazione plastica del materiale (Figura 2.1), necessaria per l'implementazione del modello agli elementi finiti.



Figura 2.1. Curva sforzo-deformazione plastica della lega d'alluminio AlSi10Mg

2.2 Geometria del provino

La cella unitaria considerata per realizzare i provini è la sopracitata *octet*, che, tra tutte le configurazioni analizzate in studi precedenti [4], consente di disporre di una delle maggiori quantità di energia assorbita specifica e del più elevato valore di forza massima sopportata. Dopo aver individuato la geometria della cella cubica unitaria, si è scelto di assegnarle una dimensione pari a 8.5 mm di lato. Data l'indipendenza dei risultati dal numero di celle [2], per semplicità si è optato per una struttura composta da tre celle per ognuna delle tre direzioni, ottenendo di conseguenza un provino cubico di lato 25.5 mm (Figura 2.2). Questa scelta ha permesso di realizzare una struttura 3D, escludendo a priori eventuali effetti dovuti a differenze di dimensioni nelle diverse direzioni.



Figura 2.2. Provino di struttura lattice realizzato in lega d'alluminio AlSi10Mg

Il valore teorico del diametro delle beam è stato impostato a 1.5 mm nel modello CAD. Una volta realizzati i campioni, però, si è deciso di effettuare delle valutazioni al microscopio elettronico a scansione sulla faccia superiore (Figura 2.3) e su una faccia laterale (Figura 2.4) dei provini.



Figura 2.3. Immagini della faccia superiore del provino restituite dal microscopio elettronico a scansione



Figura 2.4. Immagini della faccia laterale del provino restituite dal microscopio elettronico a scansione

La media delle misurazioni è risultata inferiore al valore teorico e pari a 1.325 mm. In prima battuta, è stato preso questo valore di riferimento come diametro nominale da assegnare alle beam.

3 Metodi

Nei paragrafi seguenti sarà dapprima descritta la metodologia seguita e, successivamente, si esporranno i risultati dei test sperimentali. Saranno anche illustrate le caratteristiche del modello numerico creato e le modalità di inserimento dei difetti del provino.

3.1 Metodologia

La difettosità intrinseca delle strutture lattice rende molto complessa la previsione numerica del loro comportamento e delle modalità di cedimento. Lo studio si complica in campo dinamico, data la natura del materiale che presenta un'elevata sensibilità allo strain rate.

Per affrontare questo problema è stato innanzitutto caratterizzato il comportamento dei provini reali in lega d'alluminio AlSi10Mg tramite test quasi-statici e di impatto, raccogliendo dati relativi alla geometria del provino ed alle curve forza-spostamento.

Successivamente si è deciso di analizzare la difettosità di alcuni campioni mediante scansioni tomografiche, con l'obiettivo di valutare i vuoti in termini di numerosità e grandezza. Non si è tenuto conto della posizione dei difetti specifici all'interno del provino, ma è stata fatta un'analisi di tipo statistico.

Tramite il software LS-Dyna è stato implementato un modello numerico con elementi beam monodimensionali per replicare gli andamenti registrati durante le prove sperimentali. Per introdurre la difettosità sono stati variati opportunamente i diametri ai diversi nodi. I difetti, infatti, sono stati inseriti secondo la numerosità calcolata dalle scansioni e disposti in maniera casuale all'interno della struttura.

In seguito, le simulazioni numeriche sono state ripetute variando di volta in volta la collocazione dei difetti. È stata evidenziata una sensibilità alla posizione dei difetti, in particolar modo nella fase successiva al cedimento.

Con lo scopo di creare una banda che potesse comprendere quasi tutte le possibili curve numeriche, è stata calcolata la media e lo scarto quadratico medio per ogni punto delle diverse curve ottenute.

Come ultimo step, è stato implementato un modello di provino senza difetti in grado di replicare la curva limite inferiore della banda e ricavare, così, la curva di progettazione individuando i parametri adeguati da assegnare al materiale.

Tale procedimento ha consentito di creare un modello FE in grado di tenere in considerazione la variabilità dei risultati dovuti alla difettosità presente nella struttura lattice. Il modello così realizzato può essere utilizzato per la progettazione di strutture reticolari in lega d'alluminio, sia nel caso di compressioni quasi-statiche sia per sollecitazioni dinamiche. Nel 95% dei casi, infatti, la risposta del materiale sarà superiore a quella risultante dal modello. In questo modo si garantisce un livello di confidenza del 95% e, quindi, l'opportuna sicurezza in fase di progettazione. In ultimo, avendo fatto uso di elementi 1D, i costi computazionali per la progettazione di componenti risultano accettabili.

Per schematizzare il processo appena descritto, è stato realizzato un flowchart rappresentato in Figura 3.1.



Figura 3.1. Flowchart del processo seguito

3.2 Prove sperimentali

In questo paragrafo saranno descritte le prove effettuate in laboratorio e saranno riportati i relativi risultati, soffermandosi dapprima sui test di compressione quasi-statica e poi sulle prove d'impatto.

3.2.1 Test di compressione quasi-statica

Dopo aver realizzato diversi provini in lega d'alluminio, sono stati eseguiti inizialmente due test di compressione quasi-statica in laboratorio, facendo uso del macchinario *Zwick-Roell Z100*. I dati relativi alla forza applicata ed allo spostamento sono stati registrati [4] e sono stati poi riportati in un grafico, ottenendo due curve (Figura 3.2).



Figura 3.2. Curve forza-spostamento relative a due prove quasi-statiche

Per entrambe le prove è stata impostata una velocità di avanzamento molto bassa, con un valore pari a 1 mm/min, al fine di evitare di introdurre effetti dovuti alla velocità di deformazione. Il fenomeno dello strain rate, infatti, modifica la risposta del materiale, con un incremento della tensione di snervamento ed un'espansione del tratto di deformazione elastica all'aumentare della velocità di deformazione.

Sono stati stabiliti anche dei valori limite per far terminare i test: una forza massima uguale a 100 kN ed uno spostamento massimo di 15 mm. Per la prima prova è poi stato inserito un limite sul decremento della forza resistente rispetto alla forza massima pari al 70%, mentre per il secondo test questo limite è stato incrementato arrivando al 90%. Nell'ultima porzione di curva relativa alla seconda prova, infatti, si può osservare il fenomeno della densificazione che avviene dopo la rottura. Questo tratto non è rilevante ai fini della validazione sperimentale e per questo motivo si è deciso di tagliare le curve fino ad uno spostamento massimo di 3.8 mm. Le due curve risultanti sono riportate in Figura 3.3.



Figura 3.3. Curve forza-spostamento tagliate relative a due prove quasi-statiche

Dai filmati della prova e dall'osservazione dei provini in lega d'alluminio dopo il cedimento, è stata rilevata una frattura dell'intera struttura sulla diagonale a 45° (Figura 3.4). Ciò è coerente col grafico in Figura 3.2, dove si nota la presenza di un unico picco di forza, oltre il quale avviene la rottura.



Figura 3.4. Rottura a 45° dei provini al termine dei test

3.2.2 Test d'impatto

L'effetto della velocità di deformazione sulla risposta sperimentale della struttura è stato valutato attraverso quattro test in laboratorio [4], utilizzando il macchinario *CEAST 9350*, di cui sono state riportate delle immagini in Figura 3.5.



Figura 3.5. Macchinario CEAST 9350 per test d'impatto

Esso si compone di due elementi principali: una camera chiusa in cui si colloca il campione ed un sistema per la caduta controllata di un impattatore sul provino. Poco sopra l'impattatore è posizionata una cella di carico piezoelettrica per misurare i valori di forza ottenuti durante i test. Al fine di valutare diverse casistiche, si può impostare un diverso valore di velocità per ogni prova ed è possibile aggiungere massa all'impattatore grazie ad un sistema con due guide lineari.

Per i primi due test è stata utilizzata una massa di 26.244 kg ed è stata misurata una velocità 2.912 m/s. Per la terza e la quarta prova, invece, è stata utilizzata una massa di 56.244 kg ed è stata misurata una velocità 2.072 m/s.

La cella di carico ha permesso di disporre dei dati relativi all'andamento della forza nel tempo. Per calcolare lo spostamento è stato necessario risalire al valore di accelerazione mediante l'equazione 3.1:

$$a = g - \frac{F}{M} \tag{3.1}$$

dove *a* rappresenta l'accelerazione dell'impattatore, g è il valore di accelerazione di gravità, F è la forza misurata e M esprime il valore di massa totale impattante.

In seguito, lo spostamento è stato calcolato integrando due volte l'accelerazione nel tempo, ricavando prima la velocità v al momento dell'impatto tramite l'equazione 3.2 e poi lo spostamento *s* dall'equazione 3.3.

.

$$v = v_0 + \int a \, dt \tag{3.2}$$

$$s = \int v \, dt \tag{3.3}$$

Il termine v_0 rappresenta il valore di velocità rilevato nell'istante precedente all'impatto. In questo modo sono state plottate le curve sperimentali illustrate in Figura 3.6.



Figura 3.6. Curve forza-spostamento relative a quattro test d'impatto

Per comprendere l'effetto del fenomeno dello strain rate e le differenze tra le diverse prove, sono state riportate nel grafico in Figura 3.7 tutte le curve forza-spostamento registrate in laboratorio. Le curve tratteggiate fanno riferimento alle prove statiche, mentre quelle continue sono relative ai test d'impatto.



Figura 3.7. Confronto tra curve forza-spostamento ottenute dalle prove quasi-statiche e curve forza-spostamento ricavate dai test d'impatto

Dal confronto si possono notare le differenze in termini di ampiezza del tratto elastico e di forza massima raggiunta, che aumentano in campo dinamico a causa della presenza non trascurabile di una velocità di deformazione plastica. È presente anche una dispersione evidente dei risultati, soprattutto nella parte successiva al primo cedimento delle strutture. Ciò è dovuto alla difettosità del materiale ed alle diverse collocazioni dei difetti critici all'interno dei provini testati.

3.3 Scansioni tomografiche

Il processo di fabbricazione additiva utilizzato per la produzione dei provini con tecnica SLM ha provocato la presenza di una moltitudine di lacune di diverse dimensioni. Questi difetti hanno una notevole incidenza sulle caratteristiche strutturali dei campioni analizzati. La loro valutazione è di fondamentale importanza per implementare un modello che replichi in maniera accurata il comportamento statico e dinamico osservato in laboratorio.

Sono state eseguite le scansioni di tre provini alla Micro Computed Tomography, usufruendo del macchinario presente nei laboratori del Centro di Ricerca "J-Tech" del Politecnico di Torino. La scansione di tre campioni ha consentito di valutare la difettosità come risultato del processo produttivo. Inoltre, scansionando tre provini, è stato possibile ottenere informazioni più consistenti relativamente ai difetti maggiori ed alla numerosità dei difetti stessi. La scansione di un solo provino, infatti, avrebbe limitato la validità dei risultati, specialmente per quanto concerne i vuoti più grandi (valori estremi della popolazione dei difetti). I dettagli dei parametri di scansione sono elencati in Tabella 3.1.

Tensione	170 kV
Intensità di corrente	100 µA
Distanza sorgente - oggetto (SOD)	100 mm
Distanza sorgente - detector (SDD)	1000 mm
Risoluzione teorica	20 µm/pixel
Numero di proiezioni	1600

Tabella 3.1. Parametri di scansione

La risoluzione teorica è stata calcolata tramite l'equazione 3.4:

Risoluzione teorica = pixel pitch
$$\times \frac{SOD}{SDD}$$
 (3. 4)

dove *pixel pitch* rappresenta la grandezza fisica di un pixel del detector ed è pari a 200 μ m. In Figura 3.8 è riprodotto uno schema esplicativo del processo di scansione tomografica, in cui sono rappresentati anche i parametri *SOD* e *SDD*.



Figura 3.8. Schema del processo di scansione tomografica

L'analisi della scansione è stata eseguita tramite il software VGSTUDIO MAX, utilizzando l'algoritmo "General". È stato effettuato un riconoscimento della superficie del provino attraverso la ricostruzione della scala dei grigi. Il programma, infatti, analizza le zone in cui il grigio presenta una tonalità diversa da quella circostante e restituisce la probabilità che la porzione rilevata sia effettivamente un difetto. In questo caso è stato impostato un limite di probabilità minima uguale a 2, in modo da evitare di considerare un numero eccessivo di dati. Inoltre, l'incertezza sarebbe troppo elevata nelle zone con probabilità inferiore a 2 e ciò potrebbe falsare i risultati finali.

Innanzitutto, però, è stato necessario rimuovere tutti i vuoti interni rilevati automaticamente dal software. Nei componenti prodotti tramite additive manufacturing, infatti, sono presenti difetti di dimensioni talmente elevate da indurre il programma a classificare quelle zone come non appartenenti al materiale. In questo modo, durante l'analisi della difettosità, questi macro difetti non verrebbero considerati, alterando sia la dimensione del difetto massimo rilevato che la popolazione dei difetti.

In Figura 3.9 è riprodotta la ricostruzione tridimensionale sulla base della scala dei grigi per una delle scansioni realizzate.



Figura 3.9. Ricostruzione tridimensionale di un provino sulla base della scala dei grigi

A titolo di esempio, si riportano tre viste di una delle scansioni in cui è evidenziato il difetto più grande presente in uno dei tre provini scansionati (Figura 3.10, Figura 3.11 e Figura 3.12).



Figura 3.10. Vista sul piano XZ di una scansione



Figura 3.11. Vista sul piano YZ di una scansione



Figura 3.12. Vista sul piano XY di una scansione

Il software per le scansioni ha restituito una lista di difetti con le relative dimensioni e altre proprietà. Un esempio di una parte dei dati estratti da una delle scansioni è riportato in Tabella 3.2. I valori di probabilità che la zona analizzata sia realmente un difetto sono indicati nella prima colonna.

Tabella 3.2. Estratto dei dati sui difetti restituiti dal software per le scansioni alla Micro Computed Tomography

Probability	Radius [µm]	Diameter [µm]	Equivalent diameter [µm]	Center x [µm]	Center y [µm]	Center z [µm]	Volume [µm³]	Voxel	Surface [µm²]
115.59	163.35	326.7	196.57	773.02	3706.97	387.27	3977072.89	433	307007.67
110.94	180.94	361.89	172.38	819.64	3505.63	-569.35	2682061.87	292	221045.76
109.7	177.56	355.12	206.64	-703.09	3764.42	-9659.34	4620069.64	503	251747.58
91.41	218.39	436.77	226.34	-817.06	3650.36	287.74	6071292.8	661	442092.18
61.28	119.85	239.69	177.72	-740.91	3731.67	8054.84	2939185.83	320	165784.81
56.99	244.94	489.88	251.98	-4031.76	-3137.3	-4826.62	8376711.98	912	594719.71
49.09	129.94	259.89	136.82	494.38	3690.49	546.93	1340996.94	146	121048.59
42.67	158.79	317.58	176.04	3149.36	1550.2	391.47	2856534.44	311	253501.71
39.3	157.07	314.14	178.09	-6.72	-4578.24	-1280.6	2957540.56	322	192099.54
36.16	124.86	249.72	148.85	1994.66	2720.19	383.28	1726798.25	188	154380.59
31.33	129.31	258.62	150.42	1945.19	2769.94	-4214.61	1781870.38	194	152627.23
30.76	94.82	189.64	122.19	-672.88	2235.35	-10965.15	955239.58	104	80699.54
30.25	125.09	250.18	124.12	2504.47	-487.97	-2341.03	1001178.29	109	107891.54
29.68	179.24	358.48	212.37	-5274.7	3727.27	-5275.63	5014997.44	546	277185.56

3.4 Modello FE

Il modello agli elementi finiti è stato implementato tramite il programma LS-Dyna, dopo aver creato la geometria e la mesh mediante Python ed il software Gmsh. Inizialmente sono state indicate le coordinate dei punti e sono stati realizzati i segmenti, per poter costruire la geometria della cella unitaria scelta. In seguito, è stata generata la mesh di dimensioni pari a 1 mm, ottenendo i diversi nodi. Sono stati assegnati elementi beam monodimensionali ed è stata replicata la cella nello spazio per costruire il provino descritto precedentemente. In un primo momento, il valore di diametro delle beam è stato impostato a 1.325 mm. La geometria del provino ottenuto è rappresentata in Figura 3.13.



Figura 3.13. Geometria del modello numerico del provino

In seguito, per simulare la prova di compressione, sono stati creati due rigidwall paralleli: uno inferiore fisso (definito dalla card *RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_DISPLAY*) per replicare il piano d'appoggio ed uno superiore mobile. Essi possono essere visualizzati in Figura 3.14Figura 2.2. Relativamente alla prova quasi-statica, per il rigidwall superiore è stato utilizzato il *RIGIDWALL_GEOMETRIC_FLAT_MOTION_DISPLAY*, a cui è stata attribuita una legge di spostamento lineare. La card *RIGIDWALL_PLANAR_FINITE_MOVING_FORCES*, invece, è stata impiegata per i test d'impatto, specificando la massa e la velocità da assegnare al rigidwall per ogni prova.



Figura 3.14. Geometria del modello numerico del provino con i due rigidwall

definito Il contatto tra gli elementi è stato con la card CONTACT AUTOMATIC GENERAL, in modo da evitare il verificarsi della compenetrazione tra corpi durante la fase di compressione.

Per caratterizzare la lega d'alluminio è stato scelto il *PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY*, che consente di definire un materiale di tipo elasto-plastico. Sono state quindi inserite le principali proprietà, elencate in Tabella 2.1. In seguito, è stata introdotta per punti la curva sforzo-deformazione plastica descritta nel paragrafo 2.1, in modo da assegnarla al materiale.

La material card ha permesso di replicare anche la frattura del materiale, inserendo un criterio di cedimento tramite l'indicazione di una deformazione plastica a rottura (parametro *fail*), che rappresenta il valore oltre il quale l'elemento 1D si rompe.

Esso è stato ottimizzato tramite il confronto tra la curva forza-spostamento ottenuta numericamente e le curve sperimentali, valutando di volta in volta anche l'effetto di questo parametro sul valore di picco massimo. Inoltre, è stata analizzata la deformata del provino numerico per verificare che la modalità di cedimento fosse compatibile con quella osservata in laboratorio.

Si è deciso di valutare anche l'effetto dello strain rate per le prove d'impatto. Per tenerne conto, è stato considerato il modello di Cowper-Symonds, in cui il valore di tensione di snervamento viene modificato secondo la seguente legge:

$$\sigma_{y}\left(\varepsilon_{eff}^{p}, \dot{\varepsilon}_{eff}^{p}\right) = \sigma_{y}^{s}\left(\varepsilon_{eff}^{p}\right) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{eff}^{p}}{c}\right)^{\frac{1}{p}}\right]$$
(3.5)

in cui σ_y^{s} è la tensione di snervamento statica.

È stato necessario, quindi, individuare i parametri C e p opportuni per ottenere gli andamenti corretti anche in campo dinamico.

3.5 Inserimento dei difetti nel modello FE

Dopo aver osservato i risultati delle scansioni alla Micro Computed Tomography. si è deciso di includere l'effetto della presenza dei difetti all'interno del modello numerico. I provini, infatti, presentano numerose irregolarità dovute al processo di stampa, che fanno sì che il diametro degli elementi non sia costante e che differisca da quello nominale. All'interno del campione si possono formare considerevoli variazioni locali di diametro che portano ad intensificazioni delle tensioni e, quindi, a modifiche del comportamento

statico e dinamico della struttura. Questa difettosità, pertanto, potrebbe avere influenza sull'energia assorbita dal provino e, conseguentemente, sui diagrammi forza-spostamento. Per inserire i vuoti nel modello FE si è pensato, quindi, di assegnare ad ogni nodo un diametro pari alla differenza tra il diametro nominale delle beam e la dimensione del difetto.

3.5.1 Verifica preliminare

Al fine di controllare che non ci fossero criticità nella modifica dei diametri ai diversi nodi, è stata effettuata una verifica preliminare sull'indipendenza dei risultati dalla dimensione della mesh e sulla dipendenza dei valori di tensione dal rapporto tra i diametri (come avviene in presenza di un intaglio).

Per fare ciò, è stato creato un semplice modello di trave incastrata ad uno estremo e caricata assialmente all'altro, utilizzando ancora elementi beam monodimensionali. La trave presenta una lunghezza pari a 8 mm e un diametro nominale D=2 mm. Dopo aver generato la mesh, al nodo centrale è stato attribuito un diametro *d* inferiore a *D*, formando un intaglio di lunghezza *L* pari alla somma delle dimensioni dei due elementi centrali della trave. Dapprima si è scelto di mantenere costante la dimensione della mesh di 1 mm (corrispondente, quindi, ad una lunghezza *L* dell'intaglio pari a 2 mm), facendo variare il valore di *d*. Per valutare l'altro parametro, è stata poi modificata la dimensione della mesh, tenendo costante il diametro *d*. In Figura 3.15 si riportano tre esempi di casi studiati. Il primo rappresenta il modello iniziale. Il secondo è uno dei casi in cui è stato modificato solo il rapporto tra i diametri, mentre nella terza trave la modifica è stata effettuata solo sulla dimensione della mesh. Si precisa che la variazione di diametro presente nei due elementi centrali non è rappresentata correttamente in LS-Dyna. Come si può vedere nelle immagini, infatti, essa risulta brusca. Si tratta esclusivamente di una questione grafica, poiché la variazione tra un nodo è l'altro è, in realtà, di tipo lineare.



Figura 3.15. Modello semplice di trave incastrata con intaglio con: d/D=0.5 e L=2 mm (sx); d/D=0.875 e L=2 mm (centro); d/D=0.5 e L=0.5 mm (dx)

In Figura 3.16 viene riprodotta la mappa delle tensioni assiali della trave nel caso con L=1.6 mm e d/D=0.5.



Figura 3.16. Mappa delle tensioni assiali nella trave con intaglio con d/D=0.5 e L=1.6 mm

In tutti i casi è stata ottenuta una mappa con questo tipo di andamento. Ciò ha permesso di verificare l'intensificazione della tensione in corrispondenza dell'intaglio. Inoltre, è stato possibile controllare che la tensione fosse costante lungo ogni sezione della trave. Avendo fatto uso di elementi 1D, infatti, era atteso questo tipo di risultato.

Per quanto concerne la dipendenza dal rapporto tra i diametri $d \in D$, nel grafico in Figura 3.17 viene riportato l'andamento della tensione massima risultante in funzione di questo parametro, con L costante e pari a 2 mm.



Figura 3.17. Andamento della tensione massima in funzione del rapporto tra diametri d/D

In Figura 3.18, invece, si mostrano i valori di tensione massima calcolati con d/D=0.5 al variare di L.



Figura 3.18. Andamento della tensione massima in funzione della lunghezza d'intaglio L

Si può affermare, quindi, che la variazione di diametro produce un effetto sulla tensione calcolata e, soprattutto, che i risultati non dipendono dalla dimensione della mesh. In Figura 3.18, infatti, non si osserva una dipendenza della tensione massima dalla lunghezza dell'intaglio.

In questo modo è stato possibile procedere con l'inserimento dei difetti, senza doversi preoccupare di eventuali modifiche alla mesh da effettuare in futuro.

3.5.2 Script MATLAB

I dati delle scansioni dei tre provini sono stati uniti in un'unica tabella, ordinando i diametri dei difetti (terza colonna in Tabella 3.2) in ordine crescente.

A causa delle diverse possibili disposizioni dei difetti all'interno di ogni provino, si è adottato un approccio di tipo statistico. È stato realizzato uno script MATLAB (riportato in Appendice) partendo dalla suddivisione dei diametri dei difetti in intervalli di ampiezza pari al doppio della varianza. Successivamente è stato generato un istogramma tarato in base alla frequenza con cui i diametri di ogni intervallo sono risultati presenti nei dati

raccolti (Figura 3.19). Esso è stato fondamentale per il calcolo della probabilità con cui un difetto, di dimensioni contenute entro un determinato intervallo, è presente all'interno della struttura.



Figura 3.19. Istogramma per il calcolo della probabilità

È stato poi creato un file di testo in cui è stata inserita la lista dei nodi tratta dal modello FE di partenza. In Figura 3.20 si può visualizzare un estratto di questo file.

*NO	DE			
\$#	nid	x	У	z
	51	-12.75	4.25	0.0
	194	-8.5	4.25	4.25
	352	-4.25	4.25	0.0
	353	-4.958333	4.25	0.7083333
	355	-5.666667	4.25	1.416667
	357	-6.375	4.25	2.125
	359	-7.083333	4.25	2.833333
	361	-7.791667	4.25	3.541667
	443	-12.75	12.75	8.5
	482	-8.5	8.5	0.0
	483	-8.5	7.791667	0.7083333
	485	-8.5	7.083333	1.416667
	487	-8.5	6.375	2.125

Figura 3.20. Estratto del file dei nodi tratto dal modello FE di partenza

In questo modo è stato possibile generare un grafico a barre, in cui è stato calcolato il numero di nodi ai quali assegnare un valore di diametro del difetto corrispondente alla media del rispettivo intervallo (Figura 3.21). Il numero di nodi per ogni intervallo è stato ottenuto dal prodotto del numero di nodi totale per la probabilità calcolata precedentemente.



Figura 3.21. Grafico a barre per il calcolo del numero di nodi per ogni intervallo di diametri del difetto

I diversi valori di numero di nodi risultanti per ogni intervallo sono stati arrotondati all'intero più vicino. Allo scopo di semplificare l'analisi, la somma dei valori ottenuti è stata posta pari al numero di nodi totale del modello numerico del provino, modificando opportunamente la quantità massima tra quelle calcolate.

In seguito, è stata creata una matrice *random* con due colonne. Nella prima sono stati inseriti gli identificativi dei nodi (*nid* in Figura 3.20), i quali sono stati ordinati in maniera casuale tramite la funzione *randperm* di MATLAB. Nella seconda colonna è stato immesso il vettore dei diametri da assegnare ai nodi, calcolando di volta in volta la differenza tra il diametro nominale delle beam ed il diametro del difetto corrispondente. Facendo riferimento ai valori arrotondati calcolati in precedenza, gli elementi di questo vettore si ripetono tante volte quanto è il numero di nodi ad essi associato.

Come per i nodi, è stato creato un file con la lista degli elementi (di cui si riporta un estratto in Figura 3.22) tratta dal modello FE di partenza.

*EL	EMENT BI	EAM		
\$#	eid	pid	nl	n2
	163	1	352	353
	164	1	353	355
	165	1	355	357
	166	1	357	359
	167	1	359	361
	168	1	361	194
	223	1	482	483
	224	1	483	485
	225	1	485	487

Figura 3.22. Estratto del file degli elementi tratto dal modello FE di partenza

Per ogni riga del file degli elementi, è stato controllato a quale elemento della prima colonna della matrice *random* corrispondesse l'identificativo nI. È stato poi inserito in un vettore tsI il relativo diametro della seconda colonna della matrice. È stato seguito un procedimento analogo con i nodi n2, creando il vettore ts2.

L'ultima parte del codice è relativa alla scrittura di alcuni file di testo per aggiornare delle sezioni del modello numerico: l'*element beam*, la *section beam*, la *part* e la *set part*. È stato necessario, infatti, dover creare un numero di parti e di section beam pari al numero totale di elementi. Per questo motivo, le sezioni citate sono state eliminate dal modello FE iniziale. Per l'*element beam*, la *section beam* e la *part* è stato fatto uso dei due cicli *for* annidati che sono stati impiegati in precedenza per la creazione dei vettori ts1 e ts2. Ad ogni iterazione è stato incrementato l'identificativo della parte (*pid*) e della section beam (*secid*) e sono stati inseriti all'interno dei file di testo i valori di ts1 e ts2 corrispondenti.

Sono stati creati tre file di testo: uno per gli elementi, uno per le section beam ed uno per le parti. Alcuni estratti di questi file sono riportati, rispettivamente, in Figura 3.23, in Figura 3.24 ed in Figura 3.25.

*EL	EMENT BE	EAM		
\$#	eid	pid	nl	n2
	163	2	352	353
	164	3	353	355
	165	4	355	357
	166	5	357	359
	167	6	359	361
	168	7	361	194
	223	8	482	483
	224	9	483	485
	225	10	485	487

Figura 3.23. Estratto del file degli elementi aggiornato

*SECT	TION BEAM	TITLE
Beam	Additive	and the second
\$#	secid	elform
	2	1
\$#	tsl	ts2
	1.149	1.182
*SECT	TION BEAM	TITLE
Beam	Additive	Contraction of the second s
\$#	secid	elform
	3	1
\$#	tsl	ts2
2023	1.182	1.199

Figura 3.24. Estratto del file delle section beam aggiornato

*PAR	Т				
\$HWC	OLOR	COMPS		1	3
\$#					
MESH	Uni	t_Cell	04_3x3	3	
\$#	p.	id	secid		mid
		2	2		1
*PAR	Т				
\$HWC	OLOR	COMPS		1	3
\$#					
MESH	Uni	t_Cell	04_3x3	3	
\$#	p.	id	secid		mid
		3	3		1

Figura 3.25. Estratto del file delle parti aggiornato

La *set part*, contenente la lista di tutte le parti del modello, è stata generata successivamente ed inserita al termine del file delle parti.

Aggiungendo questi file nel modello numerico, è stata completata l'introduzione dei difetti. La parametrizzazione di questo processo ha permesso di collocare i difetti all'interno della struttura in modo casuale. Ad ogni esecuzione dello script, infatti, le variazioni di diametro sono disposte in maniera differente.

In Figura 3.26 viene raffigurato un provino ottenuto in LS-Dyna, dopo l'inserimento dei difetti. Ad ogni elemento è assegnata una parte e ad ognuna di esse è associato un diverso colore.



Figura 3.26. Provino con difetti ottenuto in LS-Dyna

Prima di procedere con le simulazioni dei test quasi-statici nel caso di provini con difetti, si è deciso di valutare il diametro nominale con maggiore accuratezza. Il software delle scansioni, infatti, ha restituito anche i dati relativi al volume totale del provino reale in presenza di difetti. Il valor medio tra quelli ottenuti dalle tre scansioni è risultato circa uguale a 6500 mm³.

È di fondamentale importanza riuscire a realizzare un modello numerico con lo stesso volume del provino reale, poiché questo parametro ha una notevole incidenza sull'energia assorbita. Inserendo diversi valori di diametro nominale nello script MATLAB appena descritto, è stato possibile controllare di volta in volta il volume totale del provino realizzato in LS-Dyna. Con un diametro nominale delle beam uguale a 1.31 mm, il volume totale è risultato molto simile a quello reale. Per questo motivo, tale valore è stato preso come riferimento per le simulazioni delle prove quasi-statiche e dinamiche del provino con difetti.

4 Risultati

Questo capitolo sarà dedicato ai risultati numerici ottenuti dalle simulazioni. Sarà considerato innanzitutto il caso di compressione quasi-statica del provino senza difetti. Poi saranno analizzati i risultati dei modelli con difetti per prove di compressione quasi-statica e test d'impatto. Sarà descritta la realizzazione di una banda di curve numeriche per tutti i tipi di prove ed infine si illustrerà la procedura per l'ottenimento di curve necessarie per la fase di progettazione.

4.1 Test di compressione quasi-statica del modello senza difetti

Prima di introdurre la difettosità nel modello numerico e di effettuare le scansioni tomografiche, sono state eseguite diverse simulazioni considerando un diametro delle beam uguale a 1.325 mm, ovvero il diametro misurato mediante microscopio elettronico a scansione.

Dopo una serie di tentativi, si è scelto di assegnare una deformazione plastica a rottura pari a 4 volte il valore di massima deformazione plastica della curva in Figura 2.1, ossia 0.187866.

Per quanto concerne la modalità di cedimento, si riporta un frame del video di uno dei due test (Figura 4.1) e la deformata del modello numerico (Figura 4.2) in un certo istante successivo alla rottura, corrispondente ad uno spostamento di circa 4 mm della traversa superiore.



Figura 4.1. Provino reale dopo la rottura



Figura 4.2.Deformata del modello numerico dopo la rottura con fail=0.187866

Dal confronto risulta che il modello replica correttamente il cedimento a 45° del provino con il parametro *fail* scelto.

Nella Figura 4.3 è rappresentato, invece, il confronto tra la curva restituita dal modello e quelle sperimentali.



Figura 4.3. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove quasi-statiche con fail=0.187866

L'inserimento di un criterio di cedimento nel modello agli elementi finiti ha consentito di ottenere una curva che, come quelle sperimentali, presenta un tratto ascendente ed un unico picco, seguito da una parte discendente e, infine, dal tratto in cui si assiste al fenomeno della densificazione.

Si possono notare, però, notevoli discrepanze tra le curve, in particolare in termini di forza massima raggiunta. Essa, infatti, risulta essere pari a 38.445 kN per la curva numerica e non superiore a 27.562 kN per i dati sperimentali. Si registra, pertanto, un errore percentuale pari a circa il 39.5%. Ciò non è accettabile per poter validare il modello. Si è reso necessario, quindi, effettuare un'analisi più approfondita per ottenere una maggiore precisione.

4.2 Test di compressione quasi-statica del modello con difetti

Le scansioni alla Micro Computed Tomography hanno consentito di valutare in maniera accurata il volume totale del provino reale e, quindi, di ottenere un valore del diametro delle beam pari a 1.31 mm dopo aver considerato la presenza dei vuoti. A questo punto l'unico parametro da modificare per ricavare una curva numerica che potesse replicare nel migliore dei modi le curve sperimentali è stato il valore di deformazione plastica a rottura. Già dai primi tentativi, si è notato come il picco di forza massima fosse molto più vicino a quello ottenuto dai test in laboratorio. In particolare, il valore di *fail* scelto dopo una serie di simulazioni è pari a 0.15. La Figura 4.4 mostra il confronto tra le curve, in cui è stato utilizzato un filtro coseno con frequenza di 108 Hz per la curva numerica ed è stato tagliato il tratto relativo al fenomeno della densificazione, perché non necessario ai fini dell'analisi.



Figura 4.4. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove quasi-statiche nel caso di modello di provino con difetti

È evidente la differenza col modello privo di difetti, in particolare in termini di forza massima raggiunta. In questo caso, infatti, si arriva ad un valore di picco pari a 25.682 kN per la curva numerica. L'errore percentuale, pertanto, scende drasticamente a circa il 6.8%, che è un valore accettabile.

Sono presenti, comunque, alcune discrepanze riguardo altri aspetti. Nella curva ottenuta dal software, ad esempio, si assiste ad una deformazione plastica meno evidente nella parte tra la fine del tratto elastico ed il picco. Andando ad esaminare i risultati relativi all'istante di inizio di questa parte di curva, infatti, si nota che la percentuale di elementi deformati plasticamente è molto bassa. Ciò può essere attribuito al fatto che la maggior parte degli elementi sono sottoposti a compressione, mentre la curva tensione-deformazione plastica di cui si dispone è relativa a test di trazione. Come descritto in *Tensile and compressive behaviour of additively manufactured AlSi10Mg samples* [9], infatti, i comportamenti di questa lega di alluminio a compressione sono diversi da quelli a trazione. Questo spiega anche la differenza di pendenza del tratto elastico tra curva numerica e curve sperimentali.

Nel complesso, comunque, il modello rispecchia il comportamento osservato nelle prove sperimentali ed in particolare la differenza di picco massimo è trascurabile. Per questo motivo, il modello FE relativo alle prove quasi-statiche si può considerare validato.

Con lo scopo di controllare l'effetto della disposizione dei difetti sulle curve forzaspostamento, sono state effettuate altre quattro simulazioni eseguendo di volta in volta lo script MATLAB per l'inserimento dei vuoti. Ciò ha permesso di valutare cinque differenti curve numeriche. Anche in Figura 4.5 è stato fatto uso di un filtro coseno con frequenza di 108 Hz per le curve restituite dal modello.



Figura 4.5. Confronto tra curve sperimentali e curve numeriche relativo alle prove quasi-statiche con cinque differenti disposizioni dei difetti

Si osserva che le cinque curve numeriche sono coincidenti fino al picco massimo e per questo si può affermare che la collocazione dei vuoti non ha effetto su questo primo tratto. Dopo il picco, invece, si può notare una lieve dispersione dei risultati dovuta alle diverse posizioni dei difetti all'interno del provino numerico. In generale non si assiste a grandi variazioni tra i risultati e, quindi, il numero di simulazioni è sufficiente a caratterizzare il comportamento del provino con difetti.

Per una migliore visualizzazione dei risultati, si è deciso di realizzare una banda che potesse contenere il 95% di tutte le curve numeriche ottenibili con questo modello. Facendo riferimento ai dati di forza e spostamento nel tempo delle cinque curve, è stata innanzitutto calcolata la curva media. Successivamente è stato calcolato lo scarto quadratico medio tra i valori di forza per ogni punto. Questo valore è stato moltiplicato per 1.96 (per raggiungere una probabilità del 95%) ed è stato aggiunto e sottratto alla media per ottenere, rispettivamente, la curva limite superiore e quella inferiore. È stato così possibile creare la banda, come si può osservare in Figura 4.6.



Figura 4.6. Confronto tra curve sperimentali e banda di curve numeriche relativo alle prove quasistatiche

4.3 Test di impatto del provino con difetti

Una volta ottimizzati i valori del diametro delle beam e della deformazione plastica a rottura, sono state eseguite le simulazioni delle prove d'impatto. I parametri da tarare sono stati quelli relativi al modello di Cowper-Symonds (equazione 3.5). Partendo dai valori standard dell'alluminio (C=6500 s⁻¹ e p=4), sono state effettuate diverse simulazioni, con lo scopo di mediare i tre picchi e di replicare con buona precisione sia la parte ascendente sia quella discendente delle curve sperimentali. Dopo una serie di tentativi, i valori assegnati ai parametri sono stati C=8500 s⁻¹ e p=3. Come per le prove quasi-statiche, si è deciso di tagliare l'ultimo tratto delle curve, ma questa volta fino ad uno spostamento massimo di 4.5 mm. La curva numerica risultante, confrontata con quelle sperimentali, relativa alle prime due prove è rappresentata in Figura 4.7. In questo caso è stato utilizzato un filtro coseno di 20 Hz per la curva numerica.



Figura 4.7. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove d'impatto 1 e 2 nel caso di modello di provino con difetti

Per le prove 3 e 4, in cui sono state fatte variare massa e velocità, il confronto è riportato in Figura 4.8. Il filtro coseno usato per la curva numerica ha una frequenza di 60 Hz.



Figura 4.8. Confronto tra curve sperimentali e curva numerica relativo alle prove d'impatto 3 e 4 nel caso di modello di provino con difetti

La presenza dei tre picchi nelle curve sperimentali, non riscontrabili nella curva numerica, potrebbe essere causata dalla posizione della cella di carico. In laboratorio, infatti, è stato utilizzato un dardo che presenta un piatto all'estremità in contatto con il provino, mentre la

cella di carico è posizionata all'estremità opposta. I tre picchi, quindi, potrebbero essere dovuti ad un effetto d'inerzia del dardo ed alla possibile presenza di un'onda elastica che si genera al momento dell'impatto.

La curva numerica media i picchi di forza iniziali e, complessivamente, replica molto bene il comportamento registrato in laboratorio. Pertanto, anche in questo caso il modello FE può essere considerato validato.

Come in precedenza, sono state effettuate altre simulazioni al variare della disposizione dei difetti, ottenendo cinque curve numeriche per i primi due test (Figura 4.9, con filtro coseno con frequenza di 20 Hz per la curva numerica) ed altrettanti per le ultime due prove (Figura 4.10, con filtro coseno con frequenza di 60 Hz per la curva ricavata dal modello).



Figura 4.9. Confronto tra curve sperimentali e curve numeriche relativo alle prove d'impatto 1 e 2 con cinque differenti disposizioni dei difetti



Figura 4.10. Confronto tra curve sperimentali e curve numeriche relativo alle prove d'impatto 3 e 4 con cinque differenti disposizioni dei difetti

Anche in questo caso si è deciso di realizzare una banda per comprendere tutti i risultati numerici, con il 95% di probabilità. È stato seguito lo stesso procedimento descritto nel paragrafo 4.2, fino a ricavare le bande illustrate in Figura 4.11 per le prove 1 e 2 ed in Figura 4.12 per i test 3 e 4.



Figura 4.11. Confronto tra curve sperimentali e banda di curve numeriche relativo alle prove d'impatto 1 e 2



Figura 4.12. Confronto tra curve sperimentali e banda di curve numeriche relativo alle prove d'impatto 3 e 4

4.4 Curve di progettazione

Una volta realizzata la banda, si è deciso di implementare un modello agli elementi finiti a cui fare riferimento per la fase di progettazione. L'obiettivo di quest'ultimo step dello studio è stato quello di ricavare i parametri opportuni da assegnare, al fine di ottenere un modello di provino senza difetti che potesse replicare nel migliore dei modi la curva limite inferiore della banda. Questa curva, infatti, è inferiore alla risposta del materiale nel 95% dei casi, proprio per come è stata costruita la banda. Di conseguenza, per la progettazione si ha una curva risultante che consente di avere un'adeguata sicurezza, nonostante la mancata introduzione dei vuoti nel modello numerico.

Per le prove quasi-statiche si è partiti dalla modifica del diametro delle beam sulla base del confronto del volume reale del provino con quello restituito dal software. Nel caso di campione senza difetti, infatti, il diametro deve essere inferiore e, nello specifico, pari a 1.13 mm. Tuttavia, dopo aver analizzato le curve numeriche, si è deciso di assegnare un diametro delle beam di 1.1 mm, soprattutto per replicare con maggiore precisione il valore di picco massimo relativo alla curva limite inferiore della banda. Il parametro di

deformazione plastica a rottura, inoltre, è stato posto pari a 0.11, ottenendo la curva numerica (con filtro coseno con frequenza di 108 Hz) di color magenta in Figura 4.13.



Figura 4.13. Confronto tra curve sperimentali, banda di curve numeriche e curva di progettazione relativo alle prove quasi-statiche

Per quanto concerne il comportamento in campo dinamico, partendo dai valori appena citati relativamente al diametro delle beam ed al *fail*, è stato necessario individuare i parametri di Cowper-Symonds opportuni in modo da ottenere un modello senza difetti che restituisse una curva forza-spostamento in grado di riprodurre al meglio il limite inferiore della banda. Al termine di una serie di tentativi sono stati scelti *C*=9500 s⁻¹ e *p*=3. I risultati riguardanti le prime due prove d'impatto sono rappresentati in Figura 4.14, in cui è stato fatto uso di un filtro coseno con frequenza pari a 20 Hz per la curva numerica.



Figura 4.14. Confronto tra curve sperimentali, banda di curve numeriche e curva di progettazione relativo alle prove d'impatto 1 e 2

In merito ai test d'impatto 3 e 4, il confronto è riportato in Figura 4.15, in cui il filtro coseno utilizzato per la curva di progettazione ha frequenza uguale a 60 Hz.



Figura 4.15. Confronto tra curve sperimentali, banda di curve numeriche e curva di progettazione relativo alle prove d'impatto 3 e 4

Conclusioni

Il lavoro di tesi ha permesso di creare dei modelli per prevedere i comportamenti statici e dinamici di strutture reticolari. Dopo aver analizzato le informazioni necessarie sullo stato dell'arte e sulle prove effettuate in laboratorio per il tipo di cella oggetto di studio, si è deciso di ricavare dati più accurati sulle strutture. Per questo motivo, sono state eseguite alcune scansioni tomografiche con lo scopo di valutare la numerosità e le dimensioni dei vuoti presenti all'interno dei provini. In seguito, sono stati implementati dei modelli numerici ed è stato creato uno script MATLAB per l'inserimento dei difetti. Ciò ha consentito di ottenere ottimi risultati, con curve numeriche che rispecchiano l'andamento registrato in laboratorio, anche variando la collocazione dei difetti all'interno del campione. Successivamente, è stata realizzata una banda per ogni tipo di test per contenere la quasi totalità dei valori numerici e ottenere dei grafici più comprensibili. Il limite inferiore della banda è stato preso come riferimento per la creazione di un modello di provino senza difetti che ha permesso di ottenere la curva forza-spostamento da considerare in fase di progettazione.

Il vantaggio principale dell'approccio seguito è la precisione dei risultati ottenuti in relazione ai costi computazionali. Gli elementi beam monodimensionali, infatti, hanno permesso di ridurre notevolmente i tempi di calcolo. L'accuratezza è stata fornita dall'introduzione dei difetti nel modello e dalla valutazione del diametro delle beam tramite scansioni alla Micro Computed Tomography, che hanno permesso anche di verificare quale fosse l'effettivo volume totale dei provini reali.

Sono presenti, però, alcune discrepanze, sia in campo statico che in quello dinamico. In particolare, la pendenza del tratto elastico risulta superiore nella curva numerica. Come evidenziato nel capitolo 4, la deformazione plastica è minore rispetto ai risultati sperimentali nel tratto ascendente. Per i test d'impatto, inoltre, è da verificare che la presenza dei tre picchi nelle curve sperimentali sia effettivamente dovuta alla generazione di un'onda elastica data dall'inerzia del dardo.

Un ulteriore limite è stato dato dalla valutazione dei soli vuoti interni alle beam nel processo di scansione. Non è stato possibile, infatti, osservare le variazioni dovute ai difetti superficiali, che potrebbero avere influenza sui risultati finali.

Uno studio successivo potrebbe incentrarsi proprio sull'analisi della rugosità e della sensibilità dei risultati alla presenza di difetti in superficie. Per quanto concerne le differenze in termini di diagramma forza-spostamento, bisognerebbe ricavare informazioni

maggiormente dettagliate sulle proprietà del materiale a compressione ed inserirle nel modello, valutando la percentuale di elementi soggetti a trazione e beam poste in compressione per ogni istante di tempo.

Gli sviluppi futuri potranno riguardare applicazioni con altri materiali, come il carbon nylon, che presentano proprietà diverse e che potrebbero consentire di ottenere quantitativi maggiori di energia assorbita. I risultati ottenuti in questo studio forniscono anche un punto di partenza per la progettazione di nuove crash box per autoveicoli e per la validazione sperimentale dell'intero componente.

Appendice

Script MATLAB

```
%% Import data from spreadsheet
% Script for importing data from the following spreadsheet:
2
2
     Workbook: C:\Tesi\Dati scansioni\Lattice al\defects al globale.xlsx
8
    Worksheet: Grafico
close all
clear all
clc
%% Set up the Import Options and import the data
opts = spreadsheetImportOptions("NumVariables", 1);
% Specify sheet and range
opts.Sheet = "Grafico";
opts.DataRange = "D2:D51938";
% Specify column names and types
opts.VariableNames = "Diameter";
opts.VariableTypes = "double";
% Import the data
tbl = readtable("C:\Tesi\Modelli numerici dei
provini\defects al globale.xlsx", opts, "UseExcel", false);
%% Convert to output type
Diameter = tbl.Diameter;
%% Clear temporary variables
clear opts tbl
%% Istogramma per il calcolo della probabilità per ogni intervallo
v=var(Diameter);
binwidth=2*v;
x = linspace(0,1.1,200);
axes('FontSize', 24, 'NextPlot', 'add');
h=histogram(Diameter, 0:binwidth:1.1, 'Normalization', 'probability');
xlabel('Diametri [mm]', 'FontSize', 30);
ylabel('Probabilità','FontSize',30);
%% Istogramma per il calcolo del numero di nodi a cui assegnare un certo
diametro
[nodi]=readvars('nodi.txt');
nodi difettosi = length(nodi)*h.Values;% h.Values sono i valori di
probabilità calcolati col l'istogramma precedente
figure(10)
axes('FontSize', 24, 'NextPlot', 'add');
b=bar(h.BinEdges(1:end-1)+binwidth/2, nodi difettosi);
xlabel('Diametri [mm]', 'FontSize', 30);
ylabel('Numero di nodi', 'FontSize', 30);
probability=round(b.YData);
totale nodi difettosi=sum(probability);
% controllo sul numero di nodi con difetto
```

```
% facciamo in modo che sia uguale al numero di nodi totale
if totale nodi difettosi>length(nodi)
    [m,z] = max(probability);
    probability(z)=probability(z)-(totale nodi difettosi-length(nodi));
    totale nodi difettosi=sum(probability);
end
if totale_nodi difettosi<length(nodi)</pre>
    [a,n] = max(probability);
    probability(n)=probability(n)+(length(nodi)-totale nodi difettosi);
    totale nodi difettosi=sum(probability);
end
%% Matrice random nodi-diametri nodi con difetti
diam nominale=1.31;% [mm]
nodi random=nodi (randperm (length (nodi)));
somma=0;% contatore
for i=1:length(b.XData)
    if probability(i)~=0
        for j=somma+1:probability(i)+somma;
        diam nodi difettosi(j,:)=diam nominale-b.XData(i);
        end
    somma=somma+probability(i);
    end
end
matrice random=[nodi random, diam nodi difettosi];
%% Creazione file per l'inserimento dei difetti nel modello FE
[eid,pid,n1,n2]=readvars('elementi.txt');
totale elementi=length(eid);
% inizializzare pid e secid
for w=1:totale elementi
    pid(w)=2;% non usiamo pid=1, perchè fa riferimento a beam a sezione
costante che potrebbero servirci in futuro
    secid(w)=2;% non usiamo secid=1, perchè fa riferimento a beam a
sezione costante che potrebbero servirci in futuro
end
%scrivere l'element beam, la section beam e la part
fileID = fopen('element beam.k', 'w');
fid = fopen('section beam.k', 'w');
fid1 = fopen('part.k','w');
fprintf(fileID,'%13s\r\n%2s%6s%8s%8s%8s%8s%8s%8s%8s%8s%8s\r\n','*ELEMENT
BEAM','$#','eid','pid','n1','n2','n3','rt1','rr1','rt2','rr2','local');
for k=1:totale elementi
    for q=1:length(nodi random)
        if n1(k) == nodi random(q)
            if k \sim = 1
                pid(k)=pid(k-1)+1;
                secid(k) = secid(k-1)+1;
            end
            ts1(k)=diam nodi difettosi(q);
        elseif n2(k) == nodi random(q)
            if k~=1
                pid(k) = pid(k-1) + 1;
                secid(k) = secid(k-1)+1;
            end
            ts2(k)=diam nodi difettosi(q);
        end
    end
fprintf(fileID,'%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%8d%r\n',eid(k),pid(k),n1(k),n
2(k),0,0,0,0,0,2);
fprintf(fid, '%19s\r\n%13s\r\n%2s%8s%10s%10s%10s%10s%10s%10s%10s%10s\r\n%10d%1
```

```
0d%10.1f%10d%10.1f%10.1f%10d\r\n%2s%8s%10s%10s%10s%10s%10s%10s\r\n%10.3f%
10.3f%10.1f%10.1f%10.1f%10.1f\r\n','*SECTION BEAM TITLE','Beam Additive',
'$#','secid','elform','shrf','qr/irid','cst','scoor','nsm','naupd',secid(
k),1,1,2,1,0,0,0,'$#','ts1','ts2','tt1','tt2','nsloc','ntloc',ts1(k),ts2(
k),0,0,0,0);
fprintf(fid1,'%5s\r\n%8s%6s%8d%8d\r\n%2s%78s\r\n%21s\r\n%2s%8s%10s%10s%10
s%10s%10s%10s%10s\r\n%10d%10d%10d%10d%10d%10d%10d%10d\r\n','*PART','$HWCO
LOR', 'COMPS', 1, 3, '$#', 'title', 'MESH Unit Cell 04 3x3', '$#', 'pid', 'secid',
'mid', 'eosid', 'hgid', 'grav', 'adpopt', 'tmid', pid(k), secid(k), 1, 0, 0, 0, 0, 0);
end
fclose(fileID);
fclose(fid);
% aggiungere il set part nel file "part.k"
fprintf(fid1,'%20s\r\n%15s\r\n%2s%8s%10s%10s%10s%10s%10s\r\n%10d%10.1f%10
.1f%10.1f%10.1f%4s\r\n%2s%8s%10s%10s%10s%10s%10s%10s%10s\r\n','*SET PART
LIST TITLE', 'Effective beams', '$#', 'sid', 'da1', 'da2', 'da3', 'da4', 'solver'
,1,0,0,0,0,'MECH','$#','pid1','pid2','pid3','pid4','pid5','pid6','pid7','
pid8');
l=floor((totale elementi+1)/8);% totale elementi+1 perchè ho una parte in
più (la 1, con sezione costante)
for c=1:8:8*1
fprintf(fid1,'%10d%10d%10d%10d%10d%10d%10d%10d\r\n',c,c+1,c+2,c+3,c+4,c+5
, c+6, c+7);
end
if 8*l<totale elementi+1</pre>
    for t=(8*1)+1:totale elementi+1
    fprintf(fid1, '%10d', t);
    end
    for r=totale elementi+2:8*1+8
    fprintf(fid1,'%10d',0);
    end
end
fclose(fid1);
```

Bibliografia

- [1] M. F. Ashby, «The properties of foams and lattices,» *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences,* 2005.
- [2] C. Boursier Niutta, R. Ciardiello e A. Tridello, «Experimental and Numerical Investigation of a Lattice Structure for Energy Absorption: Application to the Design of an Automotive Crash Absorber,» *Polymers*, 2022.
- [3] T. Yu, H. Hyer, Y. Sohn, Y. Bai e D. Wu, «Structure-property relationship in high strength and lightweight AlSi10Mg microlattices fabricated by selective laser melting,» *Materials and Design*, 2019.
- [4] M. Della Ripa, «Provini in struttura lattice realizzati mediante fabbricazione additiva: Simulazione di prove statiche e di impatto e validazione sperimentale,» Tesi di Laurea Magistrale, Politecnico di Torino, Torino, 2021.
- [5] P. Magarò, G. Alaimo, M. Carraturo, E. Sgambitterra e C. Maletta, «A novel methodology for the prediction of the stress–strain response of laser powder bed fusion lattice structure based on a multi-scale approach,» *Materials Science & Engineering A*, 2023.
- [6] L. Boniotti, S. Beretta, S. Foletti e L. Patriarca, «Strain concentrations in BCC micro lattices obtained by AM,» *Procedia Structural Integrity*, 2017.
- [7] M. Smith, Z. Guan e W. J. Cantwell, «Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique,» *International Journal of Mechanical Sciences*, 2012.
- [8] A. Tridello, G. Chiandussi, M. Rossetto e D. S. Paolino, «VHCF response of as-built SLM AlSi10Mg specimens with large loaded volume,» *Fatique e fracture of engineering materials e structures*, 2018.
- [9] E. Sert, L. Hitzler, S. Hafenstein, M. Merkel, E. Werner e A. Öchsner, «Tensile and compressive behaviour of additively manufactured AlSi10Mg samples,» *Progress in Additive Manufacturing*, 2020.