



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**SEDE DI BOLOGNA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE – DIN**

*Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica*

*Curriculum Progettazione meccanica e Modellazione*

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN**

**CHASSIS AND BODY DESIGN AND MANUFACTURING**

*Progettazione di strutture cellulari leggere ottimizzate per il settore automotive sotto l'effetto di carichi statici e dinamici*

Relatore:

*Prof. Massimiliano De Agostinis*

Candidato:

*Andrea Paffetti*

Correlatore:

*Prof. Mattia Mele*

Sessione II

Anno Accademico 2022/2023



# Indice

Abstract.....	3
Introduzione.....	4
CAPITOLO 1 – Strutture cellulari.....	7
1.1 – Classificazione.....	7
1.2 – Architetture trabecolari.....	10
1.2.1 – Design della cella e del pattern.....	11
1.2.2 – Criterio di stabilità di Maxwell e comportamento a compressione.....	14
1.2.3 – Proprietà meccaniche.....	17
1.3 – Metodi di processazione e produzione.....	20
1.3.1 – Laser Powder Bed Fusion (LPBF).....	22
CAPITOLO 2 – Analisi dinamica.....	27
2.1 – Generalità.....	27
2.2 – Studio del fenomeno della propagazione ondulatoria nei materiali.....	29
2.3 – Tecniche sperimentali per indurre deformazioni dinamiche .....	32
2.3.1 – Split Hopkinson Bar Test (SHBT).....	33
2.4 – Comportamento dinamico dei solidi cellulari.....	36
CAPITOLO 3 – Giunti incollati.....	42
3.1 – Meccanismi di adesione.....	43
3.1.1 – Preparazione delle superfici del substrato.....	45
3.2 – Tipologie di carico e meccanismi di rottura.....	47
3.3 – Scelta dell’adesivo.....	49
3.4 – Giunzioni ibride.....	51
3.5 – Caratterizzazione ad impatto.....	54
CAPITOLO 4 – Caso studio reale.....	57
4.1 – Analisi preliminari.....	57
4.2 – Dimensionamento di massima del sistema.....	58
4.3 – Creazione modelli.....	60
4.3.1 – Cella cubica con nodo centrale (BCC + CP).....	61
4.3.2 – Cella forata.....	65
4.3.3 – Cella con modellazione generativa.....	70

CAPITOLO 5 – Finite Element Analysis (FEA).....	77
5.1 – Pre-processo.....	79
5.2 – Processo.....	82
5.3 – Post-processo.....	82
5.3.1 – Struttura con celle cubiche con nodo centrale (BCC + CP).....	83
5.3.2 – Struttura con celle forate.....	86
5.3.3 – Struttura con celle realizzate tramite modellazione generativa.....	88
5.4 – Confronto e scelta del modello.....	89
Conclusione.....	91
Indice delle figure.....	93
Indice delle tabelle.....	96
Bibliografia.....	97

## **Abstract**

Al giorno d'oggi, la realizzazione di componenti lightweight sta suscitando interesse in numerosi settori di mercato, primo fra tutti quello automotive, in cui si ricerca il miglior bilanciamento possibile tra sicurezza, efficienza e riduzione sia di emissioni, che di carburante. Tale fine può essere perseguito implementando dei design geometricamente ottimizzati, quali, ad esempio, le strutture cellulari, categoria cui appartengono le architetture lattice. L'elaborato di tesi si prepone due obiettivi principali: il primo consiste nello studio di tali strutture, considerando la loro classificazione in funzione della distribuzione spaziale, i diversi approcci con cui si possono progettare le singole celle, la stabilità statica e cinematica mediante il criterio di Maxwell, e, infine, lo sviluppo del settore additive, l'unico che consente di produrre i solidi cellulari, in quanto caratterizzati da forme complesse e design topologicamente ottimizzati. In funzione della tecnologia additiva scelta, vengono anche definiti gli specifici vincoli di processo. Il secondo obiettivo consta della riprogettazione geometrica e funzionale della parte cava di un giunto pin-collar, collegamento ibrido molto comune in campo automotive, al fine di ottenere un componente finale con proprietà migliorate rispetto a quelle del caso tradizionale. Per raggiungere tale scopo, si sceglie di passare da una geometria piena ad una che presenta layer intervallati di materiale pieno e architetture cellulari, valutando l'effetto in funzione del tipo di celle scelte, cioè cubica con nodo centrale, forata e modello generative. A valle di un'opportuna campagna di simulazioni, sarà possibile confrontare i risultati in termini di sollecitazione e spostamento, riuscendo così ad individuare il design che sarà in grado di garantire il miglior compromesso possibile in termini di leggerezza, resistenza statica e capacità di dissipazione energetica.

## Introduzione

L'alleggerimento strutturale è una comune strategia atta al miglioramento delle prestazioni e della sostenibilità industriale; la realizzazione di componenti lightweight sta crescendo d'interesse in molteplici settori, tra cui quello automotive, dove si ricercano la massima sicurezza e la miglior efficienza possibile, affiancate da una netta riduzione di emissioni e di consumo di carburante. Tale obiettivo può essere perseguito tramite l'utilizzo di materiali intrinsecamente leggeri, ma dotati di un'elevata resistenza specifica come le leghe di alluminio e di titanio, oppure implementando design geometricamente ottimizzati, ricorrendo ad esempio alle cosiddette strutture cellulari, categoria a cui appartengono le architetture "lattice".

Il presente elaborato di tesi si propone di studiare le caratteristiche di questa nuova tecnologia costruttiva, di analizzarne le proprietà meccaniche per poterle confrontare con quelle ottenibili progettando componenti "pieni", di definire i metodi di fabbricazione più consoni per la loro realizzazione e, infine, di ricercare quali geometrie garantiscano un ottimo compromesso tra la resistenza statica e l'assorbimento energetico.

Tali forme a densità variabile possiedono una modalità di deformazione prettamente plastica, assicurano una buona dissipazione del calore e permettono sia la modifica locale delle proprietà della parte, sia l'aggiunta di multifunzionalità ai manufatti, sia la riduzione del numero di vincoli di processo. In generale, per una corretta analisi, è necessario seguire un approccio multi-scala: le caratteristiche legate al metodo di fabbricazione e alla microstruttura del materiale sono associate alla micro-scala, mentre la forma, l'orientamento e la topologia delle celle unitarie sono considerate a livello di meso-scala. Infine, le analisi a livello di macro-scala comprendono la definizione del sistema globale, il quale è dipendente dall'andamento e dalla ripetizione dei singoli elementi nello spazio euclideo.

La possibilità di poter passare da un livello all'altro con grande facilità è un aspetto estremamente favorevole in ambito di progettazione e messa a punto di qualunque componente industriale, poiché, potendo considerare parti di dimensioni più piccole e semplici rispetto all'intero sistema, si possono accorciare notevolmente i tempi di simulazione; per tale motivo, è conveniente assemblare la geometria completa solamente dopo aver ottenuto dei risultati soddisfacenti a livello cellulare.

È bene ricordare come in letteratura siano molto comuni articoli riguardanti la risposta statica dei solidi cellulari, ed in particolare delle strutture trabecolari, a seguito dell'applicazione di carichi che variano in modo molto lento in un certo intervallo di tempo, ovvero secondi o minuti. Contestualmente a questi test, si possono ottenere in output le curve stress-strain o tensione-

deformazione da cui vengono dedotte diverse informazioni legate alla resistenza meccanica, alla deformabilità, all'elasticità e alla tenacità della singola cella nel caso in cui lo studio si focalizzi sulla meso-scala, oppure dell'intero pattern se l'applicazione è legata alla macro-scala. Nonostante si possano riscontrare diversi andamenti in funzione di specifici parametri di input e del tipo di architettura di riferimento, tutti i grafici possono essere suddivisi in tre aree principali: la regione elastica, quella plastica ed infine quella di densificazione, step in corrispondenza del quale si registra l'innalzamento repentino della sollecitazione causato dal cedimento e dal successivo contatto tra i singoli elementi, i quali riempiono i vuoti strutturali.

Al contrario, la conoscenza legata alla risposta di queste nuovissime strutture leggere in condizioni dinamiche, cioè dove il carico è applicato grazie ad una certa attrezzatura in un intervallo di tempo molto breve ( $10^{-2} - 10^{-8}$  secondi), risulta molto più contenuta e limitata. Tuttavia, si può facilmente evincere come il comportamento del sistema sia strettamente correlato alla variazione di tempo e ad effetti addizionali, come quelli inerziali.

L'avvento ed il continuo sviluppo del settore dell'Additive Manufacturing (AM) ha reso possibile la progettazione e la lavorazione di tutte le tipologie di solidi cellulari che sarebbero proibitive da ottenere in termini di fattibilità e di costi con le tradizionali tecnologie di produzione, come ad esempio la fusione o lo stampaggio; così facendo, le parti processate sono caratterizzate da un limitato contenuto di difettosità, da proprietà meccaniche buone e flessibili e da un ottimo rapporto rigidità/peso, contestualmente alla definizione della densità relativa. Nonostante siano ancora necessari miglioramenti in termini di scala, di risoluzione, di produttività, di affidabilità e di materiali processabili, i limiti complessivi dal punto di vista progettuale stanno via via diminuendo.

Le informazioni di base contenute nella parte introduttiva hanno costituito il punto di partenza per la riprogettazione geometrica e funzionale di un giunto pin-collar (normative di riferimento: ISO 10123 e ASTM D4562-01), ovvero un collegamento ibrido molto comune in ambito automotive, il quale sfrutta l'azione simultanea dell'interferenza, cioè una tecnica di giunzione tradizionale, e dell'incollaggio adesivo, al fine di ottenere un componente finale che possieda migliori proprietà rispetto al caso di un giunto semplice.

Più nel dettaglio, si è scelto di agire specificatamente sulla parte cava, passando da una classica geometria piena ad una che presentasse layer intervallati di materiale pieno e di architetture cellulari, valutandone l'effetto in funzione delle forme impresse alle singole celle, le quali sono state realizzate, attraverso il software CREO Parametric, in conformità con il profilo circolare del mozzo e con i vincoli imposti dal processo di fabbricazione additiva selezionato.

Infine, a valle di un'opportuna campagna di simulazioni in cui sono stati inseriti vincoli e carichi che rispecchiassero le condizioni di esercizio, è stato possibile confrontare i risultati sia in termini di sollecitazione che di spostamento, mettendo in luce la geometria in grado di garantire il miglior compromesso possibile in termini di leggerezza, resistenza statica e capacità di dissipazione energetica.

## CAPITOLO 1 – Strutture cellulari

Il termine “cellulare” definisce degli aggregati di elementi adiacenti, eventualmente dotati di spigoli e di facce in comune, che sono assemblati in modo da riempire un certo spazio. In natura esistono molti materiali di questo tipo come il legno, il sughero, le spugne, il tufo, i coralli e gli alveari, la cui peculiare struttura porosa li rende intrinsecamente leggeri e garantisce l’implementazione di proprietà uniche nel suo genere come l’isolamento termico ed il galleggiamento, oltre all’assorbimento acustico e di energia all’impatto. Per tale motivo, soprattutto nel corso degli ultimi anni, a seguito dell’avvento e dello sviluppo del settore additive, si è cercato di replicare artificialmente, quanto più fedelmente possibile, tali design al fine di poterli sfruttare favorevolmente in molteplici impieghi industriali.

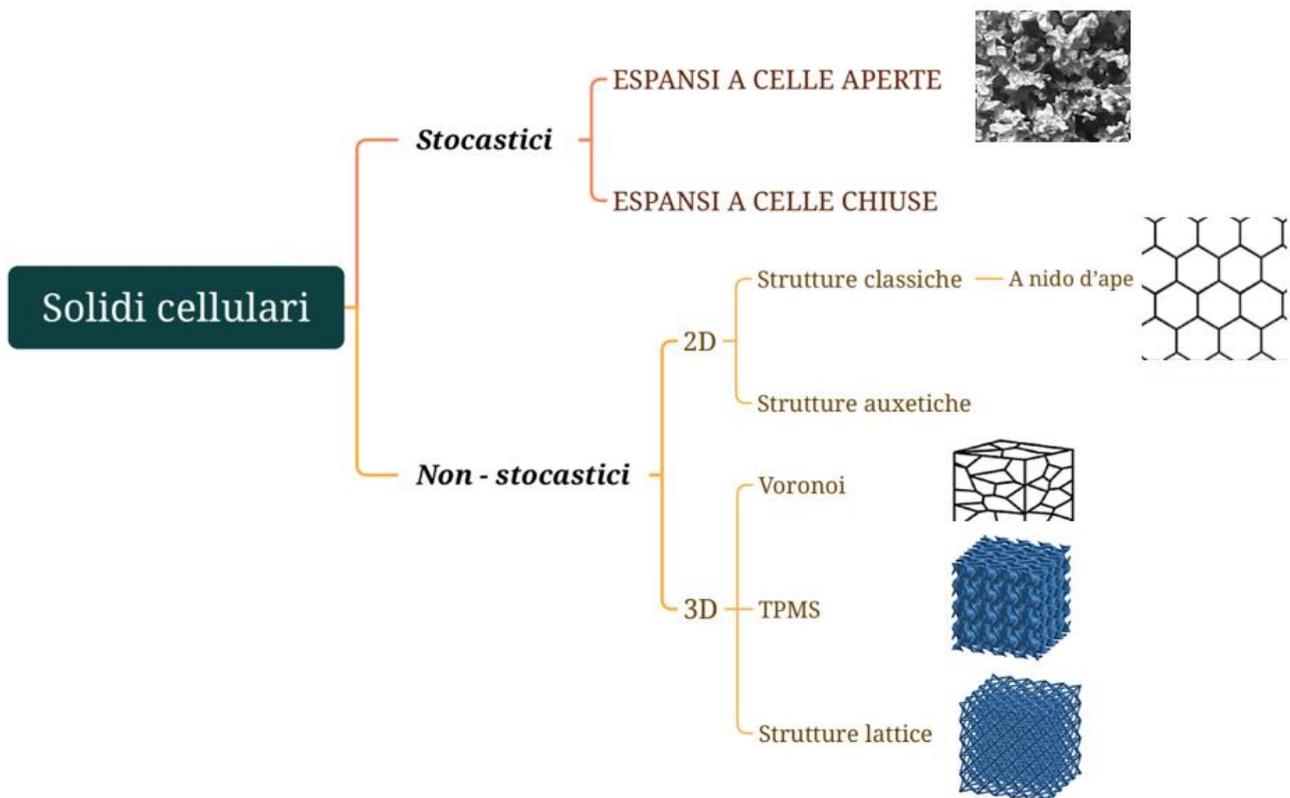
### 1.1 – Classificazione

Generalmente, in funzione della loro distribuzione spaziale, i solidi cellulari vengono classificati, come riportato in *Figura 1.1*, in stocastici e non stocastici [1][2]. Fanno parte della prima categoria sia gli espansi a celle aperte, sia quelli a celle chiuse, essendo essi caratterizzati da un’organizzazione incontrollata e randomica provocata dalla formazione di bolle di diversa grandezza a seguito della decomposizione di gas, quali aria, azoto e argon, iniettati all’interno del materiale fuso. La differenza principale tra le due classi di materiali cellulari non stocastici precedentemente menzionate risiede nel campo di applicazione, poiché le celle aperte sono più adatte sia quando si è in presenza di sollecitazioni non unidirezionali, sia quando è richiesta una certa capacità di assorbimento energetico, mentre le celle chiuse vengono comunemente adoperate in impieghi in cui si verifica il riempimento da parte di un fluido.

D’altra parte, le configurazioni non stocastiche, ovvero quelle contraddistinte da una ripartizione ordinata e controllata delle singole unità, sono correlate a forme 2D e 3D più o meno complesse. Alla prima categoria appartengono:

- le strutture a nido d’ape, le quali presentano un profilo esagonale che viene estruso nella terza dimensione e sono favorevolmente utilizzate quando i carichi esterni sono unidirezionali e i loro effetti risultano facilmente prevedibili (es. pannelli sandwich).
- i materiali auxetici, i quali sono caratterizzati da un coefficiente di Poisson negativo se soggetti a sforzi di compressione o di trazione: si contraggono lateralmente sotto sforzi di compressione e si espandono in trazione. Alcuni studi presenti in letteratura, come quello proposto da W. Tao et al. [2], hanno dimostrato che il loro impiego, in opportune condizioni, può condurre ad un notevole miglioramento delle proprietà in termini di resistenza

all'indentazione e al taglio trasversale, di resilienza, e di capacità di assorbimento energetico. D'altra parte, l'elevata difficoltà in ambito di modellazione geometrica e gli elevati costi di fabbricazione richiesti, riducono l'interesse per questa classe merceologica di architetture bidimensionali, le quali, ad oggi, interessano solamente una fetta ridotta del mercato.

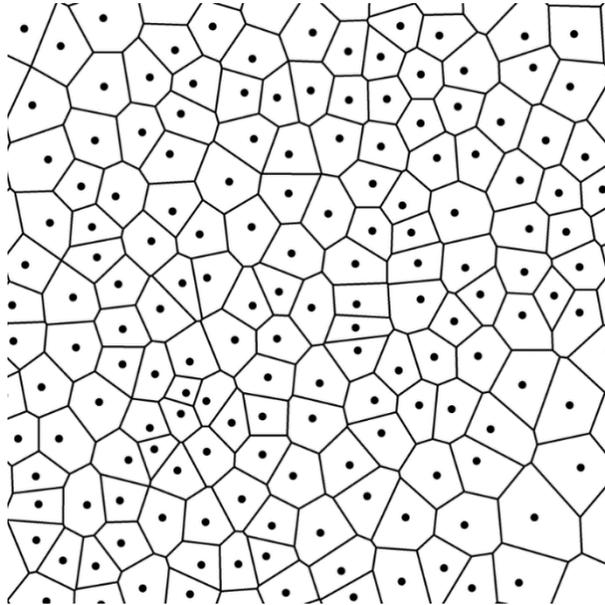


**Figura 1.1.** *Classificazione dei solidi cellulari.*

Invece, le strutture non stocastiche tridimensionali sono preferibili quando è richiesta un'elevata rigidità complessiva della parte che le corrispettive bidimensionali non riescono a garantire. Tra queste si riconoscono [3]:

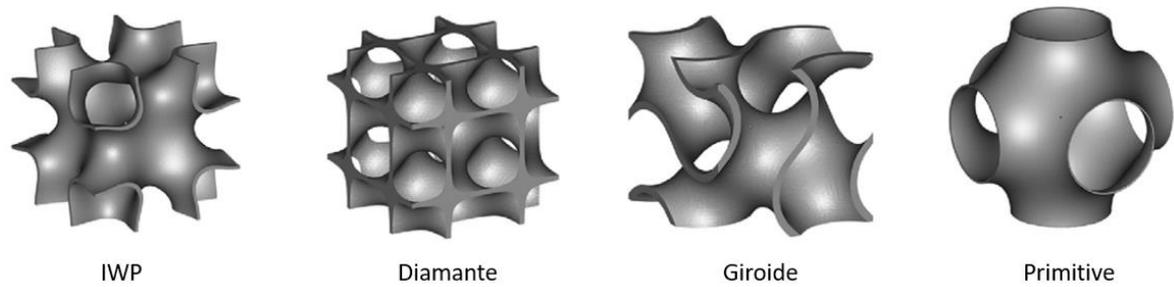
- i modelli di Voronoi, i quali, benché in prima analisi possano figurare come disordinati e casuali data la non uniformità dei moduli geometrici ottenuti, in realtà traggono la loro origine dal principio matematico e geometrico della tassellazione, alla cui base c'è la ricerca dell'ottimizzazione della posizione dei punti per minimizzare il volume del corpo [4]. Uno schema di questo tipo, riportato in **Figura 1.2**, si basa sulla suddivisione metrica di uno spazio (o di un piano) in un insieme di poliedri (o poligoni) convessi mutualmente disgiunti a partire da un numero prefissato di punti generatori. Tali geometrie sono caratterizzate da un

comportamento meccanico molto rigido, motivo per cui vengono principalmente impiegate in applicazioni strutturali.



**Figura 1.2.** Esempio di tassellazione di Voronoi, in cui ciascun poligono contiene uno solo dei punti principali e dove ogni altro punto appartenente al poligono è più vicino al punto principale di quel poligono che a tutti gli altri  $n-1$  punti principali [4].

- TPMS (Triply Periodic Minimal Surface), che presentano forme continue, regolari, non intersecanti, prevalentemente organiche e fisse (se ne può variare solo la densità), caratterizzate in ogni punto da un valore nullo della curvatura media. In **Figura 1.3** sono stati riportati gli esempi più comuni di tali celle, le quali sono ispirate all'osservazione di organismi presenti in natura come le giroidi, le primitive di Schwarz e i lidinoidi [5]. Esse risultano molto leggere e semplici nel design, conferiscono al componente un ottimo comportamento a fatica ed impatto, non soffrono di fenomeni legati alla concentrazione localizzata degli stress oltre ad avere notevoli capacità di scambio termico e di controllo del rumore. Al contempo, il problema principale risiede nella forte direzionalità delle proprietà resistenziali, specialmente nelle frazioni a più bassa densità. Questa anisotropia può essere limitata con la definizione di strutture ibride, ottenibili grazie alla combinazione ottimale di due o più forme base [6-7].



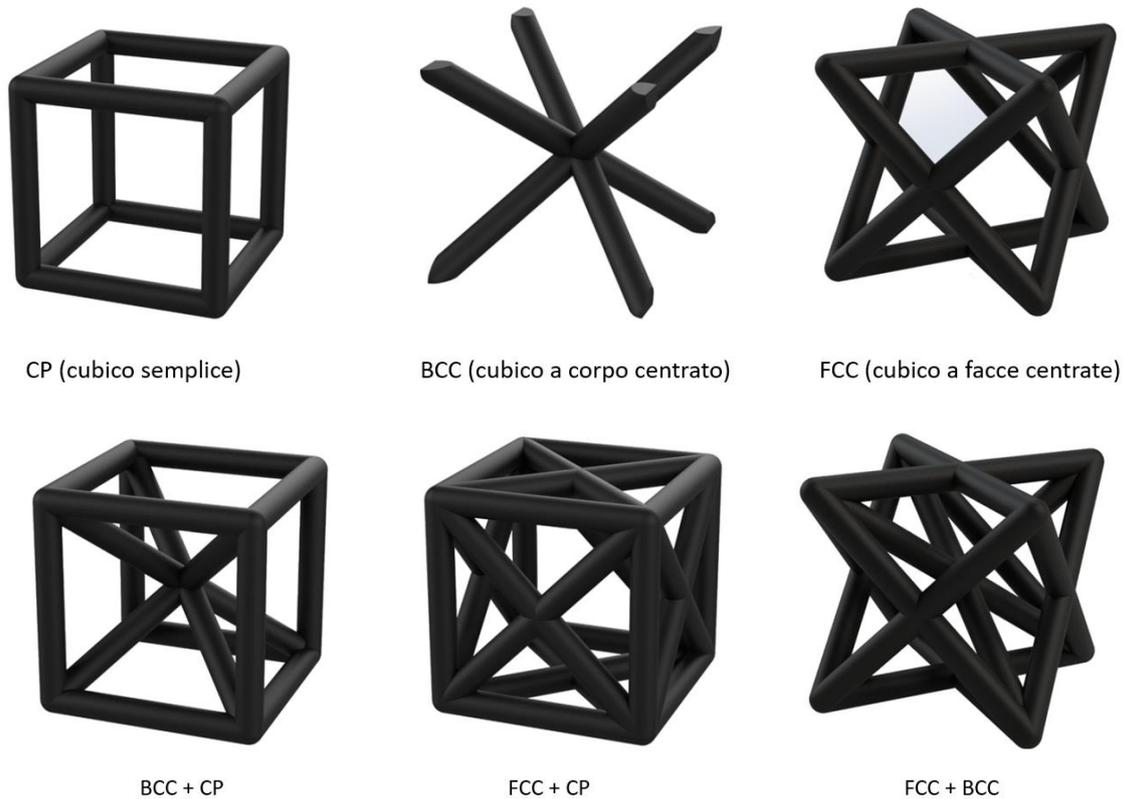
**Figura 1.3.** Celle TPMS più diffuse [5].

- Architetture “lattice” o trabecolari, ovvero modelli basati sulla disposizione ordinata di elementi convergenti in nodi che garantiscono una vasta gamma di opportunità progettuali e di possibilità di sviluppo, in quanto se ne possono modificare facilmente le dimensioni, la posizione, la densità e l’inclinazione. Sono leggere a causa dell’elevata porosità interna e sono in grado di assorbire una grande quantità di energia deformandosi plasticamente.

## **1.2 – Architetture trabecolari**

Nello studio presentato da Ashby [8] viene fornita la definizione di base di struttura trabecolare intesa come solido suddiviso in unità cellulari, la quale ripercorre a stretto giro quella fornita per le classiche architetture ingegneristiche composte da travi, come ad esempio i telai, essendo entrambe composte da elementi interconnessi ed opportunamente vincolati. Tuttavia, emerge una differenza sostanziale intrinsecamente legata alla scala: infatti, le celle unitarie di un solido cellulare possono essere dotate di una dimensione millimetrica o micrometrica. Questo aspetto permette di “risolvere” il sistema sia utilizzando i metodi classici della meccanica, sia considerandolo come materiale a sé stante, dotato di proprietà caratteristiche, le quali possono essere confrontate direttamente con quelle del materiale di riferimento pieno e compatto.

Le topologie più comuni e più semplici a cui ci si può riferire si rifanno alla teoria della struttura cristallina dei materiali metallici, e più specificatamente ai tre reticoli di Bravais cubici, ovvero quello elementare semplice (CP), quello a corpo centrato (BCC) e quello a facce centrate (FCC), riportati in **Figura 1.4** [9]. Ovviamente, in funzione delle esigenze e delle necessità progettuali, è buona norma ricorrere alla combinazione delle geometrie precedentemente menzionate (BCC + CP, FCC + CP, BCC + FCC), oppure alla loro variazione, tramite, ad esempio, l’aggiunta di un ulteriore elemento trave in direzione z (BCCZ e FCCZ). Inoltre, benché molto difficili da processare, e quindi meno diffusi a livello industriale se non nel caso di impieghi specifici e settoriali, trovano spazio anche forme a diamante e a tesseract.

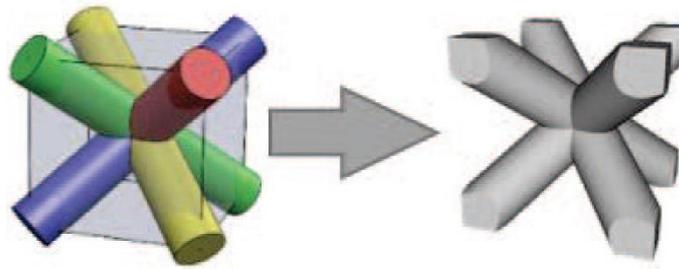


*Figura 1.4. Celle trabecolari comunemente utilizzate [9].*

### ***1.2.1 – Design della cella e del pattern***

Come già accennato nei paragrafi precedenti, all'interno del sistema complessivo è immaginabile individuare un certo numero di celle, le quali, disposte secondo una certa logica, rappresentano il più piccolo elemento costituente; esse possono essere progettate sfruttando tre approcci molto dissimili tra loro [2]:

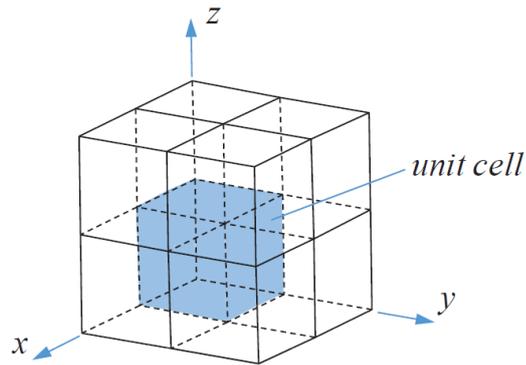
- metodo basato sulle primitive, in cui la singola unità viene realizzata a partire da geometrie semplici, create grazie ad operatori di tipo booleano. In **Figura 1.5** è riportato un classico esempio di generazione di una cella BCC, ottenuta tramite l'unione di quattro cilindri orientati diagonalmente e la successiva intersezione con una forma cubica di riferimento.



*Figura 1.5. Esempio del metodo basato sulle primitive [2].*

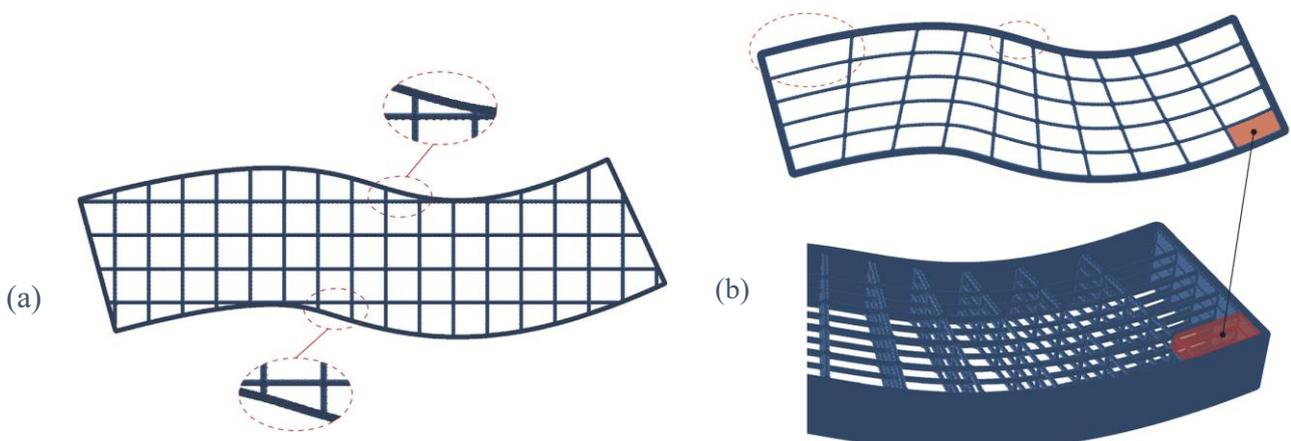
- Metodo basato sulle superfici implicite, ottenibili congiungendo gli zeri di un'opportuna funzione matematica in tre coordinate del tipo:  $F(x, y, z) = 0$ . Così facendo, si risale ad un array di punti appartenenti alla superficie stessa. Tale procedimento, attraverso l'esplicitazione di alcuni termini lineari all'interno dell'equazione, permette, a differenza del precedente, un controllo parametrico sulla porosità e sul suo gradiente, grandezze che influenzano fortemente le proprietà meccaniche del manufatto. In più, la generazione della struttura complessiva risulta molto più immediata poiché, modificando opportunamente gli intervalli delle variabili presenti nella funzione implicita, si ottiene una modellazione matematica completa nello spazio tridimensionale.
- Metodo basato sull'ottimizzazione topologica, in cui la geometria finale della cella è ottenuta attraverso algoritmi matematici che minimizzano una certa funzione obiettivo senza l'aggiunta di vincoli a "priori" e garantiscono una distribuzione ottimale di materiale. Tale criterio è così sviluppato e potente che viene utilizzato non solo nello studio a livello di meso-scala, ma anche per stabilire l'organizzazione delle unità all'interno dell'intero spazio di progettazione (macro-scala).

Un ulteriore aspetto che deve essere tenuto in considerazione è quello legato alla scelta e alla realizzazione del pattern, ovvero al modo in cui le singole unità si ripetono. La versione più semplice e comune, nota anche con il nome di patterning uniforme o diretto, è legata alla traslazione e alla ripetizione di celle identiche dal punto di vista delle dimensioni, della configurazione e della topologia; un'eccezione è costituita dai reticoli pseudo-periodici, in cui le singole unità condividono solamente la topologia, mentre differiscono nella forma e nelle dimensioni dei singoli elementi. Tuttavia, quando si fa riferimento ad uno schema di questo tipo, mostrato in *Figura 1.6*, è bene tenere presente che la gestione degli elementi in corrispondenza delle superfici terminali del manufatto può risultare casuale, con la possibilità, non troppo remota, che essi vengano troncati di netto, non riuscendo così a preservare l'integrità strutturale complessiva del sistema. Così facendo, si potrebbero generare aree scarsamente collegate e connesse tra loro.



**Figura 1.6.** Schema di patterning uniforme o diretto [2].

Alternativamente, si sceglie di virare sia verso conformazioni randomiche e disordinate, sia verso design complessi e sofisticati come quello basato sulla ripetizione conforme ad una superficie geometrica assegnata, il quale, a differenza del metodo diretto, permette, come si può apprezzare dalla **Figura 1.7**, un adattamento maggiore allo spazio disponibile, assicurando il mantenimento dell'integrità strutturale anche alle estremità. In sintesi, potendo distribuire maggiormente il carico, esso viene considerato come uno dei migliori criteri per irrigidire e rafforzare l'assieme. Tuttavia, le dimensioni e la forma delle singole celle possono subire cambiamenti anche significativi e tale aspetto potrebbe risultare fortemente in contrasto con i vincoli di progettazione legati alla tecnica di manifattura additiva selezionata, in termini sia di lunghezze minime e massime, sia di diametro che di spessore dell'elemento trave. Per quanto detto fino a questo momento, quindi, la metodologia di popolazione conforme risulta una valida alternativa solamente se le geometrie sono scarsamente complesse.



**Figura 1.7.** Confronto tra la distribuzione uniforme (a) in cui l'integrità strutturale delle celle nelle zone più esterne è accidentale e la distribuzione conforme (b), in cui l'integrità strutturale delle celle nelle zone più esterne è preservata [3].

### 1.2.2 – Criterio di stabilità di Maxwell e comportamento a compressione

Il comportamento meccanico di una “lattice” è strettamente correlato, così come nel caso di tutte le altre tipologie di solidi cellulari, sia al materiale, sia alla sua distribuzione, sia al grado di porosità, sia all’architettura delle singole celle che si ripetono. Il primo tra i parametri citati in precedenza circoscrive le proprietà meccaniche di base come il modulo di Young, la tensione di snervamento, la fragilità, il limite di fatica e la tenacità statica. Con riferimento ai metalli, al fine di ottimizzare tali grandezze, è consigliabile ricorrere a trattamenti termici post-processo.

Considerando la singola unità ripetente come un telaio dotato di connessioni prive d’attrito, è possibile determinarne, tramite il criterio di Maxwell, la stabilità statica e cinematica. L’equazione caratteristica è funzione sia del numero di elementi trave ( $b$ ), sia del numero di giunzioni ( $j$ ) ed assume, in tre dimensioni, la forma riportata nella (1.1):

$$M = b - 3 \cdot j + 6 \quad (1.1)$$

In funzione del risultato finale si possono delineare tre contesti assai diversi tra loro che devono essere analizzati nel dettaglio. Infatti, se:

- $M < 0$  il telaio è instabile e diventa un meccanismo, ovvero mostra uno o più gradi di libertà residui. Per tale motivo, a seguito dell’applicazione di un carico esterno, dato che si considerano delle giunzioni bloccate, gli elementi tendono a flettere, tanto che l’architettura prende il nome di bending-dominated e presenta sia una bassa connessione, sia una ridotta efficienza.
- $M = 0$  le giunzioni sono ben vincolate ed il telaio diventa rigido. Così facendo gli elementi sopportano favorevolmente gli sforzi normali di trazione o di compressione indotti, tanto che l’architettura prende il nome di stretch-dominated e presenta sia un’alta connessione, sia un’elevata efficienza poiché i corpi snelli sono molto più rigidi se sottoposti a trazione o compressione piuttosto che a flessione.
- $M > 0$  le celle sono sovravincolate e, soprattutto quando gli elementi trave di una struttura possiedono diversa lunghezza, si riscontrano uno o più stati di “self-stress”, ovvero che anche in assenza di carichi esterni, vengono scambiate comunque delle sollecitazioni. L’architettura prende il nome di stretch-dominated e presenta sia un’alta connessione, sia un’elevata efficienza.

Nell'ultimo caso in esame, la (1.1) può essere riarrangiata in funzione del numero di stati di “self-stress” indipendenti ( $s$ ) e del numero di meccanismi inestensibili ( $m$ ), in modo da fornire una generalizzazione della teoria di Maxwell in tre dimensioni:

$$M = s - m \quad (1.2)$$

Solamente quando il valore dei parametri  $s$  ed  $m$  è identicamente nullo, si ricade, ancora una volta, nella condizione limite di reticolo ben vincolato ( $M = 0$ ). Malgrado ciò, la regola utilizzata rappresenta un requisito necessario ma non sufficiente per definire che il telaio sia correttamente rigido. Infatti, sostituendo al membro di sinistra della (1.2) uno zero, si può asserire solamente che il numero degli stati di “self-stress” coincide con quello dei meccanismi, senza poter concludere che entrambi siano anche nulli.

A questo punto si possono calcolare analiticamente, tramite la (1.1), i numeri di Maxwell ( $M$ ) associati alle geometrie trabecolari riassunte in **Figura 1.4**. I dati raccolti in **Tabella 1.1** permettono così di avere un'idea generale sul loro comportamento e sul loro effettivo campo d'applicazione.

**Tabella 1.1.** *Calcolo analitico del numero di Maxwell delle celle trabecolari più utilizzate.*

<b>Tipologia di Cella</b>	<b>b</b>	<b>j</b>	<b>M</b>
<i>CP</i>	6	6	-6
<i>BCC</i>	8	9	-13
<i>FCC</i>	16	12	-14
<i>BCC + CP</i>	20	9	-1
<i>FCC + CP</i>	36	14	0
<i>BCC + FCC</i>	29	14	-7

Ad eccezione della cella  $FCC + CP$ , tutte le altre presentano un'architettura bending-dominated; tuttavia, se queste stesse forme fossero rinforzate con un ulteriore elemento trave disposto lungo  $z$  ( $BCC + Z$ ,  $FCC + Z$ ), le composizioni risulterebbero stretch-dominated.

Malgrado fino a questo momento si sia sottinteso di poter caratterizzare indifferentemente il materiale a trazione o compressione, è bene puntualizzare come, in realtà, la stragrande maggioranza dei test meccanici su forme “lattice” sia di tipo compressivo poiché molto più semplice da mettere a punto. Infatti, la prova viene eseguita facilmente schiacciando la geometria posta tra i due afferraggi; al contrario, qualora si voglia sollecitare il campione a trazione, è fondamentale prevedere uno specifico

design dell'interfaccia con il banco di prova. Alsalla et al. [11], hanno dimostrato che il materiale cede proprio in corrispondenza della superficie di transizione tra pezzo ed attrezzatura suggerendo una localizzazione dello stress in quella zona.

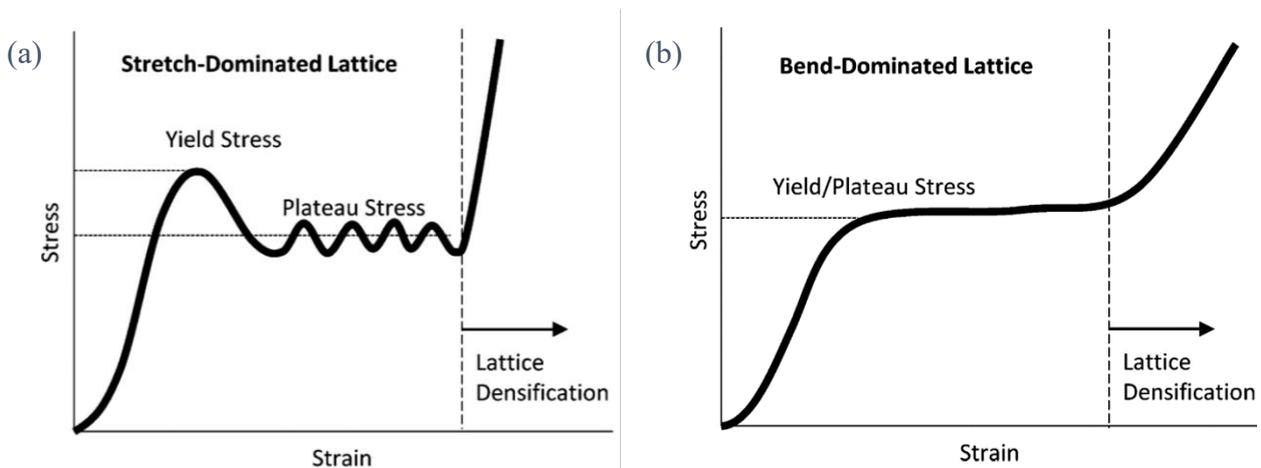
I due gruppi di architetture presentati nei paragrafi precedenti mostrano comportamenti assai differenti se sottoposti ai classici test compressivi statici o quasi-statici, ovvero dove l'aumento del carico avviene in modo lento e pressoché costante. Una geometria stretch-dominated ha valori di modulo di Young e di snervamento relativamente più alti rispetto a modelli spiccatamente bending-dominated di pari densità.

Tali considerazioni si ripercuotono quindi sull'andamento delle curve tensione-deformazione, poiché, nel primo caso, come riportato in **Figura 1.8**, si nota sia come la regione di deformazione elastica reversibile e lineare risulti più estesa, sia come il plateau post-yielding diventi molto più ristretto.

Inoltre, per continuare a deformare plasticamente ed irreversibilmente una struttura dotata di  $M < 0$  è sufficiente mantenere costante il valore di  $\sigma$ , contrariamente a ciò che accade se  $M \geq 0$ , condizione in cui si registra un comportamento fortemente oscillatorio della tensione. Nonostante tali diversità, ad un certo punto, in entrambe le occasioni si entra nella regione di densificazione, zona in cui si assiste al fenomeno puramente geometrico del continuo collasso degli elementi che chiude i pori e causa un incremento repentino dello stress.

In generale, mantenendo la densità costante ed invariata, la resistenza alla compressione diminuisce drasticamente se vengono aumentate le dimensioni della cella unitaria poiché, per la conservazione del volume, gli elementi trave risulteranno molto più snelli e quindi fortemente inclini a buckling.

In realtà, la modalità di rottura che si verifica durante un processo di questo tipo non è riconducibile solamente al collasso di celle provocato da fenomeni di instabilità da carico di punta, ma, come proposto da Maskery et. al [13], possono subentrare, in opportune condizioni, altri meccanismi primari. Tra questi si riconoscono sia la propagazione di cricche, fenomeno favorito dalla presenza di difetti preesistenti come pori ed irregolarità superficiali, sia le cosiddette "shear-bands", le quali perdono il nome anche di bande diagonali poiché si sviluppano nella direzione in cui è massima la sollecitazione di taglio, disposta teoricamente a  $45^\circ$  rispetto all'asse di carico [14].



**Figura 1.8.** Tipici diagrammi  $\sigma$ - $\epsilon$  di architetture (a) stretch-dominated, (b) bending-dominated [12].

Per quanto detto fino a questo momento, le architetture dotate di  $M \geq 0$  sono favorevolmente impiegate se sono richieste elevate proprietà resistenziali; d'altra parte, nei settori in cui l'assorbimento energetico è la priorità progettuale, i modelli con  $M < 0$  sono molto più adatti. Contestualmente ad una scelta o all'altra, è possibile agire comunque sulla rigidità complessiva tenendo sotto controllo la variazione del parametro  $I$ , noto anche con il nome di modulo d'inerzia  $I$ ; ad un aumento di tale grandezza corrisponde una resistenza maggiore.

In sintesi, la prerogativa delle composizioni trabecolari di essere stretch-dominated o bending-dominated risulta assai peculiare e lascia una grande libertà progettuale in mano all'operatore poiché egli può scegliere il design che ritiene più opportuno in funzione degli obiettivi e delle caratteristiche che la cella o l'intera struttura dovranno possedere in esercizio. Un discorso di questo tipo, però, non è estendibile a tutte le famiglie di solidi cellulari; basti pensare ad esempio agli espansi, i quali flettono univocamente a causa della presenza di porzioni fortemente eterogenee in cui si alternano parti rigide a parti più morbide, determinate sia dalla natura stocastica del materiale, sia dal tipico processo di fabbricazione utilizzato [10].

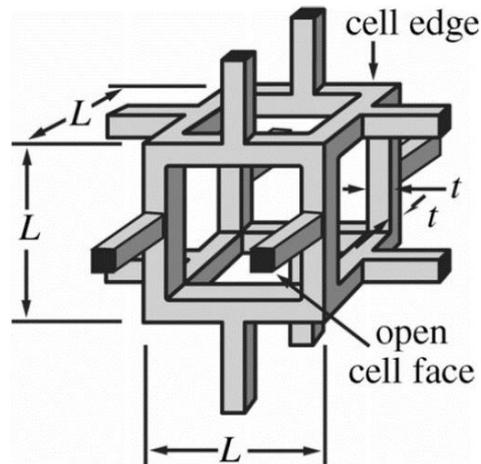
### 1.2.3 – Proprietà meccaniche e “scaling-laws”

Le proprietà meccaniche delle strutture trabecolari, così come quelle di tutti gli altri materiali cellulari, dipendono direttamente dalla densità relativa ( $\rho_{rel}$ ), definita come il rapporto tra la concentrazione della cella svuotata ( $\rho$ ) e quella del solido pieno ( $\rho_s$ ) di cui il profilo è realizzato [8][15]. Di solito, si fa riferimento ad una relazione semplificata, descritta dalla (1.3), che lega la variabile sopramenzionata con le grandezze geometriche caratteristiche della cella, ovvero la sua

dimensione ( $L$ ) e lo spessore dei suoi elementi ( $t$ ), in funzione di una certa costante ( $C$ ) e di un coefficiente ( $n$ ) che dipende dalla forma assunta dal reticolo:

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{\rho}{\rho_s} = C \cdot \left(\frac{t}{L}\right)^n \quad (1.3)$$

Ai fini di una maggior chiarezza nella comprensione della (1.3), è stato indicato in **Figura 1.9** uno schema esemplificativo di una cella in cui sono stati messi in evidenza tutti i parametri notevoli.



**Figura 1.9.** Schema di una cella che mette in luce i parametri definiti nella (1.3) [8].

Come si evince dalla (1.3), qualora la densità relativa debba essere modificata per qualche motivo, si agisce direttamente sulla distribuzione del materiale, ritoccando il profilo degli elementi costituenti; questo cambiamento si definisce omogeneo quando tutte le celle subiscono la stessa trasformazione, o eterogeneo, quando si assiste ad un'alterazione localizzata, in un'area circoscritta e limitata dell'insieme, definita da un certo gradiente.

La definizione di  $\rho$  dipende direttamente dalla tecnologia di fabbricazione additiva a cui si ricorre per la realizzazione del componente, poiché, contestualmente, vengono definiti sia i vincoli legati alle forme processabili, sia quelli geometrici di processo, tra cui si annoverano l'angolo d'inclinazione  $\theta$  ed il range di valori minimi e massimi riferiti alla lunghezza, al diametro e allo spessore del singolo elemento ( $L_{\text{min}}$  e  $L_{\text{max}}$ ,  $D_{\text{min}}$  e  $D_{\text{max}}$ ,  $t_{\text{min}}$  e  $t_{\text{max}}$ ). Così facendo, si riesce a identificare, per ogni tecnologia, un intervallo caratteristico e ideale di densità relativa, tale per cui il processo possa avvenire correttamente, senza la possibilità, ad esempio, che la polvere rimanga intrappolata all'interno delle inclusioni presenti nel materiale.

Analiticamente parlando è possibile considerare le cosiddette “scaling-laws” o leggi di scala per determinare la correlazione, purché esistente, tra una certa proprietà di progetto e la densità relativa. Esse rappresentano dunque uno dei criteri più comuni per fare delle previsioni sulla risposta

meccanica di una determinata struttura; più nel dettaglio, facendo riferimento alla (1.4) e alla (1.5) proposte da Ashby [8] si riesce a validare quanto riportato solo teoricamente nella Sez. 1.2.2 riguardo le caratteristiche delle architetture citate. Nel caso di modelli bending-dominated si ottiene:

$$\frac{E}{E_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^2 \quad \frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right)^{3/2} \quad (1.4)$$

in cui:

- $E$  = modulo elastico effettivo della geometria trabecolare, riferito alla pendenza della retta della curva di scarico e non a quella di carico, poiché, prima dello snervamento, potrebbero verificarsi fenomeni di plasticizzazione locale più o meno marcati.
- $E_s$  = modulo elastico del solido pieno.
- $\sigma_{pl}$  = tensione di plateau (regione plastica).
- $\sigma_{y,s}$  = tensione di snervamento associata al materiale pieno.

Un discorso analogo viene fatto per le architetture stretch-dominated, tale per cui:

$$\frac{E}{E_s} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad \frac{\sigma_{pl}}{\sigma_{y,s}} \propto \left(\frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (1.5)$$

Dato che il rapporto  $\rho / \rho_s$  assume sicuramente valori minori dell'unità, gli esponenti maggiori di 1 comportano una diminuzione ulteriore di tale parametro. A parità di densità relativa, i valori associati al modulo elastico effettivo e alla tensione di plateau di un'architettura stretch-dominated sono generalmente maggiori. In altre parole, un incremento di  $L$  (unità più grandi) induce un calo di  $\rho_{rel}$ , e dunque anche delle proprietà meccaniche e resistenziali associate al componente; tuttavia, tale riduzione risulta molto più accentuata per strutture in cui  $M < 0$ , rispetto a quelle in cui  $M \geq 0$ .

Inoltre, si vuole sottolineare la diretta dipendenza esistente tra le proprietà meccaniche di riferimento e la densità del solido cellulare considerato: all'aumentare di quest'ultima, crescono sia il rapporto  $\rho / \rho_s$ , sia  $E$ , sia  $\sigma_{pl}$ . D'altra parte, però, se  $\rho / \rho_s$  si avvicina al valore unitario, il vantaggio corrispettivo legato all'alleggerimento strutturale verrebbe perso completamente. Pertanto, è necessario trovare il giusto equilibrio nella definizione di forme lightweight, senza danneggiare troppo le caratteristiche resistenziali.

Per quanto detto fino a questo momento, alterando la morfologia dell'unità ripetente tramite ad esempio l'inserimento di ulteriori elementi trave all'interno della struttura di base, o di raggi di raccordo in corrispondenza dei nodi, si riesce a far aumentare  $\rho$  e, di conseguenza, le proprietà meccaniche e l'efficienza del manufatto, limitando anche possibili fenomeni di anisotropia: viene

garantita una certa standardizzazione dei valori con una riduzione della loro dispersione nelle varie direzioni. Arshad et al. [16] hanno studiato gli effetti provocati dalle modificazioni geometriche precedentemente menzionate su classiche strutture trabecolari ad otetto (FCC + BCC), mantenendo la massa, e quindi la concentrazione, costante. Si è potuto facilmente constatare come in queste configurazioni, l'introduzione di raggature accresca sia la rigidità, sia l'energia assorbita, sia la stabilità della cella poiché viene meno la concentrazione degli stress in corrispondenza dei vertici dell'elemento; così facendo, il cedimento si sposta, favorevolmente, verso il centro dell'assieme, diventando più graduale e progressivo. Al contrario, la presenza di ulteriori elementi interni implica un'ottima capacità di sorreggere il carico e un notevole incremento delle proprietà resistenziali, pari a circa il doppio rispetto a quelle garantite dall'accorgimento legato ai raggi di raccordo, ma, d'altra parte, la stabilità complessiva viene drasticamente ridotta, l'assorbimento energetico è scadente e non si verifica alcun cambiamento positivo nella modalità di frattura rispetto al caso classico.

È bene ricordare che le due relazioni analitiche definite nella (1.4) e nella (1.5) non sono rivolte esplicitamente a cogliere i dettagli geometrici caratteristici del sistema, ma segnalano solamente un'avvenuta modificazione del rapporto  $\rho / \rho_s$ . D'altra parte, esse non hanno interesse a mettere in luce quale parametro sia stato modificato, se  $t$ ,  $L$  o una combinazione dei due, poiché, ai fini del risultato, queste strategie sono equivalenti. Ovviamente, questo modello è molto semplice e permette di fare delle considerazioni generali e approssimative, ma non è adeguato a studiare nel dettaglio, ad esempio, i meccanismi di cedimento, poiché troppo approssimativo. In questo senso viene soppiantato da dei paradigmi basati sulla teoria della trave, i quali risultano molto più robusti rispetto alla semplice relazione tra grandezze. Tuttavia, questi ultimi si adattano bene e rimangono circoscritti a geometrie specifiche e scarsamente complesse come quelle a nido d'ape e quelle espanse.

### ***1.3 – Metodi di processazione e produzione***

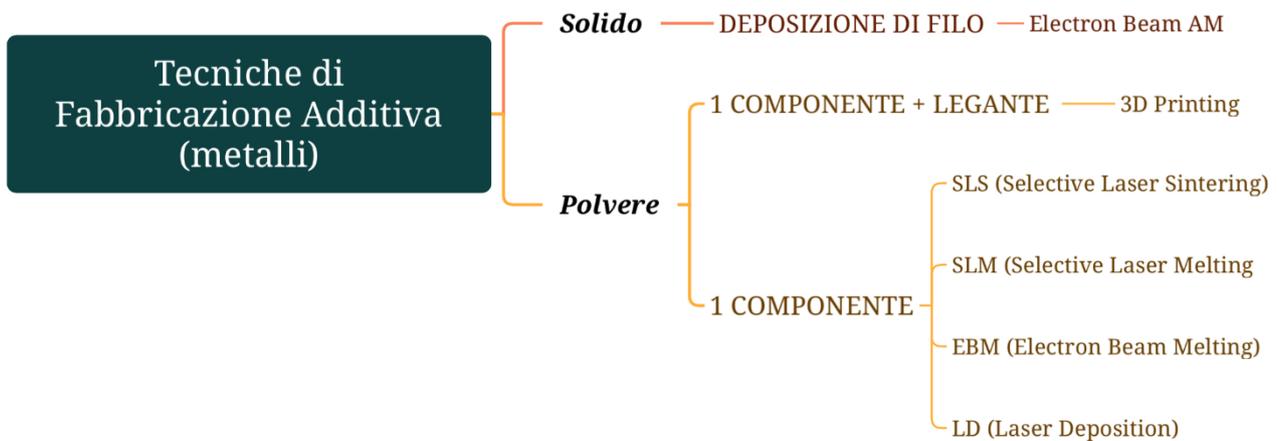
L'avvento ed il successivo perfezionamento delle molteplici tecnologie additive, intrinsecamente legate, come mostrato in **Figura 1.10**, alla tipologia di precursore utilizzato, ha consentito la fabbricazione tridimensionale di oggetti dotati di forme molto complesse e di design topologicamente ottimizzati, difficilmente replicabili con le tecniche tradizionali, o comunque con un notevole risparmio in termini di tempi e di costi effettivi [17].

Nelle processazioni AM il pezzo finale viene realizzato a partire da un modello CAD seguendo una strategia di sovrapposizione di layer successivi, la quale garantisce simultaneamente sia un incremento dell'efficienza, della funzionalizzazione, dell'alleggerimento e dell'integrità del

manufatto, sia una notevole riduzione della perdita effettiva di materiale e dell'energia impiegata per portare a termine la lavorazione.

La flessibilità intrinseca di queste operazioni permette di utilizzare materiali differenti sulla stessa parte, di prevedere all'interno dello stesso componente opportuni gradienti di densità e di fabbricare profili articolati come canali di raffreddamento e solidi cellulari di pressoché qualunque famiglia analizzata nella *Sez. 1.1* con elementi di dimensione variabile e limite inferiore nell'ordine del mm. Ovviamente, in quest'ultimo caso, devono essere adottati opportuni accorgimenti per poter portare a termine il processo senza intoppi; pertanto, il sistema viene provvisto di supporti solubili o staccabili, oppure, qualora tale configurazione non fosse perseguibile, è necessario sfruttare strutture autoportanti. Infatti, la rimozione dei supporti in componenti di questa tipologia risulterebbe molto difficoltosa, richiederebbe molto tempo e potrebbe provocare il deterioramento della finitura superficiale [18].

Nonostante i numerosi vantaggi, le tecniche additive mostrano anche degli aspetti negativi, tra cui la ridotta velocità di processo e l'inapplicabilità su pezzi in larga scala poiché il volume della camera di lavoro definisce il limite massimo raggiungibile dal punto di vista dimensionale.

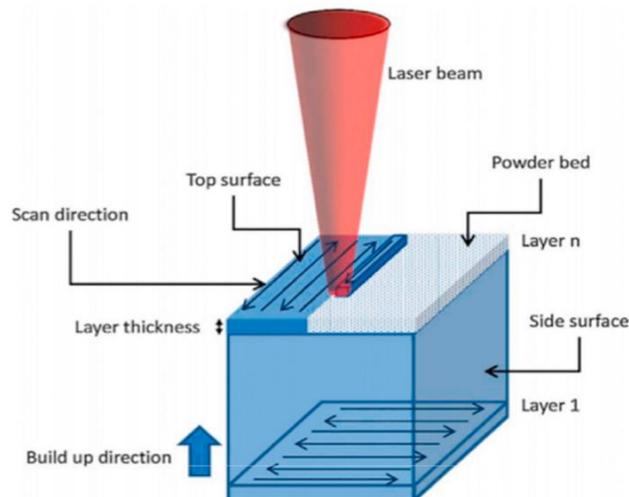


**Figura 1.10.** *Classificazione delle tecnologie additive in base al precursore utilizzato.*

In tutte le tecnologie a letto di polvere, note anche con il nome di Powder Bed Fusion, la dimensione dei granuli, la strategia di scansione, la dimensione dello spot, l'orientamento delle parti in macchina e i parametri di stampa influenzano il ciclo termico a cui il componente è sottoposto, e quindi anche la sua microstruttura, la geometria, la qualità e le proprietà meccaniche sia in condizioni statiche che dinamiche. Nel caso di strutture trabecolari, questi aspetti si riflettono sulle dimensioni delle singole celle, sulla coesione particellare e quindi, sulle proprietà meccaniche finali; di norma, se la dimensione delle particelle e dello spot sono ridotti, si riescono ad ottenere singole unità più piccole.

### 1.3.1 – Laser Powder Bed Fusion (LPBF)

Una metodologia adoperata ricorrentemente in molteplici settori industriali, tra cui quello automotive, e nell'ambito della fabbricazione delle architetture leggere, è quella del Laser Powder Bed Fusion (LPBF), il quale sfrutta, come si può osservare in **Figura 1.11**, un flusso di fotoni ad alta energia come sorgente per fondere il letto di polvere.

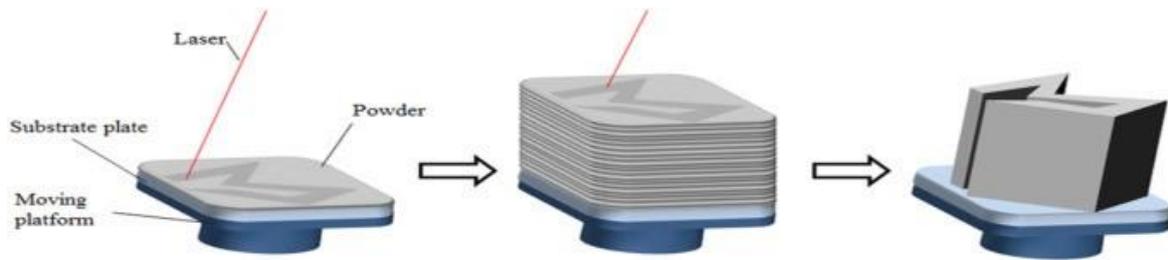


**Figura 1.11.** Schema semplificato LPBF [19].

Questa pratica, che avviene all'interno di una camera in atmosfera controllata, garantisce la produzione di parti dotate di ottime proprietà meccaniche, di un elevato rapporto rigidità/peso e di un'alta densità, approssimativamente pari al 100% e quindi con un contenuto trascurabile di vuoti.

In input alla macchina viene fornito il modello in formato STL (Standard Triangulation Language) dell'oggetto da realizzare che può essere anche molto complicato a livello di geometria. Il processo, come mostrato in **Figura 1.12**, prevede la deposizione del primo strato di polvere sopra ad una piattaforma mobile mediante l'aiuto di un coltello distributore, a cui segue la fusione del layer con un raggio laser guidato nella traiettoria da un computer. Una volta fatto raffreddare il primo strato, la piattaforma di lavoro si abbassa e il re-coater distribuisce ed omogenizza un nuovo spessore di particelle che vengono fuse a loro volta; il meccanismo si ripete fino al completamento della geometria.

In generale, la temperatura della camera di lavoro è mantenuta abbastanza alta da ridurre al minimo lo shock termico sul componente che provocherebbe un notevole incremento delle tensioni residue durante il processo fusorio; per questo motivo, anche la piattaforma viene comunemente preriscaldata fino a temperature di 250-300°C.



**Figura 1.12.** Fasi successive di un processo Laser Powder Bed Fusion.

Inoltre, al fine di limitare fenomeni indesiderati di ossidazione ed infragilimento e per favorire la rimozione della polvere non fusa, aspetto che limita fortemente il range di dimensioni minime e massime di una cella unitaria nei reticoli trabecolari, si insufflano direttamente nella zona di processazione dei gas come azoto o argon.

Sebbene le tecniche LPBF assicurino vantaggi significativi rispetto alle lavorazioni tradizionali, la qualità superficiale dei manufatti “as-built” è abbastanza bassa tanto da richiedere successive operazioni di post-processo; questa condizione è dettata principalmente da difetti esterni legati all’adesione particellare e da impurezze interne, tra cui si annovera il fenomeno noto con il nome di “balling”, il quale si verifica a seguito di una distribuzione non uniforme ed irregolare della radiazione che favorisce l’impacchettamento più o meno marcato della polvere metallica durante la fase di riscaldamento. Ovviamente, come auspicabile, i parametri che devono essere tenuti sotto controllo sono l’energia del fascio di fotoni e la durata dell’irradiazione.

Un parametro di notevole importanza per la definizione delle caratteristiche finali associabili al componente, quali densità, contenuto di porosità e meccanismo di formazione dei difetti, è la Densità Energetica del Laser (Laser Energy Density, LED), nota comunemente anche con il nome di energia di volume o di densità volumetrica di energia, la quale, come mostrato nella (1.6), dipende dalla combinazione dei quattro parametri di stampa principali, ovvero la potenza del laser  $P$  [W], la velocità di scansione del laser  $v$  [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ], la distanza tra due scansioni successive o hatch distance  $h$  [mm] e lo spessore dello strato di polveri o layer thickness  $d$  [mm]:

$$\text{LED} = \frac{P}{v \cdot h \cdot d} \quad [\text{J} \cdot \text{mm}^{-3}] \quad (1.6)$$

L’utilizzo di potenze ridotte può causare la mancata ri-fusione dei layers, con conseguente minor adesione e formazione di porosità nell’oggetto. Al contrario, incrementando la potenza del laser si registra un notevole aumento della densità del prodotto finito poiché il flusso di calore riesce a penetrare più in profondità. Tuttavia, questa relazione non è monotona poiché valori troppo alti di  $P$  [KW], contestualmente alle massime quantità erogabili dalle classiche apparecchiature industriali,

potrebbero provocare la vaporizzazione di alcuni degli elementi di lega, determinando una nuova riduzione di densità [20].

La velocità di scansione, che rappresenta la rapidità con cui il fascio laser si muove, possiede un effetto diametralmente opposto rispetto a quello definito dalla grandezza precedentemente menzionata, dato che un suo valore elevato limita fortemente il tempo di scansione del laser, ovvero il periodo di interazione con la superficie, causando la mancata ri-fusione degli strati. D'altro canto, però, questo valore non può essere nemmeno troppo basso perché altrimenti il laser verrebbe mantenuto per troppo tempo fisso nel medesimo punto, provocando l'inglobamento dei gas e il conseguente aumento del tasso di porosità.

A seguito dell'incremento dell'hatch distance si assiste ad un aumento del grado di avanzamento del processo e, quindi, della produttività. Dato che il laser lavora su delle aree circolari, solitamente le zone più esterne sono dotate di un'energia inferiore rispetto a quelle centrali: ciò significa che le prime non vengono fuse completamente, ragion per cui le tracce di scansione devono essere parzialmente sovrapposte l'una all'altra almeno del 50%.

Infine, maggiore è lo spessore dello strato di polveri e più veloce è il processo produttivo, poiché, a parità di altezza, sono richiesti meno strati. Si può dimostrare però come l'impatto di questo parametro sulle proprietà meccaniche finali dei componenti sia inferiore se confrontato con gli altri; per tale motivo, vengono definiti dei valori standardizzati ed univoci che si assestano generalmente dai 0,01 mm ai 0,04 mm.

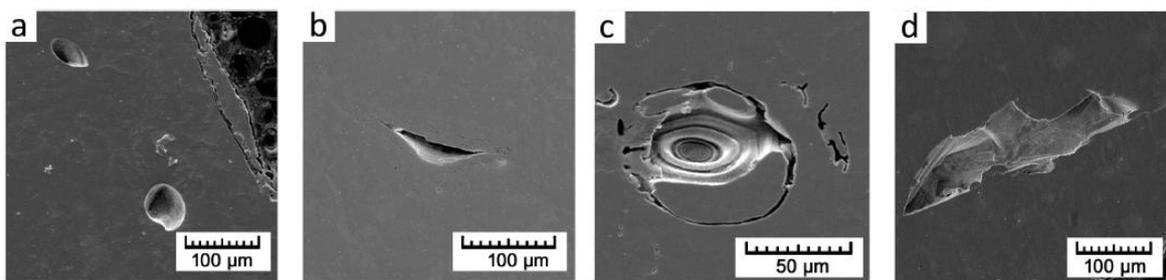
In **Tabella 1.2** sono stati riportati i range di valori che, generalmente, vengono associati alle quattro grandezze sopramenzionate nel caso di componenti in acciaio inox austenitico AISI-316L, ovvero il materiale di cui sarà composto il giunto pin-collar riprogettato dal punto di vista geometrico e funzionale nei capitoli successivi.

**Tabella 1.2.** *Classici parametri di processo impiegati per componenti in AISI-316L.*

	<b>AISI-316L</b>
$P [W]$	100 – 150
$v [mm \cdot s^{-1}]$	500 – 900
$h [mm]$	0,05 – 0,07
$d [mm]$	0,02

Come dimostrato da Ceschini et. al [21], la combinazione dei dati riportati in **Tabella 1.2** deve essere tale da garantire che l'energia di volume sia superiore a  $100 \text{ J/mm}^3$  affinché si possano ottenere manufatti con densità complessiva maggiore del 98%. Inoltre, all'interno del prodotto finito, in funzione dei parametri di processo scelti, si possono manifestare impurità dissimili, raggruppabili, come riportato in **Figura 1.13**, in quattro categorie principali:

- bolle sferiche di gas o porosità (a), strettamente dipendenti anche dalla morfologia e dalla dimensione delle particelle di polvere, oltre che dalla quantità di gas assorbita. Durante la fusione, questi vapori formano delle vere e proprie bolle che rimangono successivamente imprigionate nel materiale durante la fase di solidificazione.
- ritiro durante fase di solidificazione (b), causato principalmente dalla differente velocità di raffreddamento tra la zona superficiale e quella sub-superficiale.
- keyhole (c), ovvero una specie di cratere che si origina quando l'energia indirizzata in un punto specifico è così alta da far evaporare tutta la parte fusa o alcuni dei suoi costituenti, con la conseguente formazione di grandi bolle che rimangono intrappolate al di sotto della superficie.
- difetti di mancata fusione (d), i quali si verificano quando l'energia utilizzata è troppo bassa, tanto che solo una piccola parte del materiale passa dallo stato solido a quello liquido.



**Figura 1.13.** Possibili difetti presenti all'interno di un prodotto finito [20].

A causa della modalità di lavorazione per layer successivi e dei cambiamenti locali nella microstruttura dei materiali, la distribuzione dei difetti lungo la direzione di fabbricazione (“building direction”) è fortemente disomogenea. Il fenomeno in questione è responsabile del fatto che la porosità nella parte superiore del campione risulta quasi sempre circa due volte inferiore rispetto a quella presente alla sua base, ragion per cui le proprietà meccaniche ottenute sono anisotrope, ovvero dipendenti dalla direzione lungo cui vengono considerate [22].

Ponendo l'attenzione sui solidi cellulari realizzati con la tecnica SLM, si notano delle discrepanze esistenti tra il modello CAD di partenza ed il pezzo finale perfino più accentuate rispetto alla

corrispettiva geometria piena poiché, date le piccole dimensioni delle strutture e dei singoli elementi, le irregolarità superficiali a gradino, denominate “stair-step”, divengono molto più accentuate; per migliorare tale situazione è quindi opportuno prevedere delle mirate operazioni post-processo.

Dong et al. [23] hanno mostrato come l’incisione chimica, compiuta attraverso opportune soluzioni modellabili in funzione dell’attitudine del materiale a farsi attaccare, permette di rimuovere una certa quantità di polvere non fusa dalla superficie del pezzo, determinando un netto incremento della rigidità complessiva del sistema e delle proprietà legate alla deformazione, quali allungamento a rottura e tenacità. Inoltre, la qualità superficiale ottenuta è più alta e la propagazione delle cricche viene ritardata. D’altra parte, però, questo processo di erosione deve essere opportunamente controllato per evitare che lo spessore effettivo degli elementi trave si riduca troppo.

Alternativamente, come mostrato da Gorny et al. [24], conseguire dei trattamenti termici a valle della realizzazione di una struttura trabecolare con celle cubiche in lega di titanio  $Ti_6Al_4V$ , favorisce la diffusione ed il movimento delle dislocazioni, ottimizza il rilassamento degli sforzi e allarga verso destra la curva tensione-deformazione, aumentandone l’area sottesa e dunque l’energia assorbita a compressione. L’incremento di tenacità consente l’adattamento, in corrispondenza della superficie di contatto, di tutte quelle direzioni di carico non definite in modo completo, scongiurando possibili fenomeni di cedimento, comuni nei profili non trattati. Inoltre, nel caso specifico di leghe di Ti, grazie all’atmosfera ricca di ossigeno ed azoto presente nella camera di lavoro, viene favorita la crescita della fase  $\beta$  stabilizzante. In sintesi, il TT porta alla formazione di una microstruttura direzionale e dotata di parti lamellari e globulari più piccole.

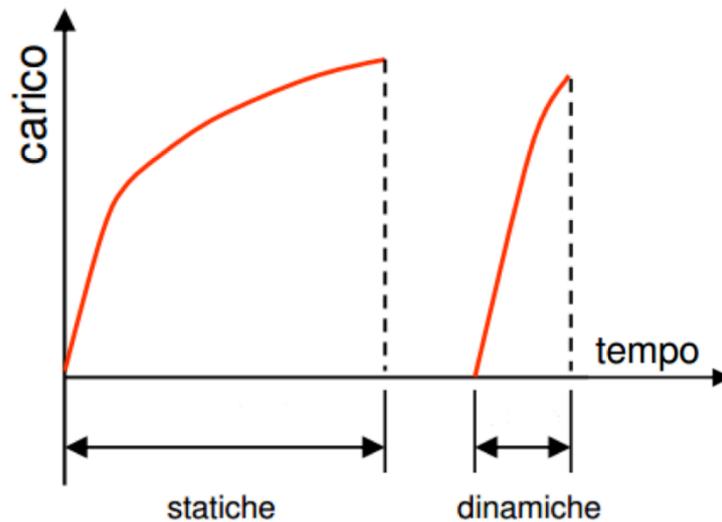
## CAPITOLO 2 – Analisi dinamica

I recenti progressi tecnologici hanno reso necessaria una comprensione più ampia riguardo il comportamento dei materiali in condizioni dinamiche, ovvero quando il carico viene applicato, grazie ad una certa attrezzatura, in un intervallo di tempo molto breve. I meccanismi alla base di questi studi sono altamente specifici e differiscono enormemente da quelli che valgono in contesti statici o quasi-statici. Infatti, i fenomeni inerziali e quelli cinetici assumono un'importanza rilevante e, pertanto, non possono più essere trascurati. Inoltre, la deformazione di un corpo in regime dinamico viene attribuita alla propagazione all'interno del sistema, come una vera e propria onda, dell'effetto provocato dall'applicazione del carico esterno dalle aree più vicine alla zona di contatto, verso le porzioni più lontane. Al contrario, la modificazione strutturale associata a carichi statici o quasi-statici è legata, più semplicemente, ad una sequenza di stati di equilibrio dei singoli elementi costituenti, i quali possono essere trattati grazie alle classiche equazioni della meccanica del continuo (somma delle forze e dei momenti attorno ad un polo uguali a zero, compatibilità degli spostamenti e relazioni costitutive).

### 2.1 – Generalità

Come definito da Zukas [26] e riportato in *Figura 2.1* si possono riconoscere rispettivamente:

- processi statici, i quali si svolgono in range abbastanza lunghi ( $10^{-4}$  – 10 s) o con velocità estremamente basse, vedono la loro trattazione completamente svincolata dalla dipendenza con il tempo in quanto si raggiungono velocemente le condizioni di stazionarietà. Tale presupposto è perseguibile, ad esempio, quando viene applicato alla struttura un carico costante o quasi costante.
- processi dinamici, i quali si svolgono in range così brevi ( $10^{-2}$  –  $10^{-8}$  s) che diventa fondamentale considerare la dipendenza con il tempo e con altri fattori come l'inerzia; questa volta, infatti, si deve ricorrere ad un modello che sia in grado di valutare non solo gli effetti a regime, ma anche, e soprattutto, quelli durante il transitorio. In questo caso, il tempo caratteristico può variare notevolmente in funzione della tecnica e dell'attrezzatura utilizzata per l'applicazione del carico.

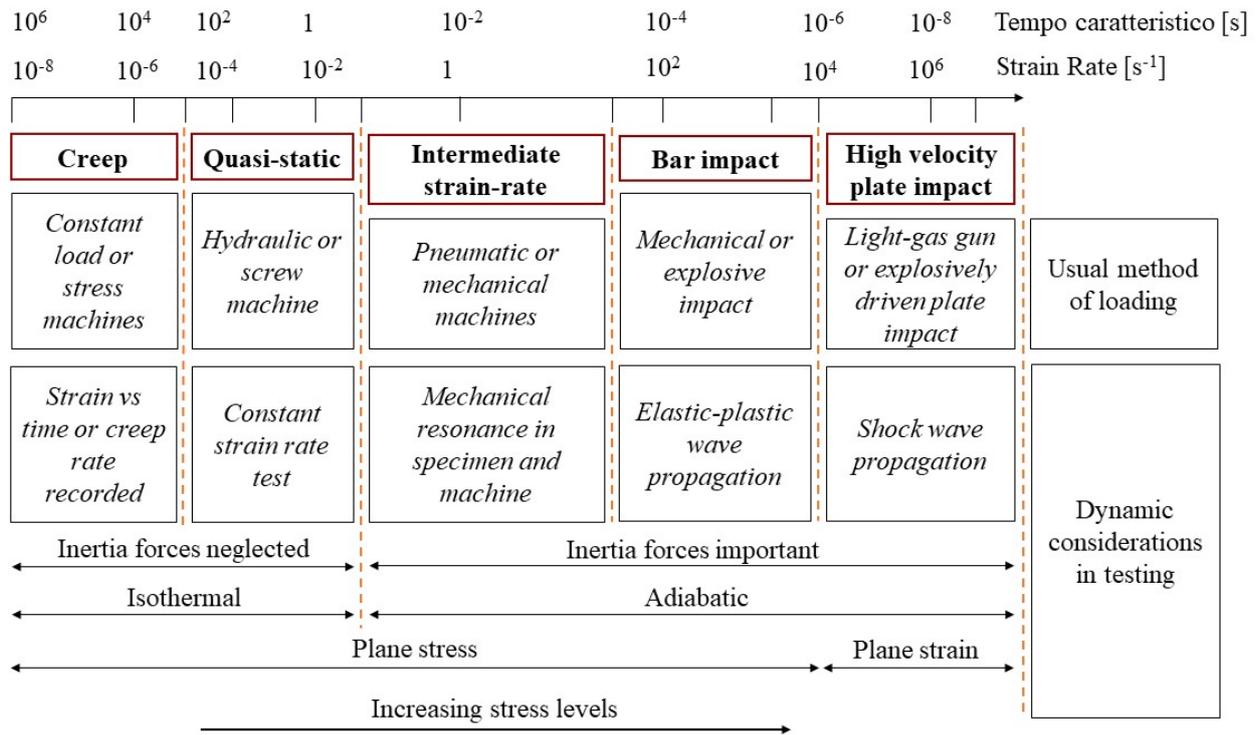


**Figura 2.1.** Differenza nella durata tra le prove statiche e quelle dinamiche.

In **Figura 2.2** è stata riportata una classificazione riguardante le possibili tipologie di processi in funzione sia del tempo caratteristico, sia dello strain-rate, la cui dimensione nel SI è il  $[s^{-1}]$ ; tale grandezza, definita in meccanica come la derivata temporale della deformazione ( $\epsilon$ ) [25], è riportata di seguito nella (2.1):

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \rightarrow [s^{-1}] \quad (2.1)$$

Per bassissimi livelli di velocità di deformazione, la problematica principale è il comportamento a creep del materiale, soprattutto per applicazioni ad alta temperatura; man mano che i valori di  $\dot{\epsilon}$  aumentano, si deve tenere conto del possibile effetto, a volte anche molto rilevante, che tale grandezza possiede sulle caratteristiche resistenziali del componente. Contestualmente a quanto detto, gli effetti legati alla propagazione ondulatoria all'interno del materiale diventano sempre più importanti, motivo per cui i fenomeni in gioco sono adiabatici anziché isotermi. Tanto più questo comportamento è accentuato, tanto maggiore è la possibilità di una vaporizzazione esplosiva dei materiali in collisione.



**Figura 2.2.** Classificazione dei fenomeni al variare dello strain-rate e della durata di applicazione del carico [26].

## 2.2 – Studio del fenomeno della propagazione ondulatoria nei materiali

Nella dinamica di un corpo rigido l'applicazione di una forza si traduce, oltre che in un'accelerazione lineare di ogni suo punto, anche in un moto angolare attorno al centro di massa. In sostanza, gli effetti della sollecitazione si diffondono in maniera pressoché istantanea ed impulsiva lungo tutta la struttura; pertanto, al fine di valutarne gli effetti in maniera approfondita, è necessario considerare la propagazione delle onde di tensione nei corpi soggetti a questo tipo di carico. Tale fenomeno implica la presenza di scambi energetici, che vengono in parte trasformati in calore a causa dei cosiddetti attriti interni, in cui si riconoscono sia i fenomeni di isteresi, sia quelli di viscosità del materiale. Tuttavia, al fine di semplificare la trattazione dal punto di vista analitico, i modelli matematici vengono epurati da questo aspetto, riuscendo comunque a preservare la portata qualitativa dei risultati.

Un'onda viene definita come una perturbazione che nasce da una sorgente e si sviluppa nel tempo e nello spazio trasportando energia o quantità di moto, senza comportare un eccessivo spostamento di materia. Nonostante tale manifestazione sia di natura tridimensionale, per semplicità espositiva e per maggiore chiarezza, si fa riferimento al caso di onde longitudinali e monodimensionali (1D), di cui è ben nota l'equazione caratteristica [27], illustrata nella (2.2):

$$c^2 \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = f\left(u, \frac{\partial u}{\partial x}, x, t\right) \quad (2.2)$$

in cui:

- $u$  rappresenta lo spostamento.
- $c$  è la velocità di propagazione dell'onda, a sua volta definita nella (2.3):

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}} \quad (2.3)$$

Appare quindi evidente che l'evoluzione temporale del fenomeno dipenda intrinsecamente dalle caratteristiche del materiale; nel caso particolare in cui una sollecitazione sia uniassiale e non superi il carico di snervamento, la (2.3) può essere riarrangiata in funzione della legge di Hooke diventando la (2.4):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.4)$$

Al contrario, qualora il comportamento del materiale fosse elasto-plastico, ovvero venga applicato uno sforzo tale da superare la tensione di snervamento, si incorrerebbe nella formazione di due distinti fronti d'onda, ciascuno dei quali si propagherebbe alla propria velocità caratteristica, funzione della tangente locale alla curva tensione-deformazione. Si può dimostrare come le fluttuazioni caratterizzate da intensità maggiori si muovano a velocità minori; difatti, considerando il classico andamento di un diagramma  $\sigma$ - $\varepsilon$ , è possibile asserire come il fronte d'onda elastico si propaghi molto più velocemente di quello plastico. Un discorso analogo può essere fatto nel caso di uno stato di deformazione uniassiale che non superi il limite elastico; ricordando che le relazioni di base sono diverse, è possibile giungere al risultato riportato nella (2.5), in cui  $\nu$  rappresenta il coefficiente di Poisson:

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2.5)$$

Contrariamente a quanto avviene in uno stato di sforzo assiale, il fronte d'onda elastico non possiede una velocità di propagazione troppo diversa da quella che si registra in campo plastico.

- $f$  è una funzione di carico generalizzata che dipende dallo spostamento, dalla velocità di propagazione ( $c$ ) e da quantità temporali ( $t$ ) e spaziali ( $x$ ).

La relazione definita dalla (2.2) è un classico esempio di equazione differenziale alle derivate parziali lineare, omogenea e del secondo ordine. Ricordando la forma generale di una EDP di questa tipologia, riportata nella (2.6), è possibile operare una classificazione che dipende esclusivamente dai coefficienti delle derivate di ordine massimo presenti nell'equazione stessa (2.7) (2.8) (2.9). Pertanto, è possibile scrivere:

$$A \frac{\partial^2}{\partial x^2} + B \frac{\partial^2}{\partial x \partial t} + C \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \dots = 0 \quad (2.6)$$

Ricordando che:

$$B^2 - 4AC > 0 \rightarrow \text{Iperbolica} \quad (2.7)$$

$$B^2 - 4AC < 0 \rightarrow \text{Ellittica} \quad (2.8)$$

$$B^2 - 4AC = 0 \rightarrow \text{Parabolica} \quad (2.9)$$

In questo caso particolare è facilmente ottenibile che:  $A = C_0^2$ ,  $B = 0$ ,  $C = -1$ , pertanto si è in presenza di un'equazione iperbolica, che può essere risolta sia attraverso un'analisi modale, sia attraverso un approccio chiamato progressivo, in cui si considerano le fluttuazioni in movimento. La prima tecnica citata si basa sulla ricerca dei modi liberi e non smorzati della struttura, comunemente noti con il nome di autovettori. Una volta determinati gli autovettori ed i corrispondenti autovalori ( $\omega_i$ ), la soluzione può essere scritta come riportato nella (2.10), in cui si può apprezzare la separazione delle variabili spaziali da quelle temporali:

$$u = \sum_i A_i \sin(\omega_i t) \sin\left(\frac{\omega_i x}{c}\right) \quad (2.10)$$

Tale metodo risulta molto efficace quando la struttura presenta un numero ridotto di modi dominanti, generalmente riconducibili alle prime armoniche; d'altra parte, quando il sistema si complica, gli oneri computazionali aumentano notevolmente, tanto che si preferisce passare al metodo che considera le onde come perturbazioni che si muovono all'interno del materiale. In questo senso la soluzione assume la forma riportata nella (2.11):

$$\psi = f(x - ct) + g(x + ct) \quad (2.11)$$

Le funzioni  $f$  e  $g$  presenti sono arbitrarie, ma devono soddisfare i requisiti di continuità, di piccola ampiezza e quelli imposti dalle condizioni al contorno.

Quando un'onda di sollecitazione distorsionale o dilatazionale raggiunge una superficie libera di un corpo all'interno del quale sta viaggiando viene riflessa; nel caso di una sezione non vincolata in cui non sono applicate forze, lo sforzo normale risultante deve essere necessariamente nullo. Pertanto, l'impulso riflesso dovrà essere sempre di segno opposto rispetto a quello incidente; di conseguenza, una qualunque perturbazione di trazione viene riflessa in una omologa di compressione, e viceversa. Ovviamente, nella zona in cui queste si sovrappongono, le velocità delle singole particelle e, di conseguenza, anche gli spostamenti sono di valore doppio rispetto a quelli generati dal singolo fenomeno. Analogamente, si può affrontare il caso in cui l'onda venga riflessa da una superficie vincolata, tenendo conto, ovviamente, che in questo caso sono lo spostamento e la velocità complessivi ad essere nulli, mentre la tensione risulta doppia rispetto a quella creata dai singoli impulsi.

### ***2.3 – Tecniche sperimentali per indurre deformazioni dinamiche***

Nei test dinamici, al fine di perseguire una caratterizzazione il più completa possibile, di solito, viene analizzata la risposta di uno stesso componente in funzione di diversi regimi di velocità e configurazioni di prova. Nel caso in cui le velocità richieste dal processo siano basse, si prediligono apparecchiature come la Drop Weight Machine (detta anche prova “Pellini” – normativa di riferimento: ASTM E208), mentre, se sono richieste velocità maggiori, allora si deve ricorrere, ad esempio, allo Split Hopkinson Bar Test. In **Figura 2.3** è stata riportata una classificazione dettagliata delle varie prove in funzione dei valori di strain-rate che possono essere perseguiti.

Ad ogni modo, dai dati sperimentali ottenuti a valle di questi processi, è necessario costruire, attraverso un processo a ritroso, un modello costitutivo che sia in grado di rappresentare il comportamento del materiale attraverso un numero limitato di parametri, così da raggiungere un compromesso ottimale tra i tempi di messa a punto e l'accuratezza della descrizione.

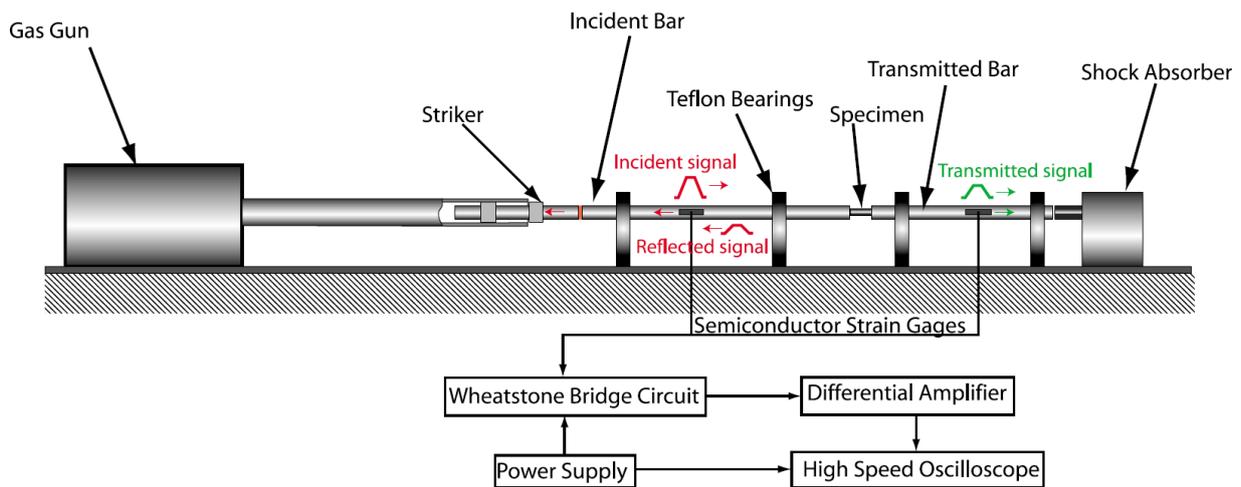
STRAIN-RATE [ $s^{-1}$ ]	COMMON TESTING METHODS	DYNAMIC CONSIDERATIONS	
$10^5 - 10^7$	<i>High velocity impact</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>Explosive, normal or inclined plate impact, pulsed laser</li> </ul>	<i>Shock (shear) wave propagation</i>	Inertial Forces Important
$10^3 - 10^5$	<i>Dynamic – high</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>Taylor test, Hopkinson bar or expanding ring</li> </ul>	<i>Plastic wave propagation</i>	
$1 - 10^3$	<i>Dynamic – low</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>High velocity hydraulic, pneumatic machines, or cam plastometer</li> </ul>	<i>Mechanical resonance in specimen and machine is important</i>	
$10^{-5} - 1$	<i>Quasi – static</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>Hydraulic, servo - hydraulic or screw-driven testing machines</li> </ul>	<i>Tests with constant cross-head velocity stress throughout the length of the specimen</i>	Inertial Forces Negligible
$10^{-8} - 10^{-5}$	<i>Creep and stress-relaxation</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>Conventional testing machines or creep testers</li> </ul>	<i>Visco-plastic response of metal</i>	

**Figura 2.3.** Classificazione dei test meccanici in funzione dei valori di strain-rate [25].

### 2.3.1 – Split Hopkinson Bar Test (SHBT)

La barra di Hopkinson rappresenta sicuramente la tecnica sperimentale più comune per indagare le leggi costitutive dei materiali sottoposti a valori di strain rate contenuti nel range  $10^3 - 10^5 s^{-1}$  [25]. In origine, questa tecnologia era stata pensata solamente per realizzare prove di compressione, ma negli anni si sono sviluppate delle varianti rispetto all’attrezzatura standard che ne hanno reso possibile l’utilizzo anche per test di trazione, taglio e torsione. Pur essendo i materiali metallici quelli maggiormente esaminati, ad oggi si riescono a caratterizzare facilmente anche polimeri, ceramici e compositi.

Il principio di funzionamento è basato sull’assunzione che nel provino e nelle barre che costituiscono il sistema di prova si realizzi uno stato di tensione uniassiale. L’apparecchiatura utilizzata per la prova di compressione è composta da tre elementi cilindrici coassiali come evidenziato in **Figura 2.4**, oltre alla necessaria strumentazione per raccogliere i dati sperimentali.

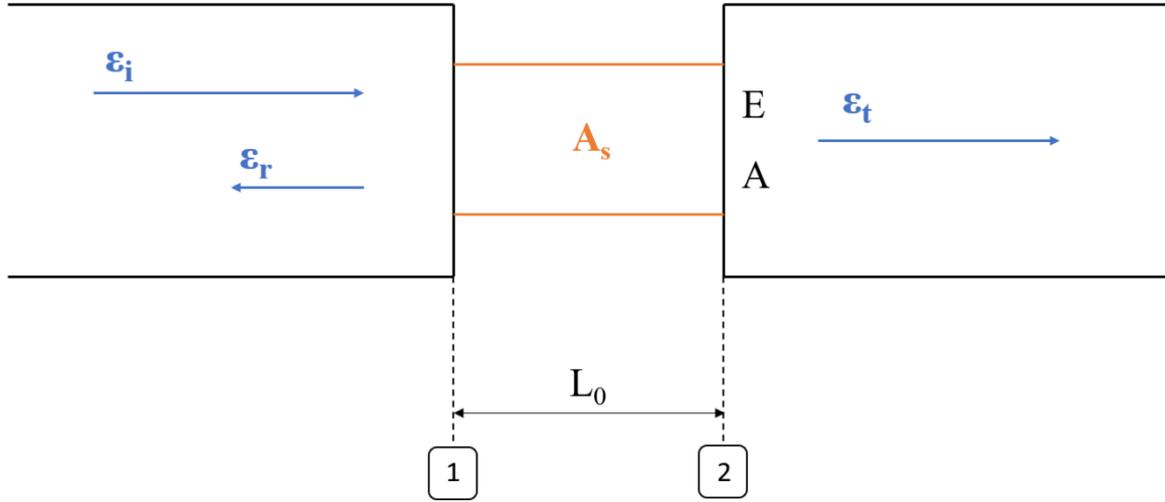


**Figura 2.4.** Schema dell'attrezzatura sperimentale della Hopkinson Bar [28].

Il campione, generalmente cilindrico, viene posizionato accuratamente tra la barra incidente, nota anche con il nome di input bar, e quella trasmittente, denominata altresì output bar. Una volta compiuto questo step, si provvede all'accelerazione, mediante un sistema a molla o attraverso una pistola a gas, dell'elemento impattante ("striker" in **Figura 2.4**), il quale colpisce l'unità incidente generando una perturbazione di compressione che si propaga in tutta la zona, fino a raggiungere il provino. È buona norma, per evitare sovrapposizioni tra il segnale incidente e quello riflesso, che l'unità d'attacco non sia lunga più della metà dell'input bar.

In generale, solamente una quota parte dell'impulso incidente viene effettivamente trasmesso all'elemento terminale a causa dei fenomeni di riflessione che si registrano in corrispondenza delle due interfacce di riferimento. Lo stato di tensione e di deformazione plastica impartito al campione può essere ricavato a partire dalla conoscenza dei segnali di natura elastica che si sviluppano nei corpi limitrofi ad esso, grazie a due estensimetri posizionati circa a metà della loro lunghezza.

La **Figura 2.5** mostra una schematizzazione delle due interfacce provino-barre e riporta i vari tipi d'impulso che si originano, ovvero quello incidente ( $\epsilon_i$ ) quello riflesso ( $\epsilon_r$ ) e quello trasmesso ( $\epsilon_t$ ). Da un punto di vista analitico, per rendere più semplice e intuitivo il modello costitutivo, si considera che la barra d'ingresso e quella d'uscita siano realizzate con lo stesso materiale e che presentino la stessa sezione.



**Figura 2.5.** Schematizzazione degli impulsi all'interfaccia barre-provino [26].

Ricordando che la velocità di propagazione delle onde elastiche ( $c$ ) è definita dalla relazione (2.4) che i pedici 1 e 2 rappresentano le sezioni del provino, si possono ricavare gli spostamenti delle relative estremità, come fatto nella (2.12) e nella (2.13):

$$u_1(t) = \int_0^t c \varepsilon_1(\tau) d\tau = c \int_0^t [\varepsilon_i(\tau) - \varepsilon_r(\tau)] d\tau \quad (2.12)$$

$$u_2(t) = \int_0^t c \varepsilon_2(\tau) d\tau = c \int_0^t \varepsilon_t(\tau) d\tau \quad (2.13)$$

A questo punto si può far riferimento alla consueta definizione della deformazione media nel provino ottenendo la (2.14):

$$\varepsilon_{\text{med,comp}}(t) = \frac{u_1(t) - u_2(t)}{L_0} = \frac{c}{L_0} \int_0^t [\varepsilon_i(\tau) - \varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_t(\tau)] d\tau \quad (2.14)$$

Infine, noti oltre all'area del provino testato ( $A_s$ ), anche il modulo elastico ( $E$ ) e la sezione trasversale delle due barre di Hopkinson ( $A$ ), si possono scrivere, sfruttando le relazioni tra i vari parametri, delle equazioni costitutive valide sia per la velocità di deformazione, sia per la tensione [25][31], come mostrato nella (2.15) e nella (2.16):

$$\sigma(t) = \frac{EA}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \quad (2.15)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{1}{L_0} \frac{d[u_1(t) - u_2(t)]}{dt} = \frac{c}{L_0} [\varepsilon_i(\tau) - \varepsilon_r(\tau) - \varepsilon_t(\tau)] \quad (2.16)$$

In sintesi, le equazioni (2.14), (2.15) e (2.16) indicano come sia possibile determinare tutti i parametri d'interesse semplicemente tramite la conoscenza della perturbazione incidente, riflessa e trasmessa.

#### 2.4 – Comportamento dinamico dei solidi cellulari

Come descritto nel *Cap.1*, i solidi cellulari sono strutture multifunzionali che vengono favorevolmente impiegate per applicazioni in cui il componente di riferimento deve essere dotato di una spiccata capacità di assorbimento energetico. Pertanto, in questo paragrafo, nonostante in letteratura ci sia una conoscenza abbastanza limitata e contenuta sull'argomento, si vuole indagare, ed eventualmente valutare, l'effetto provocato dalla presenza di queste strutture leggere all'interno del sistema sollecitato dinamicamente, sia a bassa, ma soprattutto ad alta velocità.

Ozdemir et al. [29] hanno preso in esame tre tipologie di strutture trabecolari realizzate in Ti-6Al-4V, dotate di celle con geometria via via più complessa (BCC, a diamante e cubica a facce rientranti) e ne hanno caratterizzato il comportamento in funzione di differenti configurazioni di prova dello SHBT, di diversi valori di strain-rate e del numero di layer processati. In riferimento a quest'ultimo punto, si può constatare come i campioni multistrato garantiscano, in qualunque regime si operi, un assorbimento energetico e delle proprietà resistenziali, tra cui il modulo elastico e la resistenza a snervamento, migliori rispetto all'alternativa monostrato. In **Tabella 2.1** sono stati raccolti i dati ottenuti a valle di test quasi-statici, in cui la caratterizzazione del sistema è molto più rapida ed immediata. Una possibile spiegazione di questi risultati è intrinsecamente legata alla differente rigidità dei layer più interni rispetto a quelli più esterni, i quali risultano presumibilmente indeboliti da condizioni di contatto imperfette e da possibili fenomeni di instabilità.

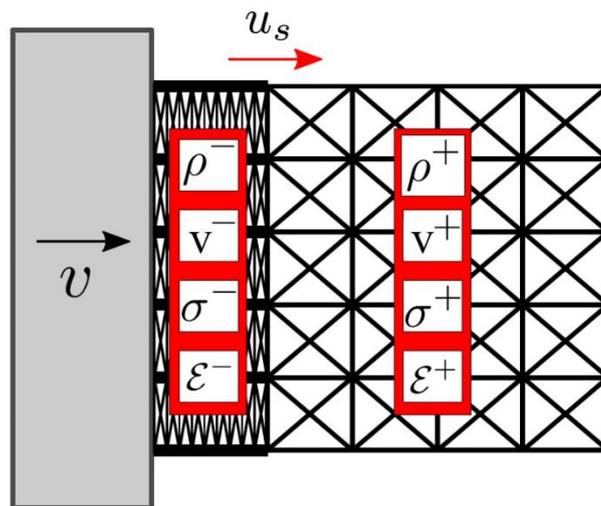
**Tabella 2.1.** Proprietà medie acquisite a valle di prove quasi-statiche [29].

Tipologia di Cella	n° layers	$\rho_{rel}$	E [MPa]	$\sigma_y$ [MPa]	En. assorbita [MJ / m <sup>3</sup> ]
<i>Diamante</i>	1	0,137	132,2	11,8	2,32
	5	0,137	399,5	21,3	8,39
<i>Cubica a facce rientranti</i>	1	0,166	126,6	10,8	1,65
	5	0,166	216,4	11,5	2,51

Dal punto di vista dinamico, analizzando più a fondo i campioni multistrato, si può facilmente asserire come la presenza di elementi trabecolari attenui significativamente il picco massimo di sollecitazione trasmessa ed estenda notevolmente la durata dell'impulso, sia per regimi di velocità ridotti, sia per quelli considerevoli. In più, il reticolo BCC e quello con forma a diamante si mostrano leggermente più efficienti, rispetto a quello con facce rientranti, nell'estendere l'intervallo attivo dell'impulso, essendo dotati di una densità relativa minore.

È bene sottolineare come per prove dinamiche corrispondenti a strain-rate pari all'incirca a  $10^3$  [s<sup>-1</sup>], similmente a quanto accade nell'analisi quasi-statica, la rottura degli strati di materiale avviene randomicamente e non in ordine sequenziale, poiché l'applicazione del carico risulta abbastanza lenta da determinare una distribuzione pressoché uniforme su tutta la geometria. L'ordine di cedimento è dunque connesso alla distribuzione delle imperfezioni e alla concentrazione delle irregolarità geometriche, le quali risultano molto più accentuate quando sono presenti elementi inclinati, ovvero nei casi in cui si predispongono angoli di fabbricazione diversi dai canonici 90°.

Al contrario, quando la velocità di deformazione assume valori nell'intorno di  $10^5$  [s<sup>-1</sup>], le cose cambiano drasticamente poiché inizia a registrarsi una forte localizzazione della deformazione, la quale successivamente si propaga, sottoforma di treno d'impulsi, come un'onda d'urto che compatta il materiale (**Figura 2.6**) [32]. Tale evento induce all'interno del sistema un certo grado di instabilità che mina la correttezza e limita la precisione della misurazione del moto dei corpi e della sollecitazione.



**Figura 2.6.** Schema 1D legato allo sviluppo di un'onda d'urto nelle strutture trabecolari [34].

In questo regime di strain-rate, oltre all'insorgenza di perturbazioni di shock, si assiste anche ad un sensibile incremento della resistenza complessiva grazie alla generazione di effetti micro-inerziali; strutture di tipo I, ovvero quelle caratterizzate da  $M < 0$ , risentono di tale fattore in maniera molto limitata, mentre quelle di tipo II, cioè quelle con  $M \geq 0$ , ne sono fortemente influenzate poiché presentano, nella curva tensione-deformazione, una fase nota con il nome di "softening" o ammorbidimento.

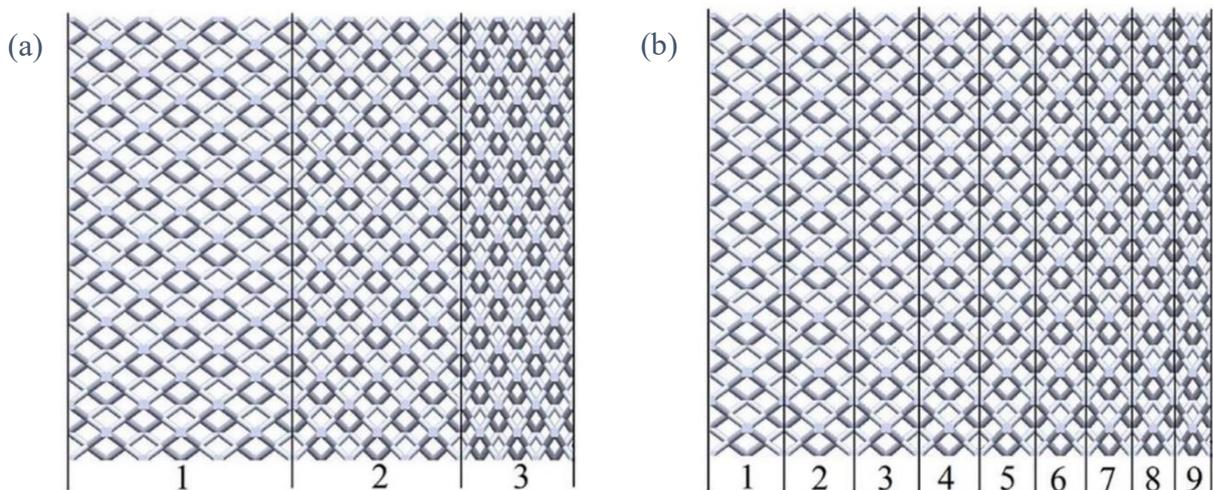
Analizzando i meccanismi di rottura, si nota un cedimento fragile in corrispondenza delle superfici limitrofe alla zona impattata, mentre le parti più lontane ne risentono marginalmente, e solo in un secondo momento; questo aspetto indica come la ripartizione del carico non sia omogenea. Inoltre, si potrebbero riscontrare anche dei leggerissimi effetti flessionali sugli elementi, presumibilmente verificatosi prima del cedimento vero e proprio poiché non si riscontra, a rottura, un duplice comportamento duttile-fragile [29]. Facendo un ulteriore passo in avanti in questa descrizione, è possibile sottolineare come gli effetti connessi alle impurità morfologiche perdano d'importanza e risultino sempre più trascurabili, al contrario di quelli dipendenti dalla geometria e dalle caratteristiche intrinseche al materiale di base che invece assumono particolare rilievo ed interesse.

Addentrando sempre più all'interno del campo iperveloce, ovvero in concomitanza di carichi impattanti o di intense esplosioni, i fenomeni analizzati in precedenza permangono, ma il modo in cui essi si manifestano diviene molto più severo, provocando scenari anche peggiori. Nel dettaglio, la pressione esercitata localmente può superare la resistenza del materiale in alcune aree, tanto da generare una possibile vaporizzazione esplosiva. Si ricorda che un impatto viene definito come l'interazione vicendevole dei vari corpi a contatto che può essere suddivisa in due fasi ben riconoscibili: la prima, nota con il nome di avvicinamento, intercorre tra il primo accostamento e l'istante in cui la velocità relativa si annulla consentendo la conversione della quota parte di energia cinetica nella componente di deformazione, e la seconda, detta anche fase di restituzione, risulta circoscritta alla liberazione dell'energia precedentemente accumulata fintanto che non si assiste al completo distacco delle entità.

Saremian et al. [30], invece, hanno compiuto degli esperimenti dinamici con  $\dot{\epsilon}$  attorno a  $10^3$  [ $s^{-1}$ ] partendo da polveri sferiche di AISI 316L, materiale molto comune nei processi LPBF per via dell'ottima processabilità, e hanno notato, anche in questo caso, una certa convergenza nel comportamento a deformazione con le analisi quasi-statiche, tenendo comunque presenti i diversi livelli di azione. Tuttavia, a differenza delle prove su leghe di Ti-6Al-4V, non si registra, in nessuna delle due circostanze, il completo cedimento delle strutture, rimarcando l'effetto benefico che i solidi cellulari determinano in questo tipo di situazioni. Quindi, dato che lo strain-rate è una proprietà

intrinseca della materia, la risposta delle strutture trabecolari è fortemente condizionata dalla sensibilità che tale parametro possiede sul materiale pieno di riferimento.

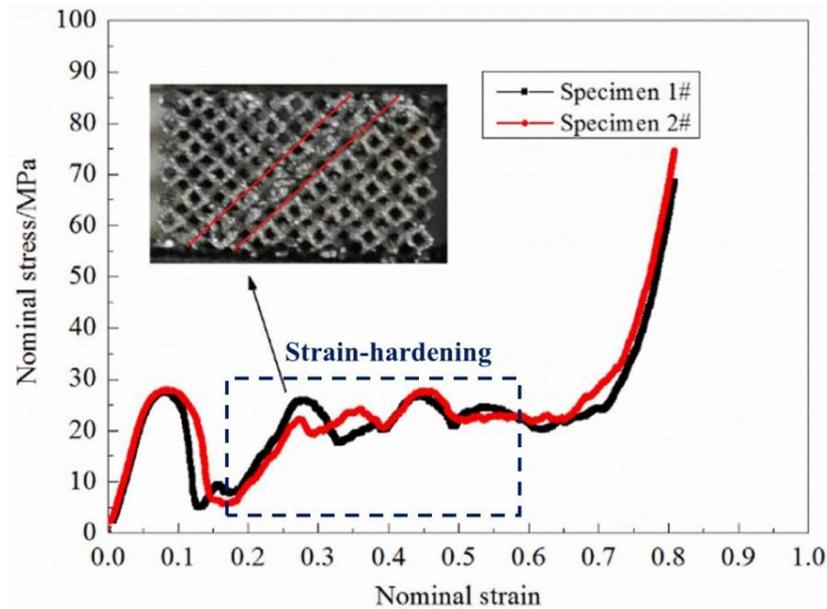
Al fine di migliorare globalmente il comportamento di un qualunque solido cellulare è plausibile ricorrere alle cosiddette strutture progressive, in cui, invece di una ripetizione canonica di unità elementari equispaziate, si tende a mantenere costante solamente il diametro degli elementi, mentre vengono modificate localmente sia la distribuzione che la dimensione delle singole celle, ritoccando così la densità relativa. In questa nuova metodologia di studio, il cui schema esemplificativo è mostrato in **Figura 2.7**, nasce la necessità di rapportarsi ad un nuovo parametro, ovvero il gradiente di densità, il quale può essere più o meno accentuato, provocando quindi cambiamenti più o meno repentini nelle proprietà meccaniche di layer adiacenti.



**Figura 2.7.** Esempi di gradienti di densità: (a) variazione repentina, (b) variazione graduale [31].

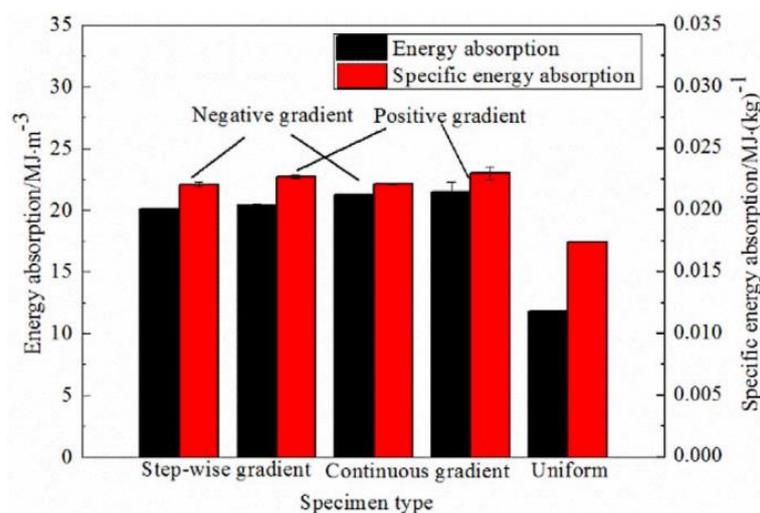
Gli effetti benefici legati al posizionamento di una struttura più concentrata e corposa in prossimità della zona in cui viene trasmesso il carico sono stati indagati da molti autori: Zeng et al. [33] hanno scoperto che l'introduzione di un gradiente di densità ha un effetto ridotto, se non trascurabile, sulla capacità di assorbimento energetico in condizioni dinamiche a bassa velocità, mentre diventa significativa e cruciale quando le velocità aumentano per contrastare le condizioni di non equilibrio che si sviluppano.

Inoltre, dallo studio di Lijun et al. [31] si può evincere una differenza sostanziale tra le curve tensione-deformazione in assenza o in presenza di un'opportuna variazione della distribuzione delle celle. Infatti, la configurazione dotata di strutture progressive mostra, in sostituzione all'esteso plateau presente nel campo plastico, prima della fase di densificazione, un chiaro incrudimento, come mostrato in **Figura 2.8**. Questo aspetto è sicuramente connesso all'aumento locale di  $\rho_{rel}$ , che presenta, a sua volta, una relazione monotona crescente con il flow stress.

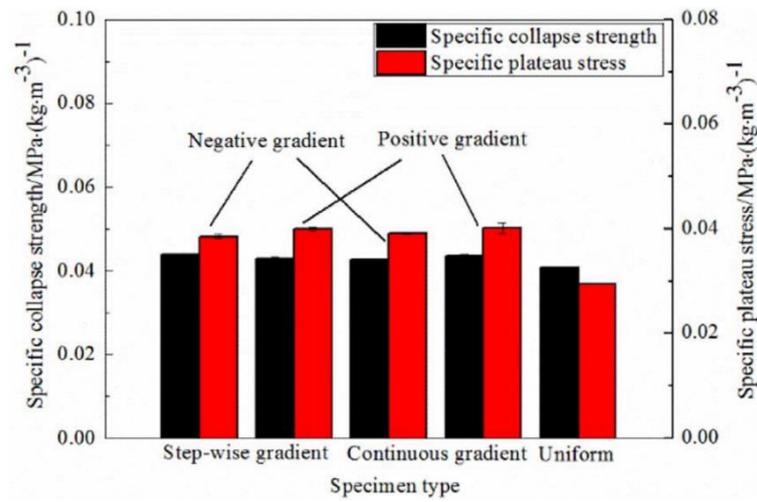


**Figura 2.8.** Fenomeno dello strain-hardening nel diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  di una struttura progressiva [31].

Oltre a quanto detto fino a questo momento, anche l'assorbimento energetico sembra risentirne favorevolmente, come si nota in **Figura 2.9**, in cui, per migliorare la correlazione tra i dati, si ragiona anche in termini di grandezze specifiche, ovvero rapportate ai valori delle densità previste dalle varie strutture. Un'ulteriore conclusione a cui si può pervenire è che i materiali con variazioni di densità graduali presentano una resistenza al cedimento maggiore rispetto a quella riscontrabile con architetture in cui sono presenti cambiamenti netti, sia in all'applicazione di carichi statici che dinamici (**Figura 2.10**). Infine, si può dimostrare come la direzione del carico influenza solo marginalmente la risposta dei materiali.



**Figura 2.9.** Effetto del gradiente di densità sull'energia assorbita classica e specifica di strutture trabecolari in Ti-6Al-4V [31].



**Figura 2.10.** Effetto del gradiente di densità sulla tensione specifica di plateau e sulla resistenza specifica al cedimento di strutture trabecolari in Ti-6Al-4V [31].

### CAPITOLO 3 – Giunti incollati

Un giunto consente l'unione di più parti con l'obiettivo di formare un'unica entità, favorendo il trasferimento del carico da una parte all'altra di uno stesso componente e garantendo la massima rigidità possibile; tale organo di accoppiamento può essere ottenuto attraverso tecniche e modalità differenti, ognuna delle quali è dotata di caratteristiche specifiche, riassunte in *Tabella 3.1*. Tra le classi principali si annoverano [35]:

- giunzioni saldate;
- giunzioni imbullonate e rivettate;
- giunzioni incollate.

L'incollaggio è un processo tecnologico che sfrutta l'interposizione di un adesivo per connettere materiali, anche diversi tra loro; ciò garantisce una distribuzione del carico molto più uniforme e graduale rispetto a quella conseguibile con le altre metodologie di connessione sopramenzionate, ragion per cui si possono realizzare parti anche molto più lunghe ed estese. Inoltre, tale proprietà determina sia il rallentamento della propagazione di cricche, che nascono principalmente in corrispondenza dei bordi, sia il mantenimento di un'ottima capacità di sigillatura, sia un miglior comportamento a fatica; viene altresì assicurata la continuità geometrica della giunzione in quanto non si nota alcuna variazione della struttura interna del materiale, con conseguente vantaggio dal punto di vista della rigidità ottenibile. Data l'assenza di corpi esterni (rivetti o bulloni) e di cordoni di saldatura, anche l'aspetto estetico è sicuramente privilegiato. In generale, affinché il meccanismo di giunzione avvenga nel migliore dei modi, è richiesta, oltre ad una profonda conoscenza delle caratteristiche dell'adesivo e del materiale da incollare, anche un'accurata preparazione delle superfici dei substrati.

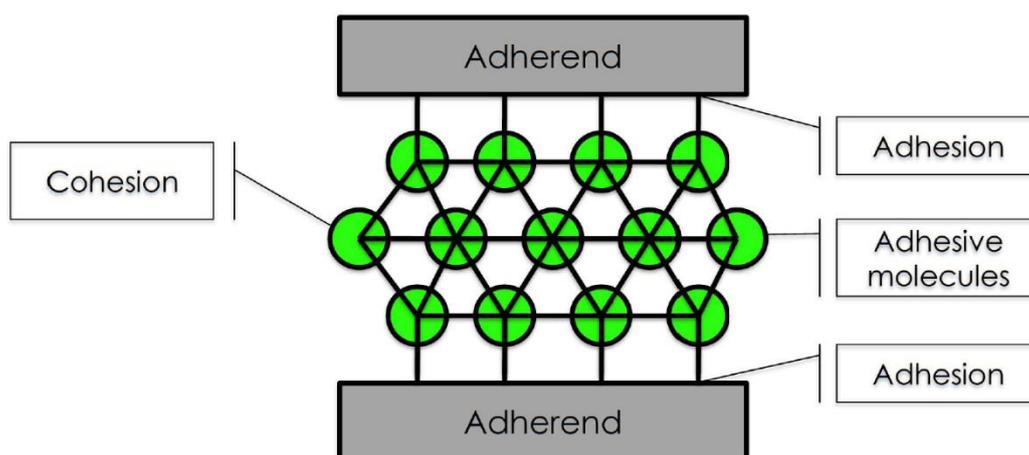
*Tabella 3.1. Confronto tra le proprietà delle varie metodologie di giunzione.*

<b>Proprietà</b>	<b>Incollaggio</b>	<b>Rivettatura</b>	<b>Saldatura</b>
<i>Preparazione superficiale</i>	Lunga	Breve	Breve
<i>Unione di materiali dissimili</i>	Buona	Limitata	Ridotta
<i>Aggiunta di peso alla struttura</i>	Bassa	Alta	Moderata
<i>Resistenza a fatica e corrosione</i>	Elevate	Ridotte	Moderate
<i>Disassemblaggio</i>	Complesso	Facile	Complesso
<i>Tempi / Costi di produzione</i>	Lunghi / Medi	Veloci / Bassi	Moderati / Bassi
<i>Resistenza alla degradazione</i>	Bassa	Bassa	Moderata

### 3.1 – Meccanismi di adesione

Per parlare in modo completo e dettagliato dei meccanismi di adesione che si verificano all'interno di un giunto incollato, è necessario innanzitutto fare un passo indietro ed introdurre il mezzo effettivo che rende possibile la connessione dei vari elementi, ovvero l'adesivo. Secondo la definizione fornita dalla normativa UNI EN 923, esso è una sostanza non metallica in grado di unire materiali, non necessariamente uguali, mediante un fissaggio superficiale (adesione) e un'adeguata forza interna (coesione).

In sintesi, con il termine adesione si intende il risultato dell'interazione meccanica e chimico-fisica che si instaura tra la superficie dell'adesivo polimerico ed il substrato a cui esso viene applicato, noto anche con il nome di aderendo; al contrario invece, la coesione definisce l'interazione presente tra le singole particelle di adesivo. In **Figura 3.1** è stato riportato uno schema esemplificativo che mette in luce i vari fenomeni che si instaurano all'interno della materia.



**Figura 3.1.** Sezione di un giunto incollato [35].

In riferimento alla composizione, solitamente queste sostanze a base polimerica vengono additivate con altri costituenti, come le cariche metalliche, i minerali e le ceramiche, al fine di migliorare sia le capacità adesive, sia la stabilità interna, privilegiando, a seconda dei casi, una maggiore viscosità o fluidità. Inoltre, le sostanze aggiunte possono ottimizzare le proprietà reologiche (plastificanti), fungere da catalizzatori o inibire le reazioni di polimerizzazione in presenza di ossigeno o radiazioni (stabilizzanti).

È bene ricordare come i valori nominali delle proprietà meccaniche, chimiche ed ottiche del collante, riportate all'interno di specifiche schede tecniche, valgano solamente per la porzione dove sono predominanti i fenomeni di coesione, mentre, man mano che ci si avvicina verso il substrato, ovvero

verso le zone in cui prevale l'adesione, si registra un cambiamento, più o meno accentuato, in funzione di una serie di fattori operativi, di tali parametri strutturali.

Pertanto, risulta fondamentale studiare e capire come funziona l'interazione adesivo-substrato al fine di prevedere correttamente il comportamento globale del sistema; come riportato in molti articoli presenti in letteratura, tra cui quello di Ebnessajjad [36], i meccanismi di adesione possono essere raggruppati in cinque categorie, di cui è necessario sottolineare, come fatto in **Tabella 3.2**, quale sia il livello o la scala di riferimento:

- teoria dell'interlocking meccanico → dato che ogni materiale presenta superfici dotate di sporgenze e rientranze causate dal ciclo di lavorazione, un qualunque adesivo allo stato liquido riesce a penetrare nei pori, nelle concavità e nelle irregolarità superficiali dell'aderendo; così facendo si crea una giunzione che permette la trasmissione della forza. È evidente che, nella sua azione di riempimento, il collante debba spostare l'aria presente all'interfaccia; perciò, esso deve possedere una buona bagnabilità rispetto al materiale che compone il substrato. Inoltre, è facilmente deducibile che la connessione risulta tanto più forte quanto più è elevata la rugosità, poiché, contestualmente, aumenta l'area di contatto reale, e con essa anche la forza di adesione. Tuttavia, come dimostrato da Demejo et al. [37], questa teoria non è valida esclusivamente per condizioni di questo tipo, ma anche nei casi di superfici dotate di finitura spinta, a patto che si modifichino le proprietà chimico-fisiche del substrato, puntando, ad esempio, oltre all'aumento della superficie di contatto reale, anche all'ottenimento di aree ben pulite o maggiormente reattive.
- Teoria elettrostatica → in tal senso, qualora sussistesse una discrepanza tra la struttura elettronica dell'adesivo e quella del substrato, l'adesione potrebbe essere ricondotta al trasferimento di alcuni elettroni, condizione che porta alla formazione di un doppio strato di carica elettrica in corrispondenza dell'interfaccia. Tuttavia, è ancora poco chiaro quanto e se i fenomeni elettrostatici partecipino attivamente al meccanismo di giunzione, o se manifestino la loro presenza solo alla rottura, ma, ad ogni modo, è stato appurato come questi non rappresentino comunque un contributo scarsamente rilevante.
- Teoria della diffusione → l'interazione tra adesivo e substrato è strettamente connessa all'interdiffusione molecolare vicendevole tra corpi adiacenti. Questo principio è applicabile solo se entrambi gli elementi possiedono una struttura composta da lunghe catene che favorisce la mobilità degli aggregati atomici; così facendo, si restringe il possibile campo di applicazione ai soli polimeri. Inoltre, è richiesta la completa compatibilità dei materiali, condizione raggiungibile se i relativi valori di solubilità sono confrontabili.

- Teoria dell'adsorbimento → una volta ottenuto all'interfaccia un contatto molecolare sufficientemente "intimo", si instaurano le classiche forze interatomiche e intermolecolari tra le particelle dell'adesivo e quelle degli aderendi. Queste sollecitazioni, comunemente note con il nome di interazioni di van der Waals, possono essere accompagnate anche dalla formazione di legami chimici (ad idrogeno, covalenti, ionici, metallici e dipolo-dipolo tra i principali). È bene ricordare che le forze di attrazione che si creano sono estremamente sensibili alla distanza esistente tra le particelle, tanto che decrescono con l'inverso della settima potenza ( $\propto 1/r^7$ ); per tale motivo si è parlato della necessità di un'intima unione.
- Teoria degli strati limiti deboli → benché questo sistema non spieghi esattamente quale è la natura dell'adesione, risulta molto utile per capire se le condizioni operative nelle tre fasi di vita del giunto, ovvero il range di applicazione dell'adesivo, la fase di indurimento e il tempo operativo, influiscono negativamente sul suo valore finale di resistenza. Il tutto si basa sul riconoscimento di layer deboli, i quali, potendosi formare sia nel collante che nel substrato per la presenza di bolle d'aria e impurità all'interfaccia o per la nascita di reazioni chimiche indesiderate, costituiscono la zona dove sicuramente avverrà la rottura.

*Tabella 3.2. Livello d'azione dei meccanismi di adesione [36].*

<b>Teoria</b>	<b>Livello di azione</b>
<i>Interlocking meccanico</i>	Microscopico
<i>Elettrostatica</i>	Macroscopico
<i>Diffusione</i>	Molecolare
<i>Adsorbimento</i>	Molecolare / Atomico
<i>Strati limiti deboli</i>	Molecolare

### **3.1.1 – Preparazione delle superfici del substrato**

Oltre alle caratteristiche dell'adesivo, al design della giunzione, alla bagnabilità delle superfici a contatto e alla scelta dei tempi di processo per far avvenire correttamente la polimerizzazione e la solidificazione del materiale, anche la preparazione delle superfici del substrato gioca un ruolo importantissimo nella definizione delle proprietà adesive e nella stabilità del giunto [38].

I trattamenti superficiali possono essere raggruppati in tre classi, tra cui:

- pulizia, la quale garantisce la rimozione delle impurezze come ossidi, oli e polveri presenti su di essa; è importante realizzare questa pratica poco prima dell'applicazione vera e propria del collante, poiché, altrimenti, le parti potrebbero risultare nuovamente contaminate. Il detergente, a base acquosa o di solvente (*Tabella 3.3*), deve essere scelto attentamente in accordo alle normative di salute e sicurezza per gli operatori e in funzione sia della tipologia delle impurità (organiche o inorganiche), sia dell'ambiente di esercizio, sia della compatibilità con il materiale e con la geometria dell'aderendo.

*Tabella 3.3. Confronto tra i detergenti comunemente utilizzati [38].*

	<b>Detergenti Aqueous-based</b>	<b>Detergenti Solvent-based</b>
	Diluzione in acqua	Ideali prima dell'incollaggio
	Biodegradabilità	No residui in superficie
	Per impurezze organiche e inorg.	Diluizione delle impurità
	Inodori	Evaporazione immediata
	Controllo della concentrazione	Attacco dei materiali plastici
	Residui in superficie	No per impurezze inorganiche
	Possibile formazione di ruggine	Infiammabili
	Attenzione alle contaminazioni	Contenuto di VOCs

- pre-trattamento (processo primario), il quale consiste nell'utilizzo di tecniche meccaniche, chimiche o fisiche, con lo scopo di rimuovere gli strati fortemente adsorbiti, di modificare i valori di rugosità o di rendere la superficie maggiormente reattiva, aumentandone l'energia superficiale.
- post-trattamento (processo secondario), il quale comprende tutte le tecniche che hanno come obiettivo il miglioramento delle caratteristiche del giunto e la protezione superficiale. Tra queste tecniche un esempio è l'applicazione di primer, ovvero dei rivestimenti organici, più o meno conduttivi, applicati come film sottili sul substrato.

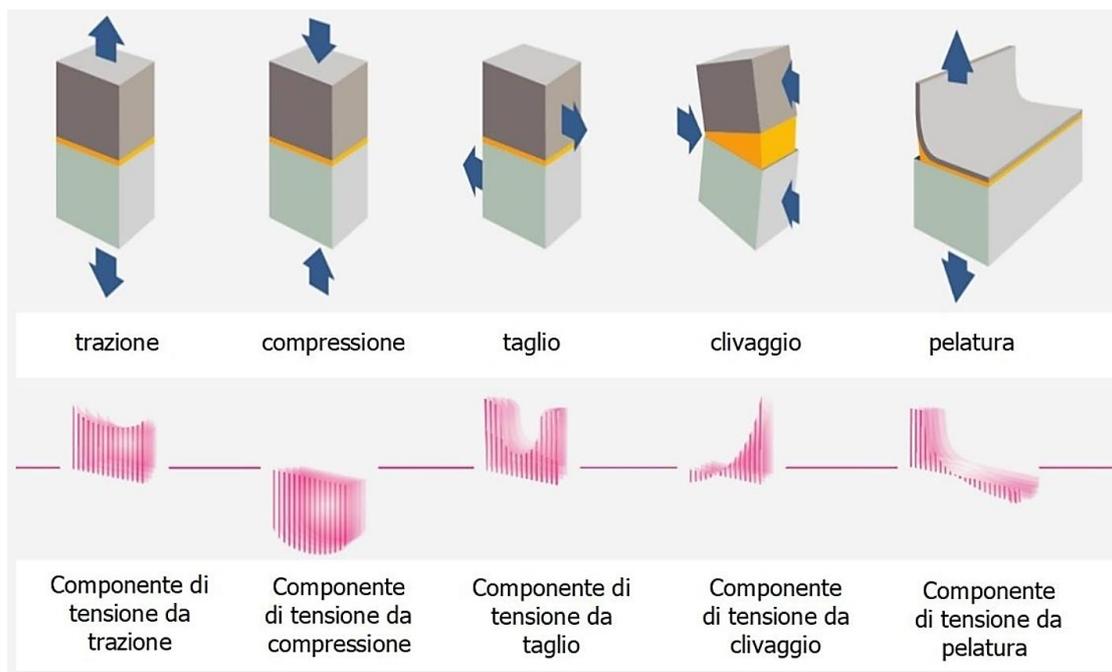
### **3.2 – Tipologie di carico e meccanismi di rottura**

Il comportamento meccanico di un giunto adesivo è scandito anche dalle condizioni di carico a cui va incontro il sistema durante la sua vita in esercizio; in **Figura 3.2** sono state riportate le tipologie di sollecitazioni più frequenti, tra cui si riconoscono la trazione, la compressione, il taglio, il clivaggio ed il peeling [39]. È bene sottolineare come in quasi tutte le applicazioni industriali è molto complesso trovare delle giunzioni sottoposte a sforzi semplici, mentre è molto più probabile che vi sia una combinazione di esse.

Si parla di trazione e di compressione quando le sollecitazioni sono perpendicolari e uniformemente distribuite rispetto alla superficie di adesione; la differenza principale tra loro risiede nella direzione di carico. Infatti, gli sforzi compressivi, essendo diretti verso la giunzione, favoriscono l'adesione dei substrati mentre rendono difficile il cedimento, a meno che questo non avvenga nella zona di coesione. Al contrario, nel caso della trazione, se i picchi di tensione superano il valore di resistenza dell'adesivo, la connessione si frattura in corrispondenza dei bordi.

In riferimento al caso del taglio, le forze sono disposte parallelamente allo spessore del collante, il quale presenta un ottimo comportamento in queste condizioni, migliore rispetto ad un omologo caso di trazione, contrariamente a ciò che accade per i classici materiali metallici comunemente impiegati. Nel caso ideale di substrati perfettamente rigidi, la tensione che si sviluppa in seno al materiale presenta un andamento uniforme, costante e pari al valore medio. Tuttavia, per una trattazione più affine alla realtà, si fa riferimento ai modelli proposti da Volkersen prima e da Goland e Reissner poi, da cui si è potuto constatare come in corrispondenza delle estremità si concentrino i maggiori valori di tensione.

Il clivaggio si registra a seguito dell'applicazione di opportuni sforzi in corrispondenza di un'estremità del giunto; così facendo, si verifica una localizzazione importante del fenomeno che porta allo scollamento degli aderenti, aprendoli. Il peeling è un meccanismo analogo al caso precedente, ma si registra un'unica differenza sostanziale, legata alla maggior elasticità, e quindi deformabilità, delle parti che compongono il substrato, aspetto che aggrava ulteriormente la concentrazione delle tensioni nel punto di applicazione del carico, rendendo questa condizione la più indesiderata possibile.



**Figura 3.2.** Tipologie e distribuzione delle sollecitazioni (<http://aralditeadhesives.com/>).

Una volta terminata la trattazione riguardante le tipologie di carichi che possono essere applicati ad un qualunque giunto incollato, devono essere esaminate anche le possibili modalità di cedimento che possono manifestarsi. Nonostante tali meccanismi risultino influenzati da molteplici parametri e grandezze, di norma, la frattura si genera dove la resistenza è minore. Ad ogni modo, si riconoscono, come riportato in **Figura 3.3**, rotture di tipo coesivo, adesivo, misto e del substrato [36][39].

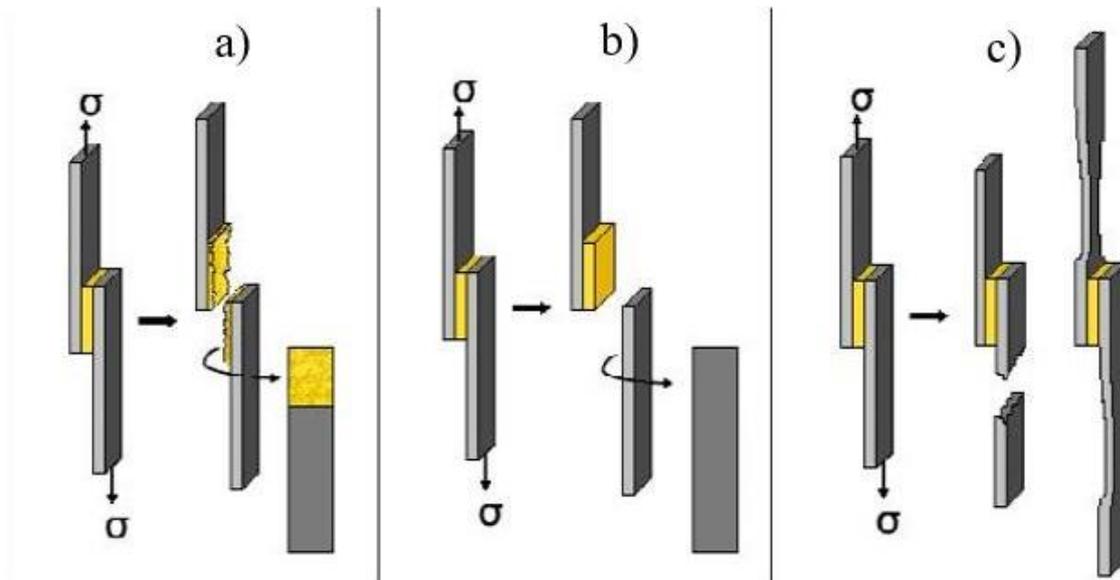
Il cedimento coesivo (*a*) è altamente desiderabile in molte applicazioni poiché denota la presenza di un'adesione forte e, di conseguenza, indica che è stata compiuta una corretta progettazione del giunto e una buona preparazione delle superfici, tanto che la resistenza a rottura offerta dal materiale è la massima possibile. Questa condizione si verifica quando le interazioni intermolecolari sono di entità inferiore rispetto a quelle che nascono in prossimità dell'interfaccia con il substrato; quindi, il giunto cede indicativamente nella parte centrale del collante che rimane attaccato ad entrambi gli aderendi.

Al contrario, la rottura di tipo adesivo (*b*) è fortemente indesiderata poiché è indice o di un processo di polimerizzazione non avvenuto in modo completo, o di una non corretta preparazione superficiale, o di una compatibilità ridotta tra gli elementi della giunzione. Tale modalità si verifica quando l'interazione collante-substrato è inferiore rispetto alle forze coesive; il giunto cede in modo tale che l'intero spessore di materiale polimerico rimanga attaccato soltanto ad uno dei due aderendi, mentre l'altro risulta perfettamente pulito.

In realtà, è poco probabile ricadere precisamente in uno dei due casi sopramenzionati; infatti, nella maggior parte dei componenti, le rotture vengono definite miste poiché si registra la simultanea

presenza di zone con cedimento coesivo e zone con cedimento adesivo. Questa condizione è facilmente visibile quando le interazioni intermolecolari e quelle in prossimità del substrato sono confrontabili.

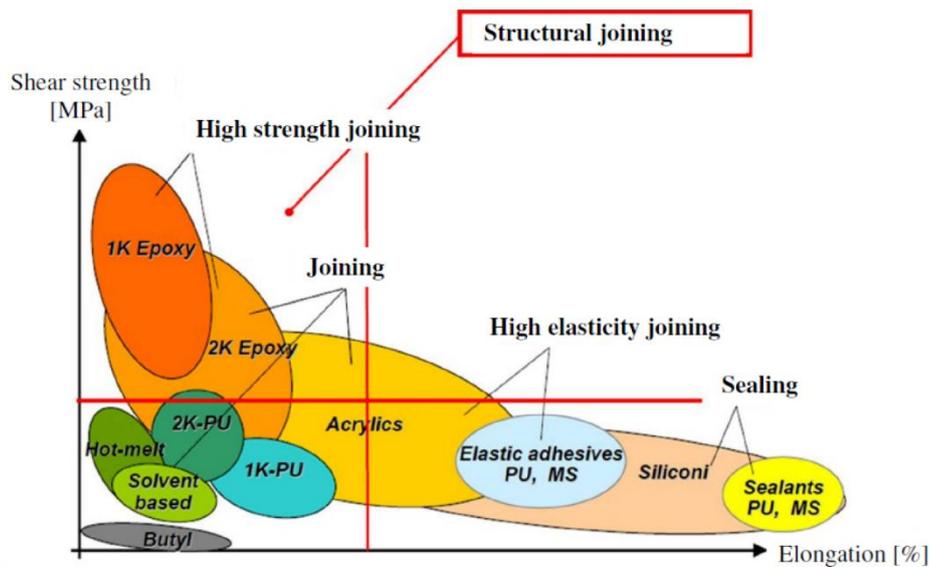
Alle volte può succedere che i legami definiti dall'adesivo siano talmente forti che la rottura del giunto venga causata dal cedimento del substrato (c); i materiali con bassa resistenza intrinseca sono fortemente inclini a questa tipologia di fenomeno.



**Figura 3.3.** Tipologie di cedimento: (a) coesivo, (b) adesivo, (c) rottura del substrato.

### 3.3 – Scelta dell'adesivo

La scelta ottimale di un adesivo per un determinato impiego è molto complessa e laboriosa poiché l'operatore deve prendere in considerazione molteplici fattori e parametri, tra cui, ad esempio, la finalità dell'incollaggio, il materiale da incollare, la forma e le dimensioni delle superfici, le condizioni di esercizio e la velocità di polimerizzazione dell'agente incollante. In letteratura sono state proposte varie classificazioni in funzione sia della tipologia di polimero utilizzato, sia del metodo di polimerizzazione, sia dei requisiti finali richiesti dall'applicazione. In riferimento a quest'ultima classe funzionale, è possibile ricondursi ad uno schema esemplificativo, che è stato riportato in **Figura 3.4** in termini di resistenza a taglio e di allungamento percentuale a rottura.



**Figura 3.4.** Classificazione degli adesivi in base alle proprietà meccaniche [35].

In tal senso, l'interesse principale in campo industriale è canalizzato sicuramente verso gli adesivi strutturali, chiamati così perché, una volta applicati, diventano parte integrante della struttura del componente; questi hanno la capacità di trasferire i carichi tra gli aderenti e di sopportare vibrazioni ed elevati sforzi meccanici per un lungo intervallo di tempo. Tra i più diffusi si annoverano i materiali epossidici, i quali sono dotati di elevate resistenze a taglio, mentre, per contro, sono poco deformabili e presentano problematiche rilevanti in caso di peeling. Questi materiali plastici, intrinsecamente fragili, in funzione del momento in cui viene prevista la miscelazione tra resina ed indurente, si possono trovare in commercio sia in forma di pasta monocomponente, che di liquido bicomponente; i primi richiedono temperature di polimerizzazione più elevate, mentre i secondi non sono facili da gestire nella linea di produzione e, in particolare, non si prestano a operazioni automatizzate [40].

Un'altra famiglia di adesivi strutturali comunemente utilizzati nell'industria è quella dei cosiddetti anaerobici, i quali sono progettati per indurire in assenza di ossigeno; di norma, essi vengono utilizzati per unire elementi cilindrici, per bloccare i cuscinetti sugli alberi, per fissare boccole e bronzine, per realizzare la tenuta in parti flangiate e per evitare fenomeni di svitamento spontaneo in viti e bulloni. Il fatto che il materiale possieda una viscosità relativamente bassa e che polimerizzi in tempi ragionevolmente brevi, unitamente alle buone proprietà meccaniche a taglio e all'ottima flessibilità intrinseca, li rende, oltre che molto utilizzabili, una valida alternativa alle resine epossidiche.

Per una miglior comprensione generale, in **Tabella 3.4** sono state riportate, in termini medi, le caratteristiche più importanti delle principali categorie di adesivi strutturali.

**Tabella 3.4.** Confronto tra le caratteristiche dei principali adesivi strutturali.

	<b>Anaerobici</b>	<b>Epossidici bicomp.</b>	<b>Acrilici</b>	<b>Poliuretani</b>
<i>V<sub>rel</sub> polimerizzazione</i>	Media	Bassa	Elevata	Bassa
<i>Riempimento vuoti</i>	0,5 mm	Nessun limite	1 mm	Nessun limite
<i>τ<sub>ad</sub></i>	21 – 28 MPa	21 – 35 MPa	15 – 25 MPa	10 – 14 MPa
<i>Resistenza pelatura</i>	Molto bassa	Bassa	Alta	Molto Alta
<i>Resistenza ad alte T [°C]</i>	200°C	200°C	150°C	180°C
<i>Resistenza a fluidi</i>	Eccellente	Eccellente	Buona	Discreta
<i>Costo</i>	Elevato	Basso	Medio	Medio

### 3.4 – Giunzioni ibride

Per compiere un passo in avanti nella trattazione, è necessario introdurre il concetto di giunzione ibrida, ovvero una tecnologia che sfrutta la simultanea presenza di una tecnica di connessione tradizionale, meccanica o termica, e quella di incollaggio, al fine di ottenere un componente finale che possieda proprietà migliori rispetto al caso semplice.

In tal senso, una geometria molto utilizzata nel settore automotive è quella che prevede l'utilizzo di due corpi assialsimmetrici, riconducibili a classici collegamenti albero-mozzo, denominati pin-collar, i quali, regolati da apposite normative, permettono il trasferimento di una forza assiale o di un momento torcente mediante l'azione combinata di un adesivo, che riempie i micro-vuoti superficiali aumentando l'area di contatto, e della forza d'attrito, dipendente dalla pressione di accoppiamento, che si sviluppa all'interfaccia [41]. Pertanto, sfruttando il principio di sovrapposizione degli effetti, la forza di spiantaggio totale  $F_{tot}$  [N] può essere definita a partire dalla (3.1):

$$F_{tot} = F_{ad} + F_{int} \quad (3.1)$$

Il primo termine a destra dell'uguale è correlato, come indicato nella (3.2), sia alla resistenza a taglio dell'adesivo  $\tau_{ad}$  [MPa], sia all'area di contatto  $A$  [mm<sup>2</sup>], a sua volta associata al diametro e alla lunghezza d'accoppiamento  $D_c$  [mm] e  $L_c$  [mm]; il secondo, invece, dipende, come riportato nella (3.3), sia dal coefficiente d'attrito statico assiale  $\mu_A$ , parametro influenzato dal tipo di materiale e dalla finitura superficiale, sia dalla pressione d'accoppiamento  $p_c$  [MPa], sia, nuovamente dalla superficie di contatto  $A$  [mm<sup>2</sup>]:

$$F_{ad} = \tau_{ad} \cdot A \quad (3.2)$$

$$F_{\text{int}} = \mu_A \cdot p_c \cdot A \quad (3.3)$$

Ricordando che:

$$A = \pi \cdot D_c \cdot L_c \quad (3.4)$$

A questo punto, per passare alla determinazione analitica della pressione d'accoppiamento, si devono introdurre delle ipotesi semplificative: il valore di  $p_c$  viene supposto costante lungo tutta l'estensione del collegamento e si prevede di lavorare in uno stato piano di tensione. Quest'ultima condizione, in realtà, non è propriamente veritiera poiché risulta valida solamente quando i corpi assialsimmetrici presentano la medesima lunghezza: pertanto, nella stragrande maggioranza dei casi, ovvero quando l'albero si estende oltre il mozzo, si verifica una concentrazione di tensioni nei pressi della zona di confine, definita a partire dal fattore  $K$ , il quale viene calcolato come il rapporto tra il valore massimo assunto della tensione di VM ed il suo valore teorico e costante, legato direttamente allo schema di carico presente e a vari parametri geometrici. Ad ogni modo, alla luce delle suddette ipotesi, dalla teoria di Lamè per tubi di grosso spessore si ottiene la (3.5):

$$p_c = \frac{Z/D_c}{\left[ \left( \frac{1}{E_H} \right) \cdot \left( \frac{1 + Q_H^2}{1 - Q_H^2} + \nu_H \right) \right] + \left[ \left( \frac{1}{E_S} \right) \cdot \left( \frac{1 + Q_S^2}{1 - Q_S^2} - \nu_S \right) \right]} \quad (3.5)$$

in cui:

- $E_H$  ed  $E_S$  [MPa] sono i moduli elastici associati rispettivamente al mozzo e all'albero;
- $\nu_H$  e  $\nu_S$  sono i coefficienti di Poisson associati rispettivamente al mozzo e all'albero;
- $Q_H$  e  $Q_S$  sono gli aspect ratio del mozzo e dell'albero, definiti nella (3.6) e (3.7):

$$Q_H = \frac{D_c}{D_{He}} \quad (3.6)$$

$$Q_S = \frac{D_{Si}}{D_c} \quad (3.7)$$

- $Z$  [mm] rappresenta l'interferenza reale, ottenibile a partire da quella nominale  $U$  [mm].

L'espressione (3.5) può essere ulteriormente semplificata nella (3.8) quando si considerano elementi dello stesso materiale ( $E = E_H = E_S$ ,  $\nu = \nu_H = \nu_S$ ) e un pin con geometria piena ( $Q_S = 0$ ):

$$p_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{Z \cdot E (1 - Q^2)}{D_c} \quad (3.8)$$

Per quanto detto fino a questo momento, è possibile concludere che, a parità di forza di spiantaggio, l'aggiunta di un adesivo adeguato permetta la corrispettiva riduzione del livello di interferenza all'interfaccia, così da poter utilizzare tolleranze più ampie, con buoni risultati dal punto di vista dei costi di produzione. Inoltre, nel caso specifico di pin-collar realizzati in acciaio, è stato scoperto come nel computo di  $F_{tot}$  l'effetto legato all'attrito sia trascurabile rispetto al contributo fornito dall'adesivo [42]. Ad oggi si riconoscono tre metodi differenti per assemblare le parti in un giunto cilindrico, ovvero:

- press-fit, conseguibile spingendo, attraverso una pressa statica, l'albero nel mozzo, entrambi mantenuti a temperatura ambiente;
- shrink-fit, ottenibile inserendo l'albero a temperatura ambiente nel mozzo precedentemente riscaldato e quindi dilatato;
- cryogenic-fit, conseguibile infilando l'albero raffreddato mediante azoto liquido nel mozzo a temperatura ambiente.

Contrariamente a ciò che accade nei giunti shrink-fit, in cui il l'interferenza effettiva è uguale a quella nominale, nel caso di tecniche press-fit, il parametro  $Z$  è pari al valore di riferimento sottratto della componente legata alla rugosità degli elementi a contatto, la quale tiene conto della parziale asportazione delle creste causata dallo scorrimento reciproco delle parti. Questo fenomeno è comunque circoscritto poiché, malgrado le condizioni fortemente favorevoli allo schiacciamento e alla frantumazione dei picchi, questi hanno la tendenza a rimanere presenti anche nelle fasi successive all'assemblaggio. Tale condizione modifica radicalmente l'interfaccia dell'accoppiamento e favorisce un netto incremento della pressione e quindi della tensione calcolata secondo von Mises. Nel caso in cui la superficie fosse perfetta, il limite elastico verrebbe raggiunto più velocemente e, secondo delle formule analitiche, la pressione massima sarebbe identicamente uguale al valor medio, a sua volta pari alla metà dello stress di Von Mises. Quanto detto permette di affermare che un certo grado di rugosità sia desiderabile poiché consente di implementare la resistenza del collegamento; ampliando il discorso, una certa texture permette anche di conservare all'interno della coupling zone una quantità maggiore di adesivo, migliorando le proprietà resistenziali statiche e dinamiche del giunto.

In questo senso, Croccolo et al. [42] hanno studiato l'influenza che il criterio di montaggio possiede sulla resistenza offerta a taglio dell'adesivo in una connessione ibrida e hanno messo in luce come il raffreddamento del perno sia la strada da tenere maggiormente sotto controllo per via della formazione di umidità nella superficie di contatto, fenomeno che inibisce la polimerizzazione e riduce contestualmente il valore di  $\tau_{ad}$  raggiungibile. Al contempo, in operazioni alla pressa statica, è

necessario che il grado d'interferenza non sia troppo elevato da rimuovere un'eccessiva quantità di collante dalla zona di accoppiamento, poiché verrebbe limitata drasticamente l'integrità strutturale del sistema dato che il surplus di interferenza non riuscirebbe a bilanciare la perdita di adesivo.

Contestualmente è importante soffermarsi anche sull'incidenza delle dimensioni geometriche del provino sulla risposta dell'adesivo, con uno sguardo particolare all'ER, definito come il rapporto di ingaggio tra la lunghezza ed il diametro d'accoppiamento [43][44]. Nel caso di componenti in acciaio C40 testati a temperatura ambiente e tenuti insieme da un anaerobico si è potuto evincere come la variazione di ER non abbia pressoché alcun impatto su  $\tau_{ad}$ . Al contrario, nelle stesse condizioni, l'efficacia di una resina epossidica aumenta se la zona di contatto si allunga; tuttavia, una crescita marcata di ER fino a valori pari ad 1,7 o 2 determina, d'altra parte, anche un incremento delle dimensioni e del peso del componente. Pertanto, rispetto allo 0,9 proposto dalla normativa ISO 10123, è favorevole considerare valori pari all'unità o leggermente superiori, ma non eccessivamente, al fine di non penalizzare troppo la leggerezza del giunto. Questo range risulta il migliore anche quando le temperature salgono nell'intorno di 40°C, mentre per T ancora più alte, la risposta adesiva è completamente insensibile alla variazione di ER [45].

### ***3.5 – Caratterizzazione ad impatto***

Il comportamento dei giunti incollati ad impatto è un argomento molto complesso ed articolato, sia per la grande difficoltà nel replicare sperimentalmente le condizioni ad alto strain-rate, sia per gli elevati costi associati ai test, i quali vengono raggruppati, in funzione della velocità a cui avvengono, in tre tipologie:

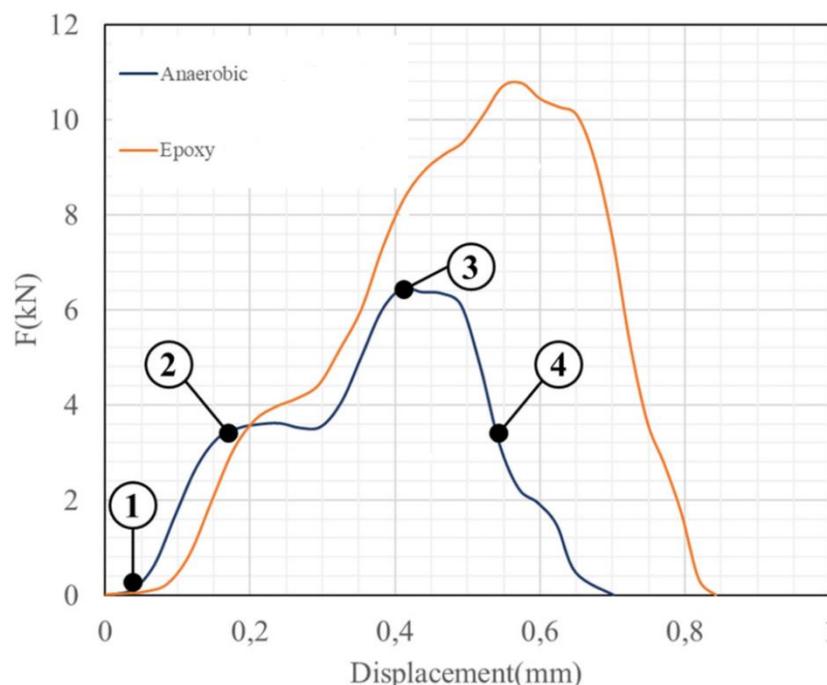
- bassa velocità ( $v \leq 5$  m/s), in cui i problemi possono essere trattati come un sistema vibrante;
- media velocità ( $5 \leq v \leq 10$  m/s), dove si assiste alla propagazione sottoforma di onde dello stress e della deformazione;
- alta velocità ( $10 \leq v \leq 100$  m/s), in cui il componente entra in collisione con un corpo che si sta muovendo ad una velocità superiore a quella del suono in quelle entità.

Come auspicabile, al fine di progettare con successo connessioni in grado di sopportare carichi dinamici in modo sicuro, è fondamentale indagare, oltre al comportamento del sistema nella sua globalità, anche la sensibilità che i singoli materiali costituenti il substrato e l'adesivo mostrano rispetto alla velocità di deformazione, mettendo contemporaneamente in evidenza altre peculiarità, come la geometria del giunto, la preparazione della superficie e le proprietà degli aderenti [46].

I materiali polimerici, tra cui la maggior parte degli adesivi, sono fortemente dipendenti dalla variazione di strain-rate, per via della loro viscoelasticità intrinseca, la quale è responsabile del passaggio da un comportamento duttile ad uno fragile della struttura; pertanto, un aumento delle proprietà resistenziali è solitamente accompagnato da una riduzione dell'allungamento, e quindi anche dell'energia assorbita a frattura ( $G_C$ ); al contrario, non si registra alcun cambiamento significativo né del modulo elastico, né di quello di taglio.

Tuttavia, Harris et al. [47], testando più tipologie di substrati e collanti, hanno notato che l'assorbimento di energia non è una proprietà direttamente imputabile all'adesivo, ma deriva principalmente dalla duttilità del substrato. Infatti, ricorrendo a aderenti ad alta resistenza si è potuto constatare come i carichi di rottura fossero molto elevati, mentre l'energia assorbita fosse molto bassa, contrariamente a ciò che accadeva per substrati più duttili. L'adesivo stesso, indipendentemente dalle sue proprietà, è in grado di fornire solamente un piccolo contributo alla  $G_C$  complessiva; il compromesso migliore è quello di prevedere degli adesivi molto resistenti, utilizzati in combinazione con substrati abbastanza duttili.

Una conferma di quanto precedentemente asserito è stata fornita da De Agostinis et al. [48] in uno studio rivolto alle giunzioni ibride pin-collar in C40, in cui è stata svolta una comparazione, in condizioni dinamiche a basso regime, del comportamento di due adesivi diversi, ovvero una resina epossidica e un anaerobico, ottenendo la curva riportata in **Figura 3.5**.



**Figura 3.5.** Confronto dei diagrammi forza-spostamento di un adesivo anaerobico e di un epossidico a valle di un test dinamico condotto a  $v = 3 \text{ m/s}$  [48].

Le quattro fasi principali del processo possono essere riassunte come segue:

1. il corpo impattante entra in contatto con il perno e, dopo una fase iniziale di plateau, la forza inizia ad aumentare.
2. Si notano dei dossi sulla porzione iniziale pseudo-lineare della curva, dovuti allo stimolo delle frequenze naturali dell'apparecchiatura di prova.
3. La forza continua ad aumentare, fino ad arrivare al picco massimo corrispondente alla rottura dello strato adesivo.
4. Il perno viene espulso e si registra l'improvvisa diminuzione della forza.

Inoltre, è possibile evincere come entrambi gli adesivi mostrino un incremento della tensione di rottura in concomitanza dell'aumento della velocità di deformazione, mentre solo l'anaerobico mostra anche un sensibile irrigidimento (retta nel tratto elastico più pendente). D'altra parte, la resina epossidica è caratterizzata da una maggiore tenacità; è quindi in grado di assorbire una quantità di energia superiore.

Come precedentemente accennato, anche la tipologia e le caratteristiche dei substrati influenzano notevolmente la risposta di una connessione adesiva sottoposta a carichi impattanti; pertanto, si può pensare di combinare tale tecnica di giunzione con le classiche strutture trabecolari, presentate nel *Capitolo 1*, al fine di migliorarne le capacità globali di assorbimento energetico, senza però penalizzarne drasticamente la resistenza statica.

## **CAPITOLO 4 – Caso studio reale**

Le nozioni teoriche introdotte nei capitoli precedenti riguardanti principalmente le giunzioni ibride, lo studio dei meccanismi ad impatto e le strutture cellulari, costituiscono la base da cui partire per raggiungere l'obiettivo principale di questo elaborato, ovvero la riprogettazione di un classico giunto pin-collar al fine di ottimizzarne sia la geometria, sia la funzionalità e di migliorarne le capacità di assorbimento energetico senza però penalizzare eccessivamente la resistenza statica.

Da questo punto di vista si sceglie di agire specificatamente sul mozzo, passando da una forma completamente piena, ad una che presenta layer intervallati di materiale pieno e di architetture cellulari, valutandone l'effetto in funzione della forma scelta. Dopo aver fissato le caratteristiche del materiale di partenza e aver proceduto con un dimensionamento di massima del provino, si è optato per la progettazione, all'interno di opportuni software, quali CREO Parametric, di tre tipologie di celle: quella cubica con nodo centrale (BCC + CP), quella forata e quella con modello generative. È bene ricordare che le unità ripetenti devono essere realizzate in conformità con il profilo circolare del collar e che le dimensioni dei singoli elementi vengono definite a partire dal processo di fabbricazione additiva selezionato, ovvero il LPBF.

Successivamente, sempre in termini di meso-scala, si dovrà simulare opportunamente il comportamento della parte, inserendo delle adeguate condizioni di carico e di vincolo. Infine, dopo aver confrontato i risultati, si sceglierà la struttura che sarà in grado di garantire il miglior compromesso possibile in termini di leggerezza, resistenza statica e capacità di dissipazione energetica.

### ***4.1 – Analisi preliminari***

Nel settore automotive, la realizzazione di componenti lightweight può essere perseguita grazie all'utilizzo di materiali intrinsecamente leggeri, ma dotati comunque di un'elevata resistenza specifica come le leghe di alluminio o di titanio, oppure implementando design geometricamente ottimizzati. Per quanto riguarda l'applicazione in esame, viene selezionata la seconda strada poiché molto più vantaggiosa; pertanto, la scelta del materiale ricade sulle polveri di AISI-316L, molto utilizzate nell'ambito dei pin-collar, ma anche facilmente processabili con la tecnica LPBF. Al contrario, le leghe di titanio, nonostante le eccezionali proprietà meccaniche, mostrano una rigidità inferiore e perdono la loro competitività per lotti numerosi, risultando molto più costose, mentre le parti in alluminio presentano problemi nel sorreggere carichi importanti, e contestualmente, a causa della ridotta bagnabilità, mostrano una capacità adesiva molto più limitata.

Gli acciai inossidabili austenitici esibiscono una buona resistenza a corrosione, migliore rispetto ai corrispettivi ferritici e martensitici, e vengono preferiti per applicazioni ad alte temperature poiché dotati di un'elevata resistenza a creep e all'ossidazione anche a più di 900°C; quelli della serie 300 presentano diversi alliganti, tra cui i principali sono [21]:

- cromo, elemento alfa-geno ferritizzante che migliora la temprabilità, la stabilità al rinvenimento, la resistenza a corrosione (se  $Cr > 10,5\%$ ) e l'ossidazione a caldo; inoltre, porta alla formazione di carburi, i quali sono responsabili dell'incremento della resistenza ad usura.
- Nichel, elemento austenitizzante, che, se presente almeno per il 7%, permette di avere austenite stabile a temperatura ambiente, fa aumentare la tenacità, la resistenza, la temprabilità e la saldabilità del materiale.
- Molibdeno, il quale determina la formazione di carburi molto duri ed incrementa principalmente la durezza, elimina le fragilità da rinvenimento, rende la martensite più stabile alle elevate temperature, migliora le caratteristiche meccaniche e la resistenza a corrosione, mediante un film di passivazione.

La lettera L in fondo alla sigla indica che l'acciaio è di tipo low carbon, ossia presenta un contenuto di carbonio inferiore allo 0,03% anziché allo 0,08% come avviene nella serie normale. Dai datasheet di riferimento [49][50][51], scelti in modo da avere una certa corrispondenza con i dati riportati in **Tabella 1.2**, si può notare che, rispetto al materiale ottenuto mediante processi tradizionali, le proprietà meccaniche subiscono un leggero cambiamento e risultano influenzate da fattori specifici, come lo spessore del layer e l'orientamento del provino nella camera di lavoro; per semplicità, in questa trattazione, si considera un valore medio cumulativo, anche se più propriamente si dovrebbe far riferimento a dei range. Inoltre, affinché la forza del collegamento sia demandata completamente al materiale polimerico, si considera un piccolo gioco tra le parti, non superiore ad una certa soglia (0,1 mm), poiché altrimenti si provocherebbe una grande perdita di resistenza a taglio. Per quanto detto nel *Capitolo 3* e per via delle sue ottime performance in queste condizioni, si sceglie di operare con la resina epossidica LOCTITE® Hysol® 9466, i cui parametri peculiari sono riportati in una scheda tecnica dedicata [52].

#### **4.2 – Dimensionamento di massima del sistema**

A questo punto, per poter realizzare un dimensionamento di massima degli organi costituenti del sistema, si ricorre all'approccio dell'average stress; dopo aver fissato il valore del rapporto d'ingaggio

pari all'unità e aver supposto una forza associata all'azione della pressa (F) pari a 125 kN, è possibile rielaborare la (3.4) nella (4.1):

$$A = \pi \cdot D_c \cdot L_c = \pi \cdot D_c^2 \quad (4.1)$$

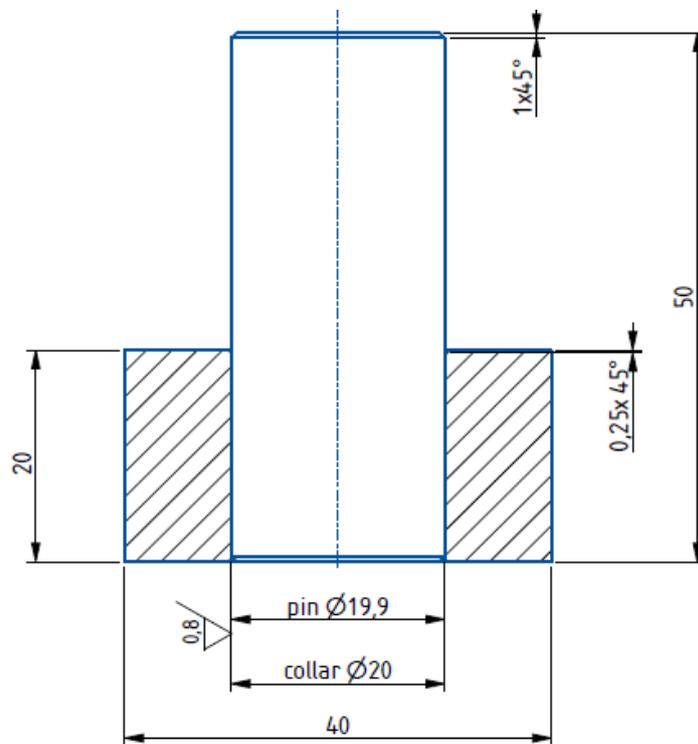
Ricordando che il valore di  $\tau_{ad}$  nel caso dell'acciaio inossidabile austenitico è pari a 37 MPa, si può ricavare, come riportato nella (4.2), il diametro di accoppiamento ( $D_c$ ) massimo che la forza definita riesce a spiantare:

$$F = \tau_{ad} \cdot \pi \cdot D_c^2 \rightarrow D_c = \sqrt{\frac{F \cdot 10^3}{\pi \cdot \tau_{ad}}} = 32,8 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Tuttavia, onde evitare eventuali cedimenti indesiderati, è opportuno ragionare in funzione di un coefficiente di sicurezza pari a 1,5 come nella (4.3):

$$D_{c\_limite} = \frac{D_c}{CS} = 21,9 \text{ mm} \quad (4.3)$$

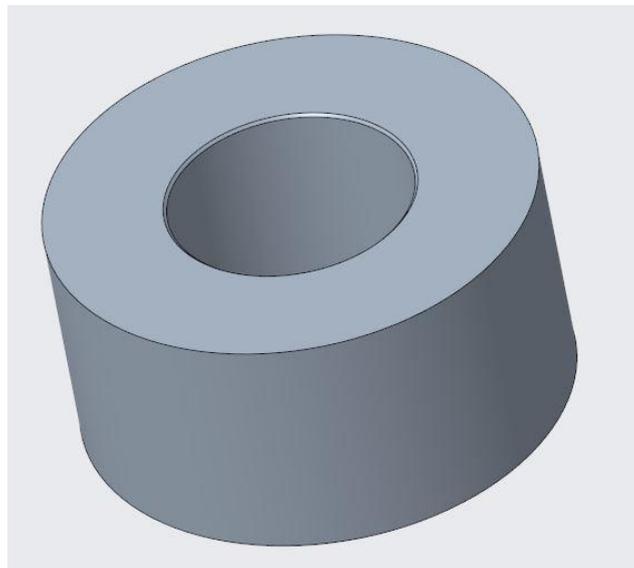
Tale valore analitico rappresenta il limite oltre cui non è possibile spingersi; se così non fosse, non si riuscirebbe a garantire la correttezza del processo. In riferimento ai calcoli appena compiuti e alla normativa di riferimento ISO 10123, sono state selezionate, come mostrato in **Figura 4.1**, le dimensioni del giunto pieno.



**Figura 4.1.** Dimensionamento del giunto pin-collar del caso studio.

### 4.3 – Creazione dei modelli

Partendo dalla geometria del collar pieno, riportata in **Figura 4.2**, è necessario, in prima istanza, identificare uno spessore ragionevole nel quale inserire le celle menzionate in precedenza, ovvero la cubica con nodo centrale (BCC + CP), la forata ed infine quella realizzata con modello generativo. Pertanto, si considera come riferimento ottimale la sezione circoscritta dai diametri 24 mm e 36 mm, in modo che, comunque, in ogni semisezione sia garantita la presenza di layer pieni di 2 mm all'interno e all'esterno; così facendo, l'area di contatto con il perno rimane inalterata e si facilitano sia la maneggevolezza, sia la stabilità complessiva. È bene sottolineare la presenza di un piccolo smusso di  $0,25 \times 45^\circ$ , inserito per favorire l'accoppiamento dei componenti di base.

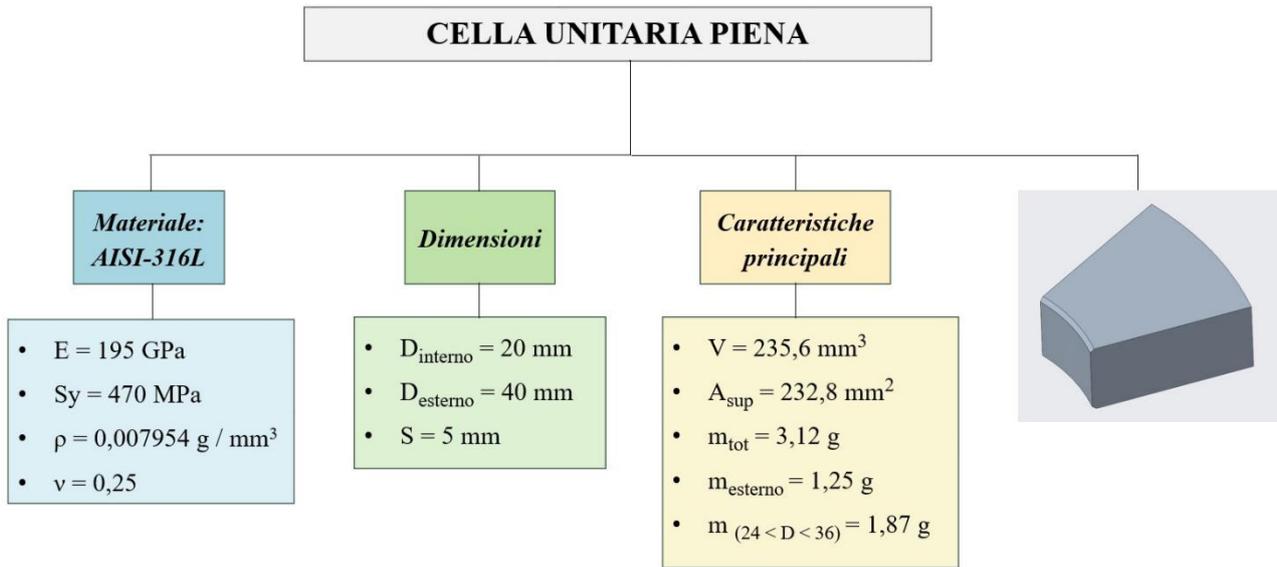


**Figura 4.2.** *Struttura piena del collar.*

L'assialsimmetria della parte in analisi consente di semplificare notevolmente la trattazione, poiché permette di compiere un approccio multi-scala, il quale si sposa perfettamente con la definizione di solidi cellulari; rispetto alla parte complessiva, ci si può facilmente riferire ad una porzione più piccola, la quale è anche più facile da modellare e da simulare.

Nel presente elaborato, il collar è stato scomposto in 12 celle affiancate in senso circonferenziale, disposte su 4 livelli, per un totale di 48 elementi; è chiaro come, benché si tratti di forme comunque immediate, ciò garantisce un certo risparmio in termini di tempi e costi computazionali. In **Figura 4.3** sono state riportate, oltre alla geometria, anche le dimensioni, le caratteristiche principali e le proprietà in massa della singola cella piena, la quale, però, per quanto detto precedentemente, può

essere a sua volta scomposta in due parti: una fissa alle estremità e una variabile centrale ( $24 \text{ mm} \leq D \leq 36 \text{ mm}$ ).



**Figura 4.3.** Dimensioni e proprietà in massa della singola cella piena.

Ovviamente, è possibile identificare la massa dell'intero mozzo moltiplicando quarantotto volte quella dell'elemento unitario, ottenendo così 149,9 g, valore che sarà utile nel successivo confronto per stimare l'alleggerimento conseguito con le varie architetture. Inoltre, grazie alla (4.4) si può risalire alla lunghezza dell'arco individuato in corrispondenza del diametro interno di 20 mm, che risulta essere:

$$L_{\text{arco\_interno}} = \frac{\beta}{360^\circ} \cdot \pi \cdot d_{\text{interno}} = 5,24 \text{ mm} \quad (4.4)$$

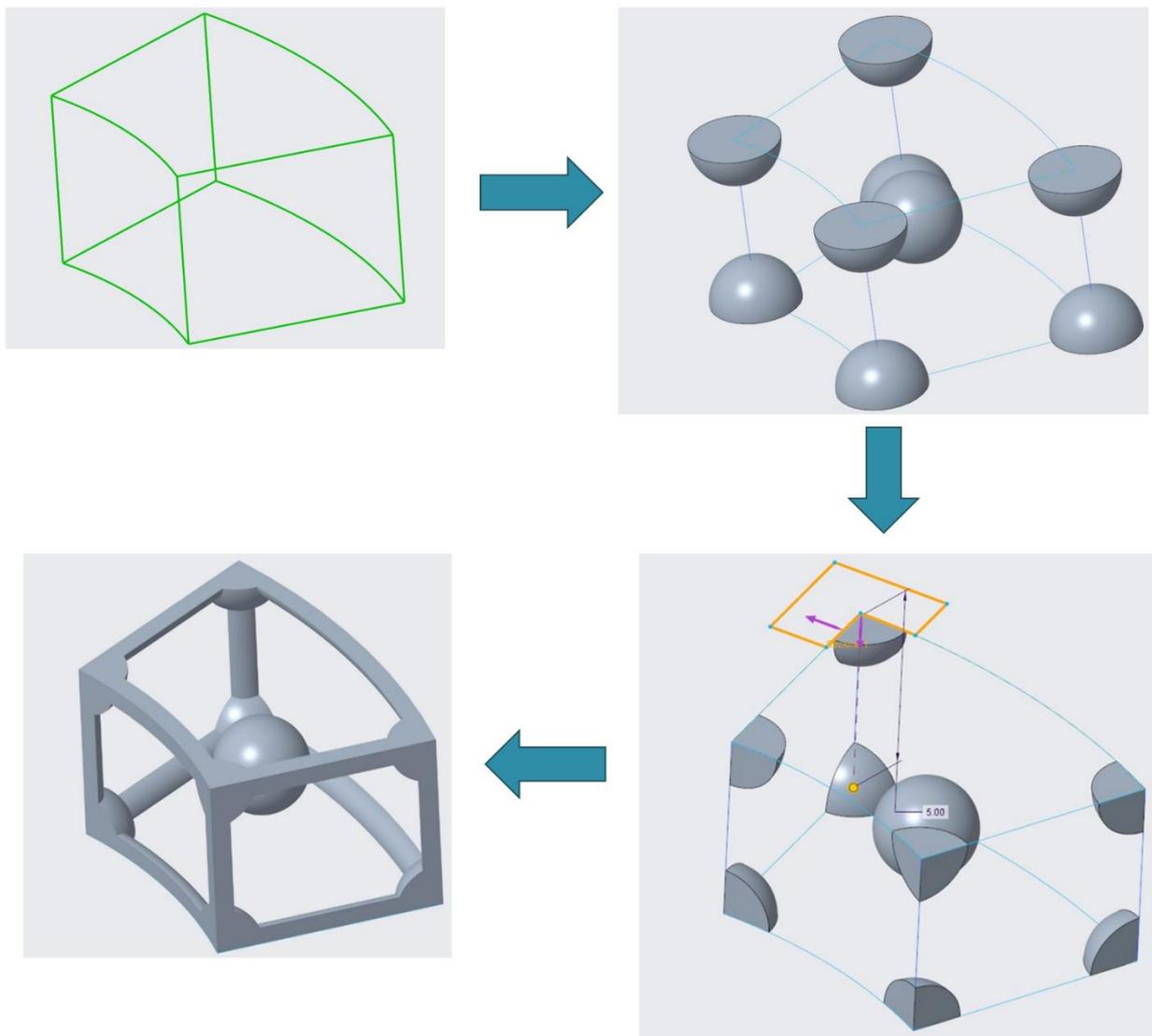
La grandezza  $\beta$  rappresenta, come definito dalla (4.5), l'angolo al vertice in gradi, calcolato a sua volta a partire dal numero di divisioni circonferenziali (n):

$$\beta = \frac{360^\circ}{n} = 30^\circ \quad (4.5)$$

#### 4.3.1 – Cella cubica con nodo centrale (BCC + CP)

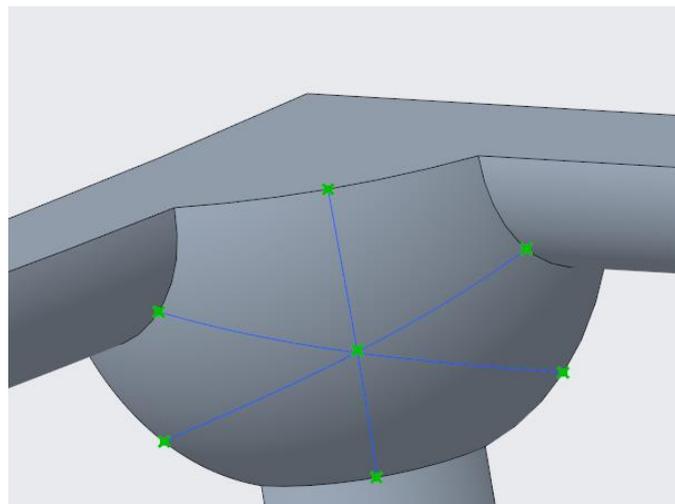
Con riferimento alla Sez. 1.2.2, e più precisamente alla **Tabella 1.1**, la scelta di realizzare una forma cubica con nodo centrale è legata alla sua architettura non eccessivamente bending-dominated; come sottolineato dal numero di Maxwell negativo ma molto vicino al valore nullo, questa conformazione è incline ad assorbire una certa quantità di energia, senza però limitare in modo eccessivo le caratteristiche resistenziali della parte.

Più nel dettaglio, come primo step è stato creato con il comando *sketch* il contorno esterno della geometria, il quale permette di definire i riferimenti su cui basare le operazioni successive. Dopodiché è stata realizzata la sfera centrale di diametro pari a 2,5 mm grazie all'unione di due semisfere definite a partire dall'input *rivoluzione*; analogamente, e con le medesime dimensioni, sono state disegnate le quattro semisfere ai vertici della conformazione, opportunamente contornate per mezzo di un vero e proprio taglio per asportazione di materiale. Successivamente, dallo schizzo iniziale sono stati creati simultaneamente, mediante il comando *sweep*, sia il profilo superiore che quello inferiore, entrambi curvi, con uno spessore di 0,5 mm. A questo punto, per chiudere la forma esterna, risultano necessarie le parti verticali, ottenibili a partire da un'estrusione dal piano di un quarto di circonferenza, anch'essa di diametro pari a 0,5 mm. In riferimento a quanto detto fino a questo momento, è possibile osservare la **Figura 4.4** per seguire l'evoluzione del processo.



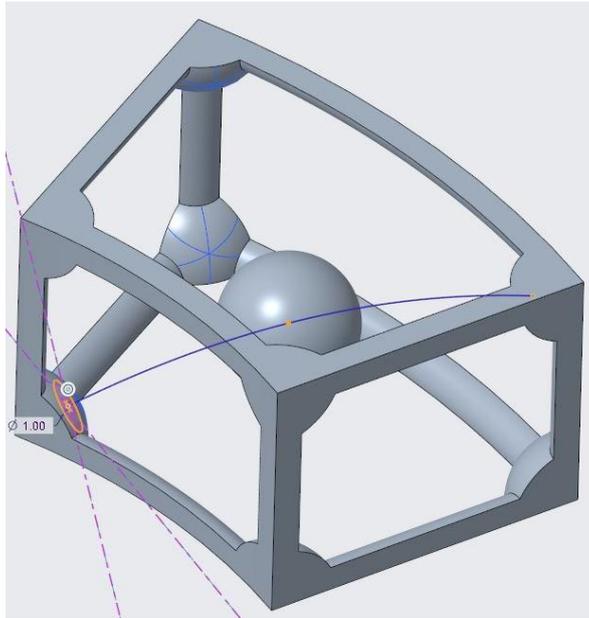
**Figura 4.4.** Processo per conferire la preforma alla cella BCC + CP.

Tuttavia, la fase più critica è stata quella legata all'individuazione del centro delle porzioni laterali su cui le singole trabecole di 1 mm vanno ad impegnarsi; in mancanza di un tool specifico che consentisse l'individuazione di un'entità su una superficie curva, si è scelto di operare con un metodo approssimato, ma che garantisse una buona stima del punto cercato, somigliante all'individuazione del baricentro di un triangolo qualunque. Infatti, dapprima sono stati identificati i “vertici” come punti medi di ogni lato, e, successivamente, sono stati congiunti per mezzo di spline che seguissero la superficie di riferimento, come mostrato in **Figura 4.5**. Questo accorgimento, che deve essere ripetuto per ogni parte interna della geometria, assicura che la connessione tra gli elementi costitutivi avvenga nel miglior modo possibile, evitando così sovrapposizioni indesiderate di materiale, le quali comprometterebbero le caratteristiche del sistema e implicherebbero una riprogettazione massiva tramite l'allargamento delle porzioni laterali o la riduzione del diametro della trabecola. Entrambe le soluzioni citate si rivelerebbero comunque controproducenti poiché nel primo caso si penalizzerebbe l'alleggerimento strutturale, aumentando la densità relativa della cella, mentre, nel secondo, si potrebbero violare i vincoli tecnologici di processo, generando una forte disparità nella trama superficiale del componente.



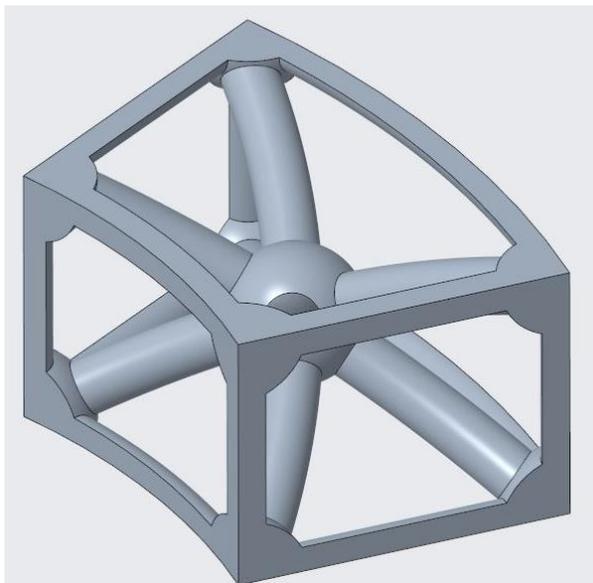
**Figura 4.5.** Individuazione del centro della sferetta laterale nella porzione interna.

Per rappresentare opportunamente gli elementi trabecolari, sono state costruite delle curve di riferimento passanti sia per il centro della sfera piena, sia per le varie coppie di punti corrispondenti, ovvero posizionati alle estremità opposte e individuati con il metodo enunciato precedentemente. Queste features, ottenute a partire dalla definizione di opportuni piani, rappresentano l'input da fornire al comando *sweep* per la generazione dei corpi finali, come mostrato in **Figura 4.6**.



**Figura 4.6.** Realizzazione dei profili trabecolari.

In **Figura 4.7** è stato riportato il risultato finale; tutte le grandezze sono state parametrizzate attraverso il comando *relazioni*, così che in caso di modifica, il cambiamento sarebbe avvenuto automaticamente, per ogni elemento coinvolto. È bene rimarcare che tale architettura, così come le altre proposte di seguito, rappresentano solamente i modelli di partenza della trattazione, i quali potrebbero essere opportunamente modificati a valle di successivi processi di simulazione per soddisfare i requisiti di resistenza e di deformazione; pertanto, non sono da escludere eventuali cambiamenti, anche radicali, in corso d'opera.



**Figura 4.7.** Design della cella cubica con nodo al centro ( $24 \leq D \leq 36$ ).

Ad ogni modo, a valle di queste operazioni di progettazione, è possibile valutare l'alleggerimento conseguito con l'introduzione di tali strutture all'interno del sistema, confrontando i valori con il caso di partenza. Dai dati proposti in **Tabella 4.1**, si può evincere una netta riduzione del volume, ma soprattutto della massa, la quale si attesta attorno a 0,36 g, definendo un calo dell'80,7% nella zona centrale, valore che tende a scendere al 48,4% nel computo totale per via della presenza delle parti laterali piene che si sommano ad entrambi i contributi. Pertanto, la massa complessiva del collar risulta pari a 77,3 g, al cospetto dei 149,9 g del caso iniziale.

**Tabella 4.1.** Confronto tra le proprietà in massa della struttura piena e di quella cubica.

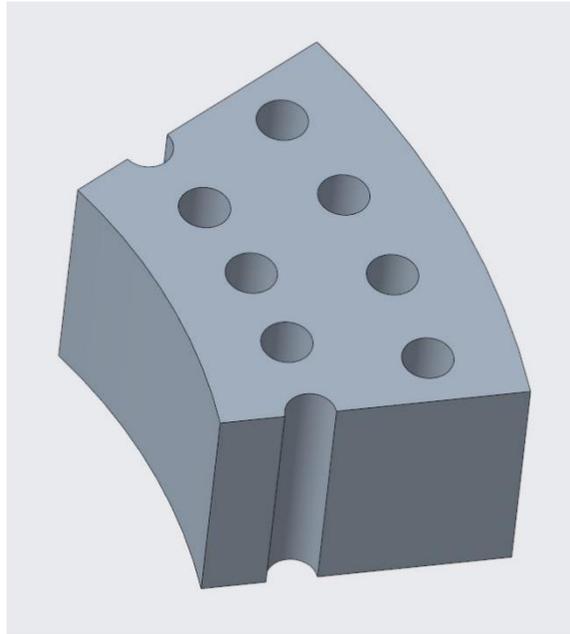
	<b>Cella piena (24 &lt; D &lt; 36 mm)</b>	<b>BCC + CP (24 &lt; D &lt; 36 mm)</b>	<b>Cella piena (20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>	<b>BCC + CP (20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>
$V [mm^3]$	235,6	45,4	392,4	202,4
$A_{sup} [mm^2]$	232,8	216,6	339,7	427,5
$m [g]$	1,87	0,36	3,12	1,61
% riduzione	–	80,7%	–	48,4%

#### 4.3.2 – Cella forata

Un ulteriore metodo per garantire una certa riduzione in massa è quello di “scavare” direttamente il materiale pieno con dei profili di forma idonea, che, in questo elaborato, sono stati individuati come dei semplici cilindri. A differenza dell'architettura precedentemente analizzata, ottenuta tramite la costruzione ex-novo in più passaggi, in questo contesto, si ricorre, più semplicemente, a tecniche di sottrazione tra moduli.

Contestualmente, è necessario scegliere un criterio di ripetizione per generare una disposizione favorevole dei fori, che permetta un alleggerimento corposo nel completo rispetto dei vincoli di processo; pertanto, piuttosto che una qualunque distribuzione libera, al fine di privilegiare l'omogeneità strutturale, si considerano dei pattern disposti su opportuni archi di circonferenza.

Un esempio di geometria è stato indicato in **Figura 4.8**, in cui si possono notare complessivamente otto aperture con diametro pari ad 1 mm; il numero di fori in direzione radiale è univocamente definito a partire dalla conoscenza sia della distanza tra l'arco interno e quello esterno, sia dalla distanza a cui si vogliono posizionare i vari corpi tra loro. Si può quindi intuire che, predisponendo i centri dei vari profili tubolari su archi a distanza di 2 mm sia dal bordo più vicino, sia tra loro, il numero massimo che si può ottenere in questo senso è pari a due.



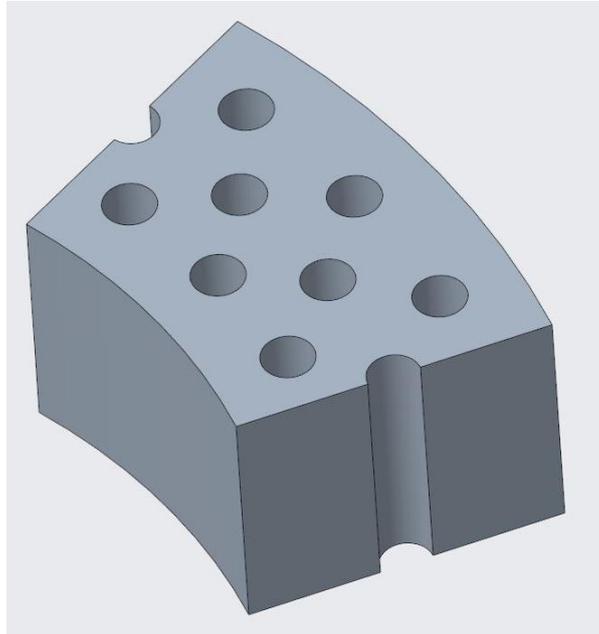
*Figura 4.8. 1° design della cella con profili cilindrici estrusi ( $24 \leq D \leq 36$ ).*

Al contrario, il numero di entità in direzione circonferenziale dipende direttamente dalla posizione di partenza scelta; ricordando che il passo angolare è stato fissato pari a  $7,5^\circ$ , le distribuzioni presentano quattro fori ciascuno, essendo l'angolo spazzato dalla cella pari a  $30^\circ$ . Al fine di assicurare una certa presenza di materiale tra i componenti in gioco, si sfalsano tra loro le geometrie corrispettive di un valore pari a metà del passo. In sintesi, se per  $d = 28$  mm si è partiti con un semi-profilo, corrispondente a  $0^\circ$ , per  $d = 32$  mm, la prima geometria viene generata ad una distanza di  $3,75^\circ$  da una delle due estremità per poi proseguire verso l'altra con sviluppo simmetrico.

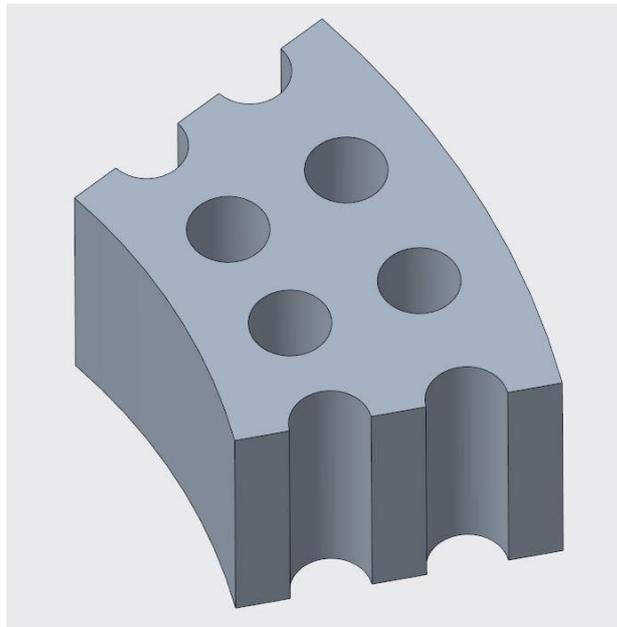
D'altra parte, però, si nota come questa configurazione sia ancora molto cautelativa in termini di materiale asportato; pertanto, è possibile pensare a delle alternative che si pongano l'obiettivo di migliorare questo aspetto. Precedentemente è stata supposta una distanza radiale tra le singole distribuzioni e il bordo più vicino pari a 2 mm, grandezza che può essere portata a 1,5 mm, consentendo così l'introduzione di un'altra sequenza, a metà tra le prime due, come mostrato in **Figura 4.9**; d'altro canto, si sceglie di ridurre a tre il numero di fori per ogni configurazione, per un totale di nove, mantenendo però l'alternanza successiva dei pattern.

Fino a questo momento ci si è concentrati principalmente sulla modificazione della disposizione dei corpi tubolari, lasciandone inalterata la grandezza; ovviamente, oltre ad aumentare il numero di forature, anche predisporre una dimensione maggiore potrebbe aiutare a conseguire un alleggerimento strutturale più spinto. Supponendo di aumentare a 1,5 mm il diametro complessivo di tutte le entità cilindriche, è fondamentale riarrangiare il sistema per evitare aree di materiale pieno

troppo piccole. Semplicemente, sono quindi state considerate delle distanze specifiche per lasciare almeno 1 mm di spessore ovunque, e, come mostrato in **Figura 4.10**, il sistema complessivo risulta dotato di sei fori totali e non presuppone alcuna alternanza; infatti, i singoli elementi delle due disposizioni sono stati ottenuti a partire dalla medesima bisettrice.



**Figura 4.9.** 2° design della cella con profili cilindrici estrusi ( $24 \leq D \leq 36$ ).



**Figura 4.10.** 3° design della cella con profili cilindrici estrusi ( $24 \leq D \leq 36$ ).

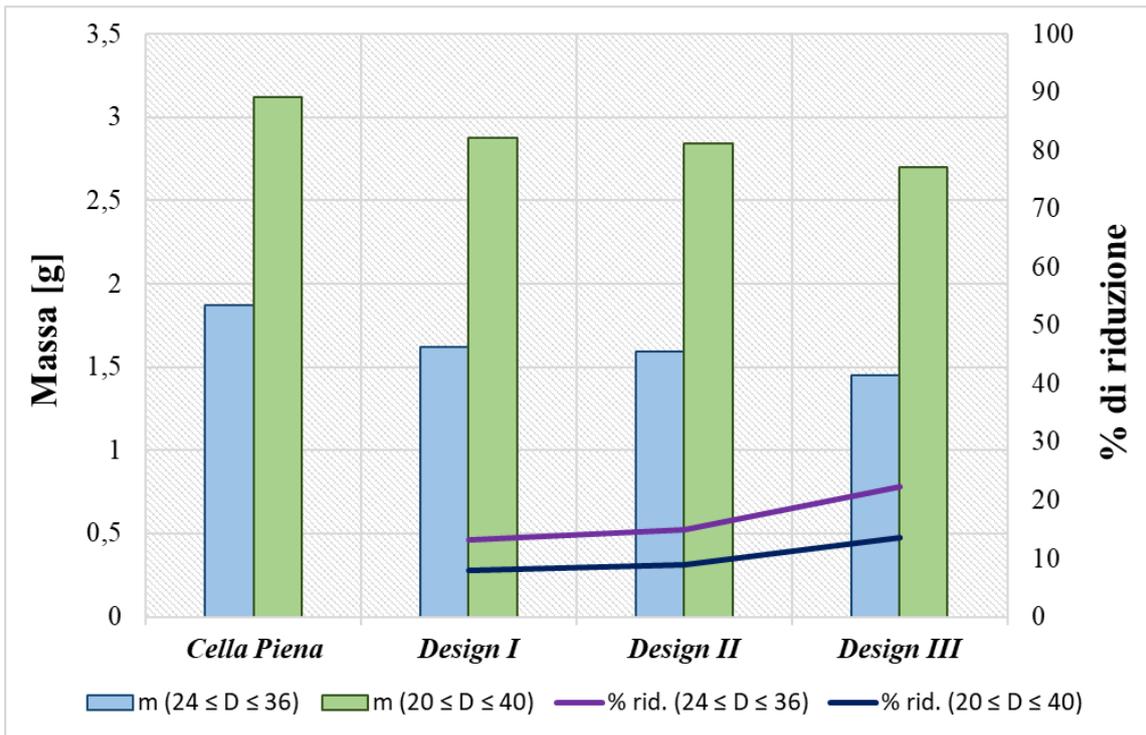
Come già visto nel caso della cella cubica, è possibile valutare l'alleggerimento conseguito con l'introduzione di parti forate all'interno del sistema, confrontando i valori sia tra le varie configurazioni prese in esame, sia con il caso di partenza pieno.

**Tabella 4.2.** Confronto tra le proprietà in massa della struttura piena e di quelle forate.

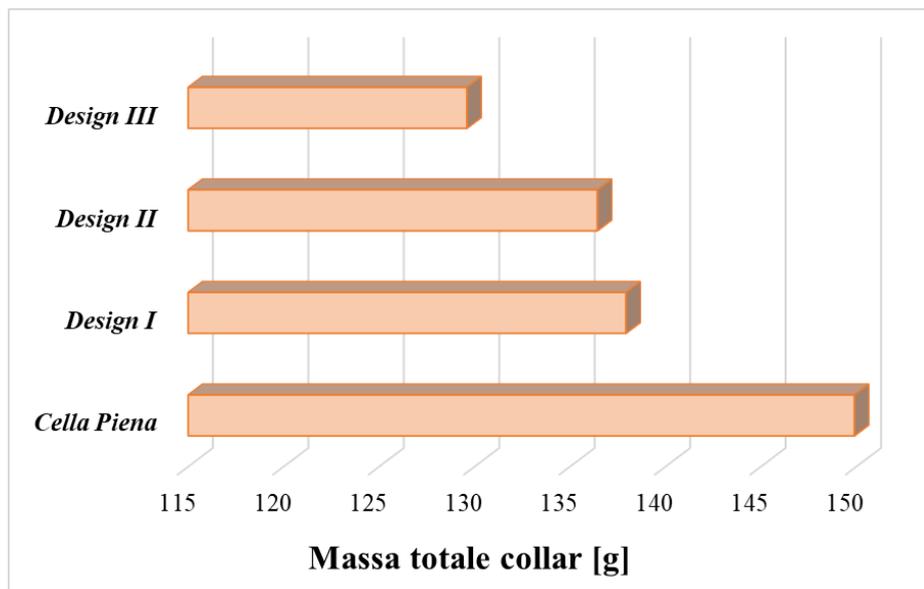
	<b>Cella piena</b> <b>(20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>	<b>Design I</b> <b>(20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>	<b>Design II</b> <b>(20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>	<b>Design III</b> <b>(20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>
$V [mm^3]$	392,4	312,8	353,4	339,7
$A_{sup} [mm^2]$	339,7	438,7	452,8	425,8
$m [g]$	3,12	2,87	2,84	2,70
<i>% riduzione</i>	–	8,00%	9,00%	13,5%

Dai dati proposti in **Tabella 4.2**, e visibili per esteso anche nel grafico in **Figura 4.11**, si può evincere come tutte e tre le configurazioni favoriscano un certo alleggerimento, con una tendenza favorevole soprattutto per il design con gli elementi cilindrici di 1,5 mm. Questa configurazione risulta la migliore poiché sull'intervallo di diametri compresi tra 20 e 40 mm determina una riduzione all'incirca del 13,5 %, rispetto delle altre due che si attestano intorno al 9 % o poco al di sotto.

Ovviamente questi valori risultano leggermente modificati quando non si considerano nel computo totale le parti laterali piene, ma l'andamento complessivo viene conservato in toto. Infine, dai valori legati alla meso-scala si può risalire, tramite una semplice moltiplicazione, alla massa totale del collar; rispetto ai 149,9 g di partenza, si ottengono, in funzione delle configurazioni, rispettivamente 137,9, 136,4 e 129,6 g (**Figura 4.12**). In conclusione, nel migliore dei casi, si riescono ad eliminare all'incirca 20 g dal valore di partenza.



*Figura 4.11. Confronto dei parametri in massa tra i vari design di cella forata.*



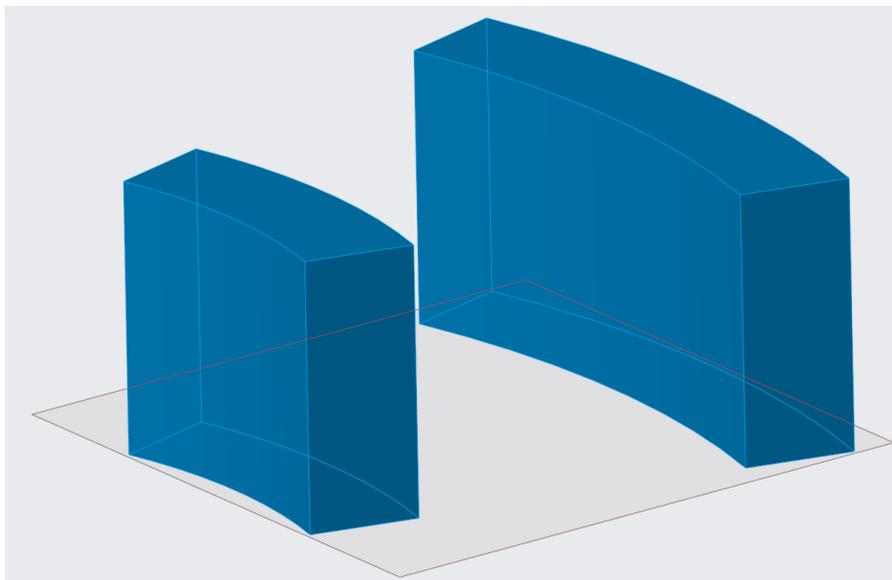
*Figura 4.12. Calcolo della massa totale del collar in funzione della forma della cella.*

### 4.3.3 – Cella con modellazione generativa

La trattazione si sviluppa con l'introduzione della cella ottenuta tramite progettazione generativa, ovvero una funzionalità di CAD 3D, presente direttamente all'interno dei software, che utilizza l'intelligenza artificiale per creare, in modo autonomo, modelli ottimali, a partire da un insieme di requisiti preliminari. In sostanza, tale tecnica, nota anche con il nome di ottimizzazione topologica, è una procedura che consente di determinare la forma più efficiente in base al materiale, ai vincoli e alle tensioni definite.

A differenza dei metodi tradizionali, in cui solitamente si creano più concept di un medesimo prodotto, ottimizzati poi in funzione degli obiettivi di progetto, nel design generativo si parte proprio dalla definizione di questi ultimi; per mezzo di algoritmi complessi, denominati genetici, il sistema è in grado di iterare continuamente le soluzioni, creando automaticamente parti ottimizzate; perciò, si possono identificare in tempi ridotti, e quindi assicurando un netto risparmio di risorse, diverse alternative che soddisfano vari requisiti, tra cui la riduzione di peso.

In prima istanza è necessario delimitare la porzione entro cui si forma la cella vera e propria; per tale scopo si sfruttano le sporgenze laterali di 2 mm ciascuna, come riportato in **Figura 4.13**. Quindi, a valle del processo, le caratteristiche finali della singola unità ripetente saranno conteggiate, a differenza dei casi precedenti, direttamente tra i diametri di 20 e 40 mm.



**Figura 4.13.** Individuazione del volume limite entro cui si sviluppa la progettazione generativa.

Una volta compiuto questo passo, è possibile interagire direttamente con l'interfaccia legata alla progettazione generativa, in cui, all'interno della voce *spazi di progetto*, si possono indicare, oltre alla geometria di partenza, sia le zone preservate, ovvero quelle laterali, sia, eventualmente, quelle

escluse, non presenti però in questo studio. In estrema sintesi, le prime non vengono in nessun modo intaccate durante l'ottimizzazione, mentre le seconde agiscono come ostacoli, e la soluzione si risolve tutt'attorno ad esse, ma mai al loro interno.

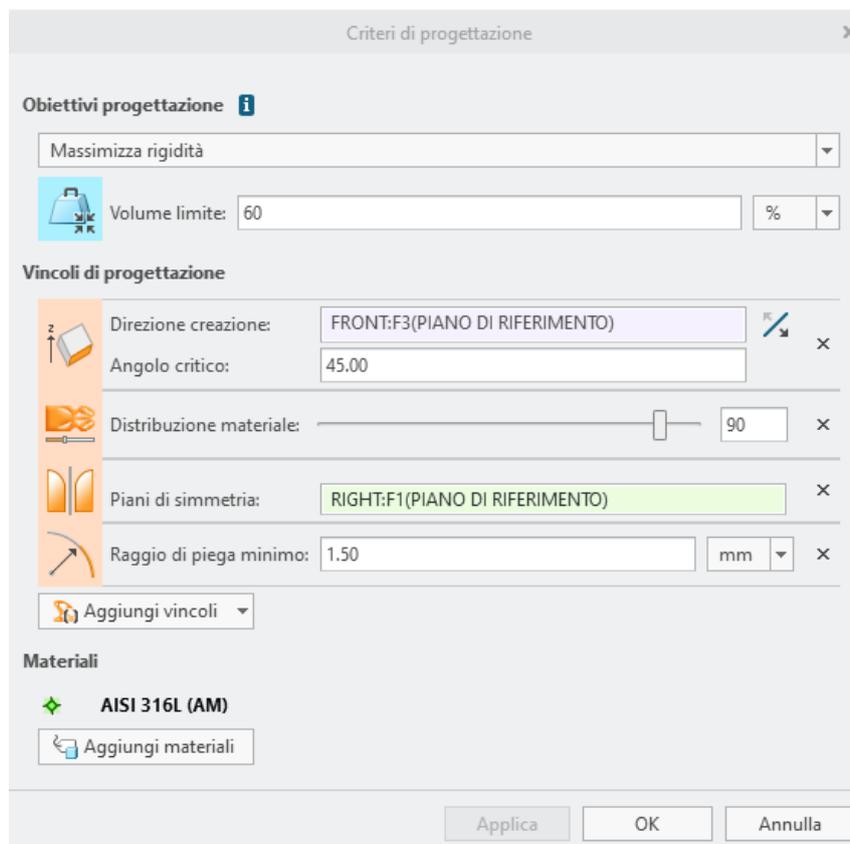
Un punto cruciale del modello ruota attorno alla definizione di opportune condizioni di carico e di vincolo. Pensando ad un classico provino pin-collar durante la fase di assemblaggio, la presenza dell'adesivo in corrispondenza del diametro interno impedisce qualunque movimento, fungendo da incastro, mentre il carico, che si sviluppa nella direzione verticale e il cui verso è definito dall'apparecchiatura utilizzata, viene trasferito fino al diametro esterno, dove, per convenienza, viene applicato. Inoltre, si suppone che tale sollecitazione venga ripartita equamente ed in modo omogeneo tra tutte le celle; così facendo, si può risalire facilmente al suo modulo, il quale risulta pari alla forza della pressa ( $F$ ) divisa per quarantotto. Infine, dato che il componente complessivo è assialsimmetrico, eventuali momenti torcenti non vengono considerati poiché equilibrati da parti corrispondenti, mentre altri contributi vengono trascurati per via delle dimensioni ridotte del sistema.

Successivamente, vengono selezionati i cosiddetti *design criteria* di primo tentativo, tra cui spicca l'obiettivo di progettazione, che, in questo frangente, è rappresentato dalla massimizzazione della rigidità, assumendo che il volume limite ( $V_{lim}$ ) sia pari, ad esempio, al 60%. Al contrario, scegliendo una minimizzazione della massa ed inserendo un qualunque coefficiente di sicurezza, non si riuscirebbe a pervenire ad una soluzione accettabile e concreta. Inoltre, devono essere designati anche i cosiddetti vincoli di processo, tra cui figurano:

- la distribuzione del materiale, impostata pari al 90% per cercare di rimuovere almeno una certa quantità del materiale in eccesso o che risulta inutilizzato, con lo scopo di ridurre la massa complessiva.
- La simmetria planare rispetto al piano medio;
- La direzione di creazione, la quale garantisce la riduzione del numero totale di supporti nei processi AM, con l'introduzione dell'angolo critico di  $45^\circ$  che rappresenta una vera e propria restrizione nel processo di fabbricazione.
- Il raggio di piega minimo, il quale fissa il più piccolo valore che la curvatura di una parte o di un componente può assumere. Tale parametro diventa rilevante quando sono previste delle operazioni di piegatura o delle lavorazioni di lamiera, mentre, nel caso in esame, ha una valenza più limitata e circoscritta; tuttavia, supportarlo molto più grande di una certa soglia non comporta alcun beneficio né a livello geometrico, né di alleggerimento strutturale, ma, d'altra parte, fa dilatare notevolmente la durata del processo di ottimizzazione. Al contrario, quando tale fattore è molto ridotto, si limitano drasticamente i tempi di simulazione, mentre la massa

complessiva ne risente solo in leggerissima parte, con variazioni del 2-3%, ma, contestualmente, si potrebbero verificare eventuali crepe o rotture locali durante la fase di produzione causate da concentrazioni di tensione per via di una minor rotondità del componente; alla luce di quanto detto, si considererà sempre un valore compreso tra 1,5 e 2 mm.

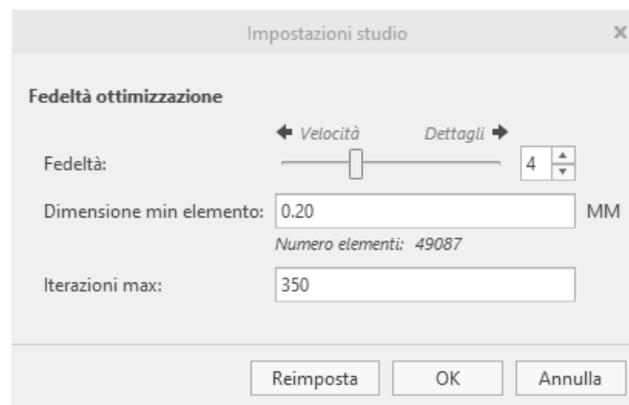
Un breve riepilogo di quanto detto è evidenziato in **Figura 4.14**, in cui, oltre ai parametri precedentemente menzionati, viene assegnato anche materiale, il quale è stato opportunamente creato in funzione delle proprietà e delle caratteristiche riportate nei datasheet.



**Figura 4.14.** Definizione dei design criteria.

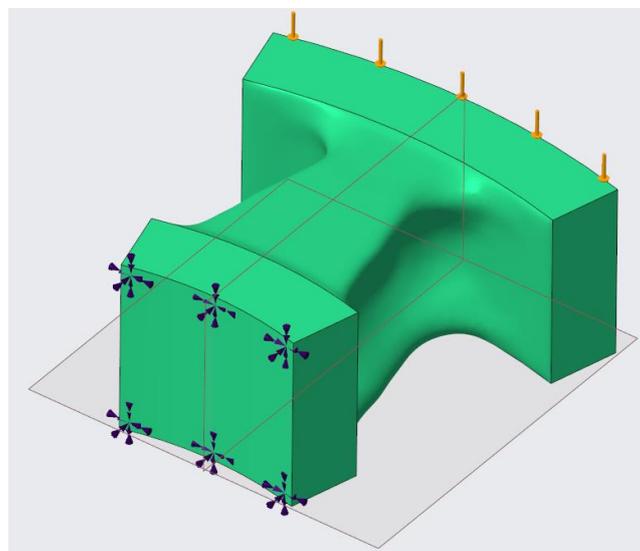
Risulta altresì fondamentale soffermarsi sulle *impostazioni di studio*, in cui compaiono, rispettivamente, sia la dimensione minima degli elementi, sia il numero massimo di iterazioni. Il primo parametro è fortemente legato al concetto di discretizzazione del componente; lavorare con elementi troppo grandi limiterebbe la precisione complessiva dei risultati, provocando una mancata convergenza dei risultati. D'altra parte, invece, un infittimento eccessivo potrebbe portare a costi computazionali troppo elevati, senza ottenere però nessun miglioramento in termini di accuratezza della soluzione. Il secondo parametro si riferisce invece al massimo numero di volte che la procedura può essere eseguita o ripetuta; in un certo senso, un valore elevato determina un risultato più preciso.

Tuttavia, si deve scongiurare la possibilità di sviluppare un ciclo infinito o che il processo richieda troppo tempo per terminare. In sintesi, imporre una dimensione minima degli elementi aiuta la convergenza dei risultati, mentre fissare il numero massimo di iterazioni è una misura di sicurezza per garantire che il processo abbia una fine. Nel contesto in questione, si cerca di favorire leggermente la velocità di esecuzione rispetto al grado di dettaglio, che però non deve mai venire meno; pertanto, come si può osservare in **Figura 4.15**, si impostano una dimensione minima dell'elemento pari a 0,20 mm, cui corrispondono all'incirca cinquantamila elementi, e un numero massimo di iterazioni pari a 350. Questa combinazione definisce un coefficiente di fedeltà uguale a 4, il quale si colloca all'incirca a metà strada nella scala programmata, che prevede valori interi crescenti da 1 a 10.

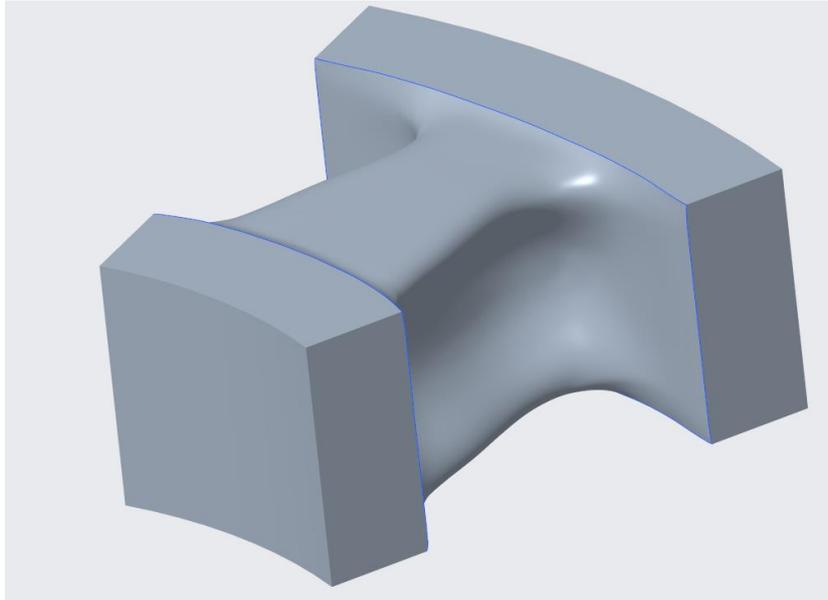


**Figura 4.15.** Selezione delle impostazioni di studio.

A valle dell'operazione di progettazione generativa si ottiene la cella riportata in **Figura 4.16**, che però non rappresenta ancora il componente finale, il quale viene delineato solo dopo aver previsto la ricostruzione automatica da parte del software con grado di risoluzione uguale a 3, ovvero il più alto in assoluto; il risultato finale è definito in **Figura 4.17**.



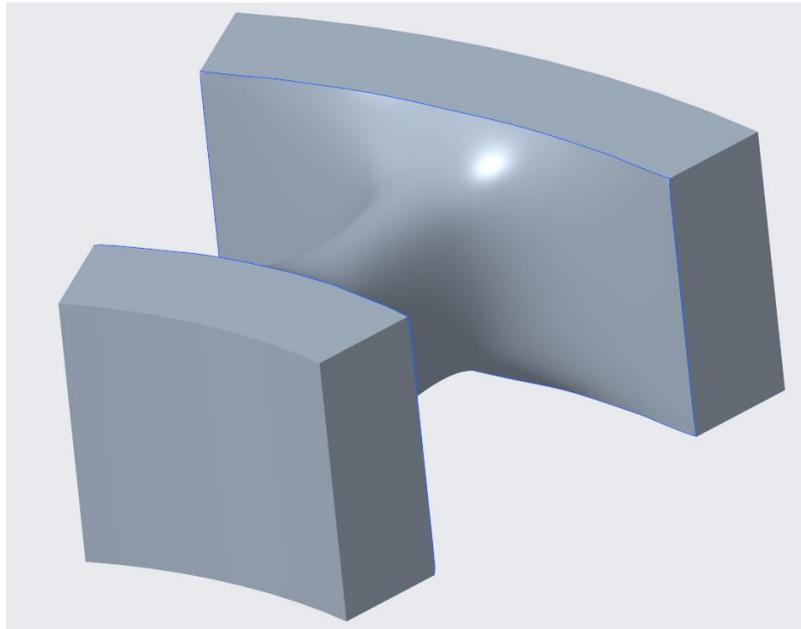
**Figura 4.16.** Geometria ottenuta a valle del processo di ottimizzazione.



**Figura 4.17.** Forma finale ricostruita  $V_{lim} = 60\%$ .

È bene sottolineare come, nonostante sia prevista la massima precisione nella ricostruzione, la forma finale non coincida perfettamente con quella ottenuta a valle dell'ottimizzazione generativa per via del differente strategia di modellazione tra i due metodi. Non esiste una regola fissa che stabilisca che uno dei due approcci porti alla formazione di geometrie più grandi, e quindi più pesanti, o più piccole, e quindi più leggere, rispetto all'altro, poiché ciò dipende direttamente dai parametri specifici e dalle scelte fatte durante la creazione del modello. Nel dettaglio, con gli obiettivi e i vincoli di progetto impostati, si riscontrano solamente delle sottilissime variazioni, soprattutto concentrate nei pressi degli spigoli. Tale risultato mette in luce l'ottima corrispondenza tra i due modelli e garantisce una previsione duale del comportamento e delle proprietà finali, senza che vi siano differenze troppo marcate.

Tuttavia, per avvicinarsi ulteriormente all'alleggerimento definito dalla cella BCC+CP, si riduce il valore del volume limite al 50%, lasciando inalterati gli altri parametri; il risultato perseguibile è stato mostrato in **Figura 4.18**. Spingendosi al di sotto di tale valore di  $V_{lim}$ , si ottengono geometrie cave, o comunque con elementi molto sottili, pertanto, ai fini dello svolgimento, si considerano sufficienti i due casi analizzati.



**Figura 4.18.** Forma finale ricostruita  $V_{lim} = 50\%$ .

Inoltre, come già effettuato nei paragrafi 4.3.1 e 4.3.2, è possibile valutare l'alleggerimento conseguito con l'introduzione di tali strutture all'interno del sistema, confrontando i valori ottenuti tra loro e con il caso pieno. Dai dati proposti in **Tabella 4.3** e graficati in **Figura 4.19**, si può evincere come, in entrambi i casi, tra i diametri di 20 e 40 mm si assista ad una netta riduzione del volume, dell'area superficiale ma, soprattutto, della massa. In definitiva, la cella completa possiede una massa rispettivamente di 1,93 g e 1,73 g, definendo una percentuale di riduzione del 38,2% e del 44,7%. La massa complessiva del collar, mostrata nell'istogramma in **Figura 4.20**, risulta quindi pari a 92,6 g o a 82,8 g, al cospetto dei 149,9 g del caso iniziale.

**Tabella 4.3.** Confronto tra le proprietà in massa della struttura piena e di quella generative.

	<b>Cella piena (20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>	<b>Generative → <math>V_{lim} = 60\%</math> (20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>	<b>Generative → <math>V_{lim} = 50\%</math> (20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>
$V [mm^3]$	392,4	243,0	216,9
$A_{sup} [mm^2]$	339,7	328,1	291,5
$m [g]$	3,12	1,93	1,73
<i>% riduzione</i>	–	38,2%	44,7%

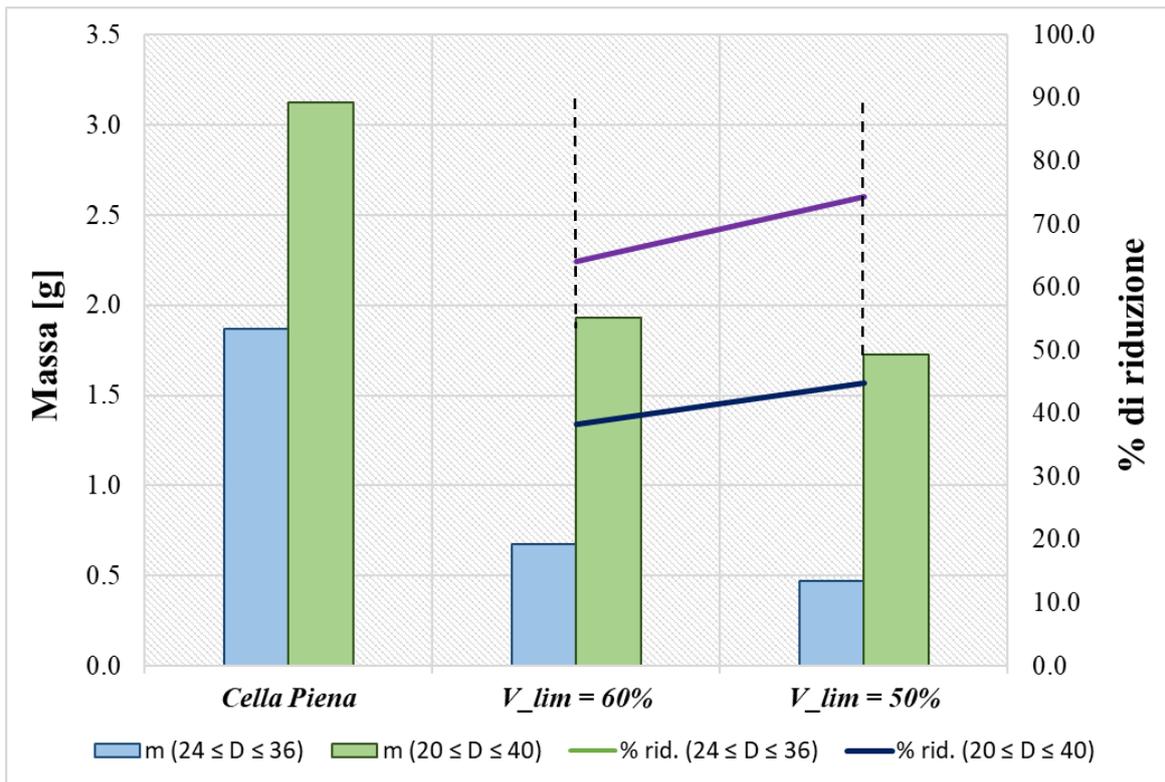


Figura 4.19. Confronto dei parametri in massa tra i vari design di cella generative.

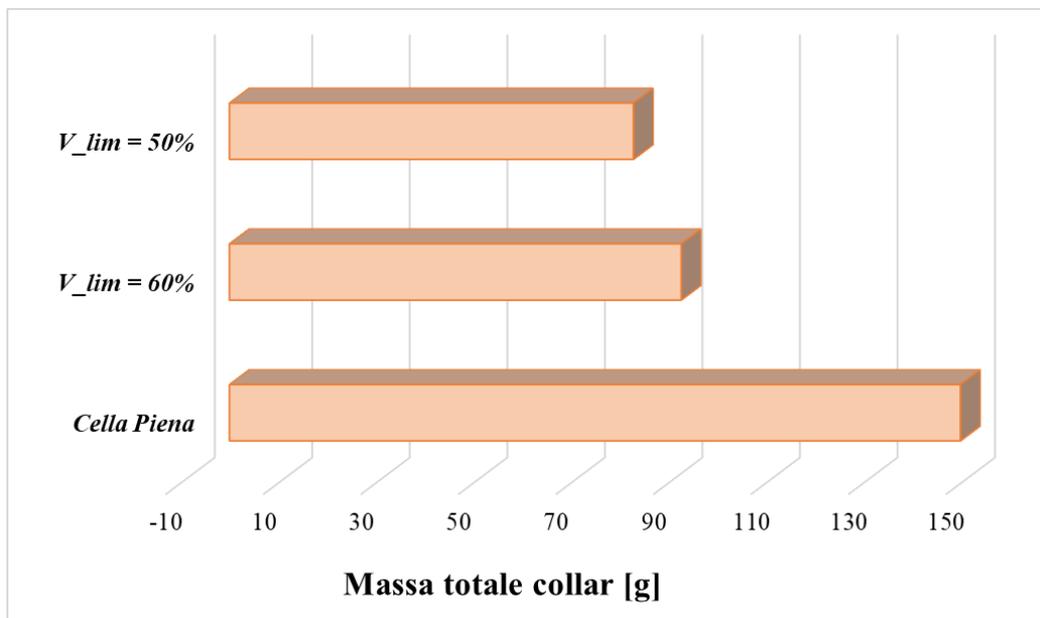


Figura 4.20. Calcolo della massa totale del collar in funzione della forma della cella.

## CAPITOLO 5 – Finite Element Analysis (FEA)

Di solito, quando si analizzano i sistemi continui, come le strutture o gli organi delle macchine, le forme geometriche e le condizioni al contorno risultano troppo complesse per poter applicare correttamente i classici procedimenti analitici, tra cui si annoverano, ad esempio, l'approccio dell'energia di deformazione uniforme e quello delle sezioni piane.

In tali situazioni, quindi, è favorevole riferirsi al metodo degli elementi finiti (FEM); una qualunque analisi basata su tale strategia (FEA) può essere implementata sotto forma di codici generici, che vengono utilizzati con successo per studi strutturali, sia statici che dinamici, termici, elettromagnetici e fluidodinamici.

In aggiunta alla grande flessibilità applicativa, questa tecnica non ha alcun tipo di vincolo geometrico, permette di definire diversi livelli di accuratezza ed evita la costruzione di un certo numero di prototipi; difatti, l'affinamento e l'ottimizzazione del modello avvengono virtualmente all'interno di un software. Solamente dopo aver ottenuto output soddisfacenti, si realizza effettivamente il componente, abbattendo così i costi di progettazione e produzione associati. Infine, gli strumenti FEM, oltre ad aiutare a scegliere il design migliore per una data applicazione, possono essere impiegati anche per investigare le cause di possibili problemi riscontrati dopo il lancio di un prodotto nel mercato [53].

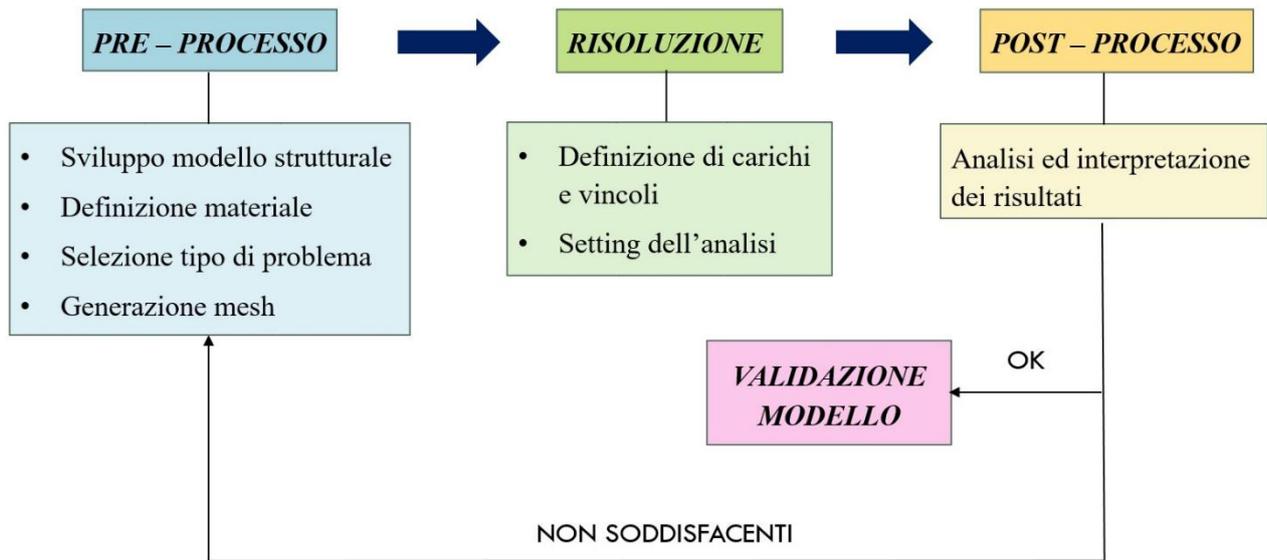
L'idea su cui poggia tale procedura è quella di poter risolvere una singola equazione differenziale alle derivate parziali o un sistema di esse, tramite l'approssimazione con delle corrispettive algebriche, dopo aver definito il funzionale in forma integrale, ovvero un'equazione di bilancio. Tale condizione permette di passare da un problema continuo con numero infinito di incognite ad uno discreto con numero finito di esse, e quindi risolvibile per via numerica.

Pertanto, il campo incognito viene espresso in termini di funzioni approssimanti, note anche con il nome di funzioni di forma, le quali hanno un andamento noto, vengono definite all'interno di ogni singolo elemento e sono individuate a partire dai valori che la variabile dipendente, ovvero lo spostamento ( $u$ ) nel caso strutturale, assume in punti specifici chiamati nodi. In sintesi, i valori nodali della variabile di campo rappresentano le nuove incognite del sistema discretizzato.

La scelta delle shape functions è arbitraria, anche se solitamente il parametro  $u$  viene espresso con funzioni polinomiali poiché facilmente derivabili. Ad ogni modo, i risultati finali dovranno convergere al valore di riferimento, e ciò è strettamente correlato sia al numero di elementi utilizzati, sia al grado stesso del polinomio.

Come riportato dalla mappa concettuale in **Figura 5.1**, un'analisi agli elementi finiti si compone di tre fasi principali, ovvero:

- pre-processo, in cui viene sviluppato il modello strutturale, definito il materiale con le sue caratteristiche principali, selezionata la tipologia di problema e generata la mesh;
- risoluzione, gestita dal programma in funzione delle istruzioni definite dall'utente;
- post-processo, in cui vengono valutati ed analizzati i risultati forniti dal risolutore numerico.



**Figura 5.1.** Individuazione delle fasi di un'analisi basata sul FEM.

A valle dell'elaborazione dei dati si possono delineare due scenari alquanto diversi tra loro, poiché se i valori ottenuti sono soddisfacenti, si provvede a validare il modello ricercando una correlazione con opportune prove sperimentali, mentre se così non fosse, si dovrebbe procedere a ritroso apportando alcune modifiche di base alla geometria, o al materiale o alla mesh, fintanto che non si ricade nel caso precedente. Il carattere spiccatamente ciclico ed iterativo del processo garantisce un affinamento ed un'ottimizzazione continua nel tempo, una miglior flessibilità operativa, oltre che una prevenzione da eventuali problemi che potrebbero emergere nelle fasi successive; così facendo, questi vengono affrontati prima che diventino troppo grandi e costosi.

Nel FEM esistono due approcci assai diversi per poter risolvere le equazioni differenziali alle derivate parziali; si parla di metodo implicito ed esplicito, i quali differiscono principalmente per il modo in cui viene aggiornata la condizione iniziale. Il primo risulta molto più stabile poiché non presenta vincoli sull'incremento di tempo (time step), il quale può essere modificato opportunamente a seconda dei problemi di convergenza; inoltre, a meno che l'indagine non sia lineare, si deve ricorrere ad un approccio iterativo per l'approssimazione delle radici. Il secondo, invece, consente di

risparmiare in termini di difficoltà computazionale nell'analisi di fenomeni fortemente non lineari e non presenta problemi di convergenza, ma, alle volte, diventa poco stabile poiché l'incremento di tempo rimane fisso e pari al valore iniziale.

Nell'elaborato in questione si sfrutta il software Ansys Workbench per eseguire uno studio preliminare rivolto ad analizzare il comportamento delle geometrie definite nel *Capitolo 4*, mettendo in evidenza le loro peculiarità, tra cui quella di assorbimento energetico, valutata, per semplicità, in condizioni puramente statiche (metodo implicito) come integrale della curva forza–spostamento; avendo a che fare con una sollecitazione considerata costante lungo tutta l'area superficiale, la descrizione si riduce semplicemente alla ricerca della cella che si deforma maggiormente. Una riprova importante viene fornita dal valore della tensione equivalente secondo Von Mises, rapportata sia al limite di snervamento, sia a quello di rottura.

D'altro canto, nelle prove dinamiche la trattazione dei transitori, spesso associata a non-linearità, assume una grande importanza, tanto che i metodi impliciti risultano inefficienti, mentre si prediligono quelli espliciti, i quali definiscono, in questa situazione, un costo computazionalmente inaccettabile. L'unico aspetto che può essere messo in luce è sicuramente quello riportato in alcuni articoli scientifici [30][48], dove è stata trovata una certa corrispondenza nel comportamento quasi-statico e dinamico delle strutture per bassi regimi di velocità d'impatto. Non è possibile fare ulteriori considerazioni a priori quando lo strain rate aumenta sensibilmente; pertanto, saranno necessari ulteriori studi più dettagliati e approfonditi che esulano dallo scopo della tesi.

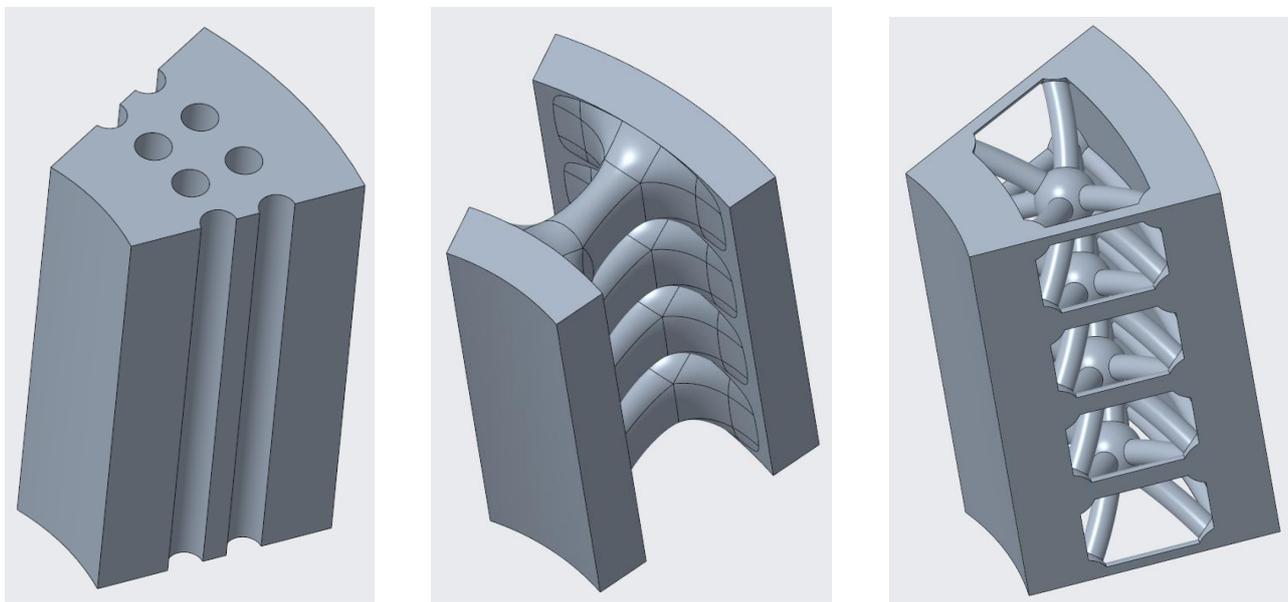
### **5.1 – Pre-processo**

Come prima cosa, a valle delle operazioni di progettazione delle varie celle che compongono il collar, si compie una cernita sulle geometrie che si vogliono analizzare e simulare; contestualmente all'alleggerimento strutturale determinato, si selezionano quindi, oltre all'unico esemplare cubico con nodo centrale, la forata con fori pari ad 1,5 mm e la generativa con  $V_{lim}$  pari al 50%. Inoltre, dato che le topologie sono di per sé abbastanza elementari e scarsamente complesse, non si prevedono ulteriori fasi di semplificazione della forma, eccezion fatta per l'eliminazione dello smusso atto a favorire l'imbocco del pin nel collar. Del resto, sono del tutto assenti altre parti che potrebbero provocare problematiche durante il calcolo.

In più, nonostante si volesse partire dallo studio della singola unità che si ripetesse sia in altezza con una simmetria lineare, sia lungo la direzione circonferenziale, in modo da ridurre al minimo gli oneri computazionali e da definire una condizione che fosse la più fedele possibile al caso reale, è stato

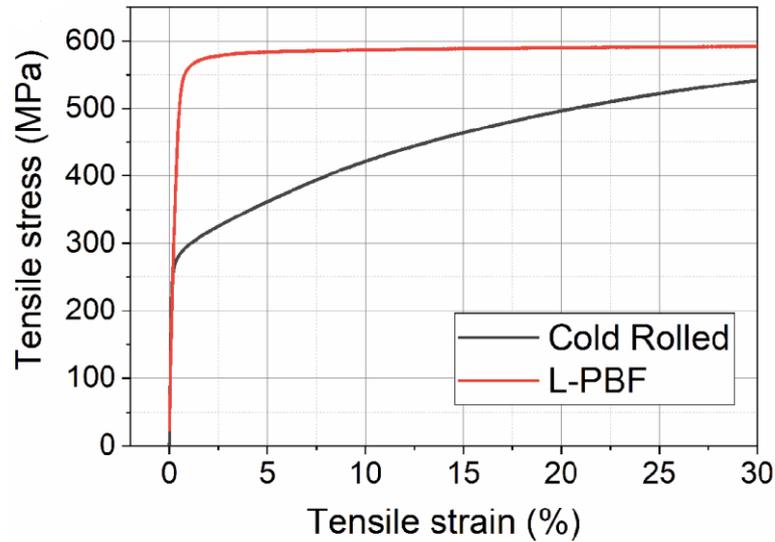
necessario virare verso tecniche alternative; infatti, l'idea di base non è stata perseguibile poiché il software nella sua versione student può gestire solamente una delle due condizioni alla volta; la loro contemporanea presenza, per via del differente modo in cui vengono definite, determina una condizione di conflitto che impedisce la corretta realizzazione della mesh.

Perciò, si è sfruttata la teoria del minimo superiore, prendendo in considerazione il componente più piccolo dopo la singola cella che permettesse uno studio coerente e corretto dell'intera struttura; così facendo, il concetto di meso-scala viene rivisto. In sintesi, vengono sovrapposti i quattro livelli di celle in altezza, demandando al software, attraverso appositi input, il compito di valutare l'effetto legato alla ripetizione circolare delle parti. In **Figura 5.2** sono mostrate le varie geometrie aggiornate, ottenute tramite il comando *serie geometrica* all'interno di Creo Parametric.



**Figura 5.2.** Geometrie aggiornate utilizzate come input delle simulazioni.

Dopo aver selezionato la tipologia di analisi, all'interno dell'Engineering Data devono essere inserite, con riferimento ai parametri di processo ottimali individuati in **Tabella 1.2**, le grandezze associate ai componenti realizzati con tecniche additive che sfruttano come precursore le polveri di AISI-316L (**Tabella 5.1**). Come si può notare dalla **Figura 5.3**, rispetto ai prodotti finali ottenuti mediante, ad esempio, laminazione a freddo, i processi LPBF spostano verso l'alto i limiti resistenziali e, soprattutto, avvicinano il valore della tensione di snervamento con quello di rottura, definendo una pendenza della curva in campo plastico molto meno accentuata. Pertanto, visto che la parte dovrà deformarsi plasticamente per poter assorbire una maggior quantità di energia, è necessario ricadere all'interno di questo range molto più ristretto. Inoltre, essendo state eseguite delle analisi puramente strutturali statiche a temperatura ambiente, gli effetti termici vengono completamente trascurati.



*Figura 5.3. Confronto delle curve tensione-deformazione in funzione di diversi processi produttivi.*

*Tabella 5.1. Proprietà del materiale AISI-316L per AM.*

Grandezza di riferimento	
$\rho$ [kg / m <sup>3</sup> ]	7954
$T_{fusione}$ [°C]	1380
$E$ [GPa]	195
% $E$	40%
$HV$	204
$\nu$	0,25
$G$ [GPa]	78
$\sigma_y$ [MPa]	470
$\sigma_r$ [MPa]	650

Una volta compiuto questo passaggio, è fondamentale impostare le corrette unità di misura e definire, oltre a quello cartesiano, anche un sistema di riferimento di tipo cilindrico, riferito per comodità, alla faccia interna del componente, facendo particolare attenzione alla disposizione degli assi poiché la rotazione deve essere contenuta nel piano in cui si verifica la riproduzione degli elementi.

Successivamente, si è optato per l’inserimento di una simmetria di tipo ciclica, imponendo al software di considerare, nel computo dei risultati, l’affiancamento di più parti fino alla chiusura completa del profilo; per far ciò sono state definite le superfici limite superiori e inferiori.

La creazione della mesh è un passaggio molto delicato poiché la grandezza degli elementi che la compongono deve essere ottimale per permettere che la simulazione termini senza errori o punti di singolarità e, allo stesso tempo, non deve appesantire troppo i calcoli; si riterrà soddisfacente l'analisi in cui due nodi contigui mostrano valori che differiscono al massimo del 25%. È quindi impossibile stabilire a priori quale sia la soluzione da adottare per creare la giusta discretizzazione, ma si deve procedere iterativamente, agendo, oltre che sui classici parametri, anche sul cosiddetto growth rate, il quale definisce la massima differenza dimensionale tra due elementi limitrofi, delineando quanto velocemente la forma della maglia cambia. Inoltre, per favorire la creazione di una griglia uniforme e corrispondente tra le due superfici limite, che sono il fulcro della ripetizione circolare, è cruciale definire il cosiddetto mesh control. Ovviamente, il tempo di calcolo cresce molto rapidamente quando il numero di elementi totali aumenta poiché esso risulta approssimativamente proporzionale al quadrato dei gradi di libertà presenti nel sistema; in genere, ogni nodo possiede sei gradi di libertà (tre traslazioni e tre rotazioni).

## 5.2 – *Processo*

In questa fase vengono applicate le condizioni al contorno, ossia i carichi e i vincoli a cui è sottoposto il corpo, al fine di replicare quanto più fedelmente le condizioni reali. Nel caso in esame si parte dal presupposto di voler simulare la condizione più gravosa del componente in esercizio, posizionando un “fixed support” in corrispondenza del diametro esterno pari a 40 mm, mentre l'adesivo genera tenuta in corrispondenza del diametro interno pari a 20 mm, con una forza dipendente da  $\tau_{ad}$  pari a 37 MPa, dallo spessore complessivo (s) pari a 20 mm, dal raggio interno e dal numero di ripetizioni (n), come riportato nella (5.1):

$$F = \tau_{ad} \cdot \frac{2\pi \cdot r_{int} \cdot s}{n} = 3875 \text{ N} \quad (5.1)$$

Il solutore, automaticamente, verifica il collegamento tra i nodi presenti all'interno del modello, il quale rimane valido per tutte le categorie di celle analizzate.

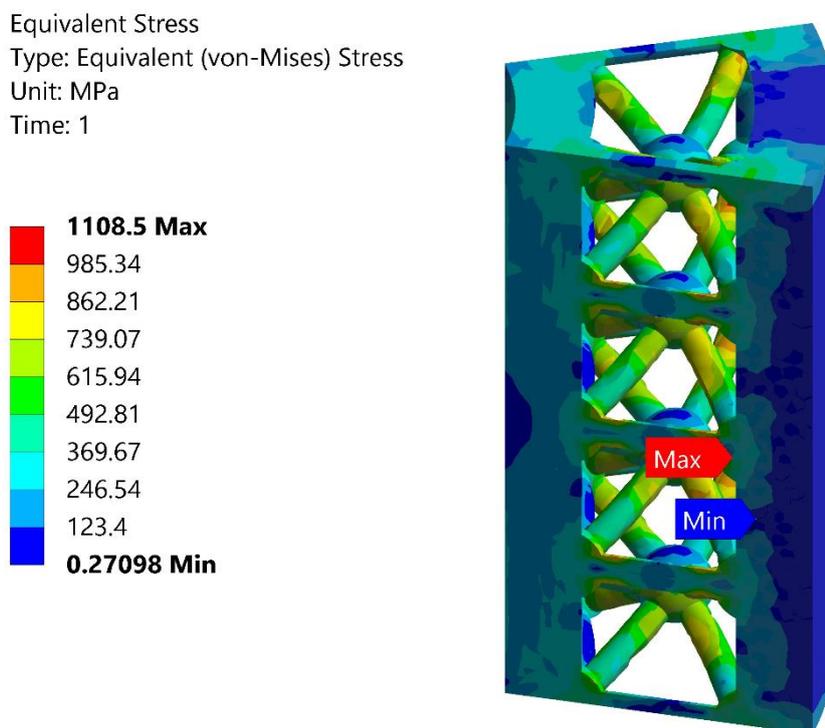
## 5.3 – *Post-processo*

Una volta portate a termine le simulazioni, si entra direttamente nella fase di post-processo, in cui viene valutata la risposta strutturale elaborata dal risolutore numerico, in termini di tensioni, deformazioni, caratteristiche di sollecitazione, spostamenti e reazioni vincolari. Come già accennato nei paragrafi precedenti, in questa argomentazione, si ricerca la struttura che è in grado di garantire

un'ottima capacità di assorbimento energetico, senza penalizzare troppo la resistenza statica. Questi aspetti possono essere facilmente colti mettendo in luce l'aspetto deformativo della parte, la quale comunque non deve rompersi poiché, per come è costituito il sistema, dovrà essere l'adesivo a cedere e non il materiale stesso. Tanto più il componente riesce a deformarsi plasticamente, tanto maggiore è l'area sottesa nel diagramma tensione-deformazione e quindi l'energia assorbita.

### 5.3.1 – *Struttura con celle cubiche con nodo centrale (BCC + CP)*

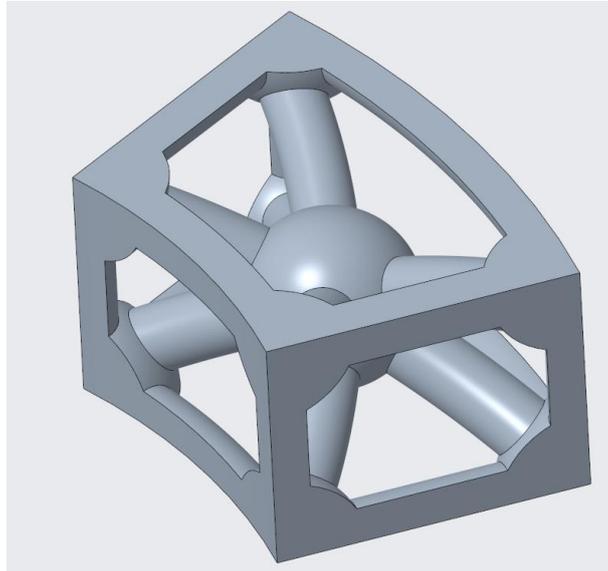
Gli output conseguiti in termini di tensione equivalente secondo von Mises sono stati riportati in **Figura 5.4**; il materiale nelle parti laterali permane in campo elastico, mentre gran parte delle trabeccole entra in campo plastico, denotando un'ottima capacità di assorbimento energetico, come auspicato, in quella zona. Tuttavia, la resistenza del sistema viene fortemente penalizzata, tanto che in molte aree, anche abbondantemente, si supera la tensione di rottura del materiale, fissata, per convenzione a 650 MPa. Più nel dettaglio, non si notano picchi concentrati che facciano presagire ad un errore di mesh, ma la distribuzione risulta abbastanza uniforme da far intuire che semplicemente è presente troppo poco materiale affinché esso possa resistere.



**Figura 5.4.** *Distribuzione della tensione equivalente della BCC + CP.*

A valle delle considerazioni effettuate in precedenza, risulta pertinente provare a modificare la geometria del sistema al fine di estrapolare dei dati più significativi ed in linea con le aspettative.

Pertanto, dopo molti tentativi svolti iterativamente, si è cambiata la cella fino ad arrivare alla forma definita in **Figura 5.5**; riassumendo, la sfera centrale e quelle laterali sono state aumentate fino ad un diametro di 3,5 mm, mentre sia il profilo superiore, sia quello inferiore, sia le parti verticali, presentano uno spessore pari a 0,7 mm, al cospetto degli 0,5 mm precedenti.



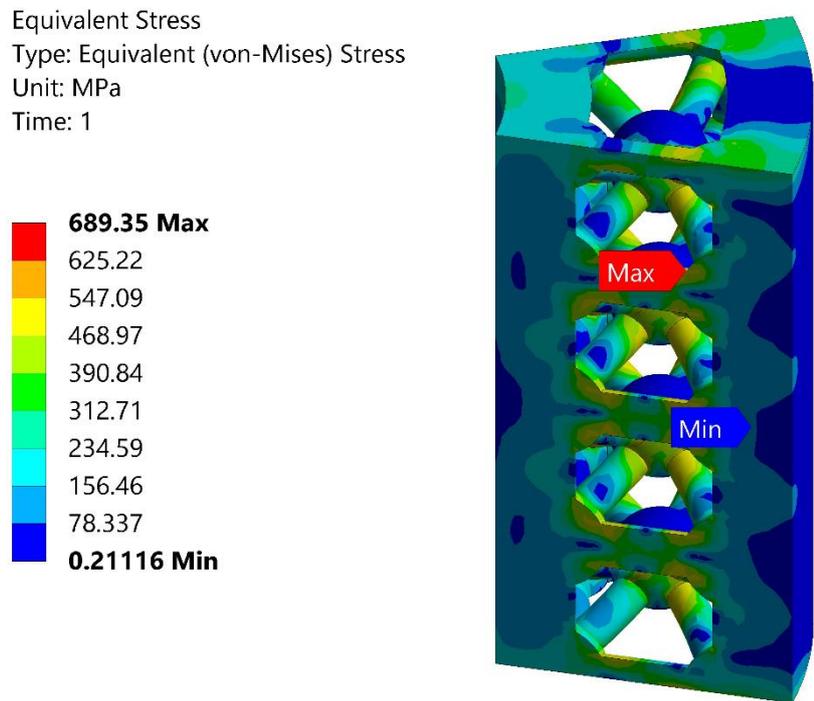
**Figura 5.5.** Nuovo design della cella cubica con nodo al centro.

A seguito di tali variazioni, è necessario aggiornare le proprietà di massa introdotte nel *Capitolo 4*, come riportato in **Tabella 5.2**. Nominalmente parlando, a causa dell'ulteriore aggiunta di materiale, la cella è diventata leggermente più pesante, ma comunque, tra i diametri di 20 mm e 40 mm garantisce un alleggerimento complessivo pari all'incirca al 39%, rimanendo comunque competitiva nei confronti di quella con modellazione generative e ben molto avanti rispetto a tutte le tipologie forate. A questo punto, la massa complessiva del collar è pari a 91,7 g, molto al di sotto dei 149,9 g di partenza.

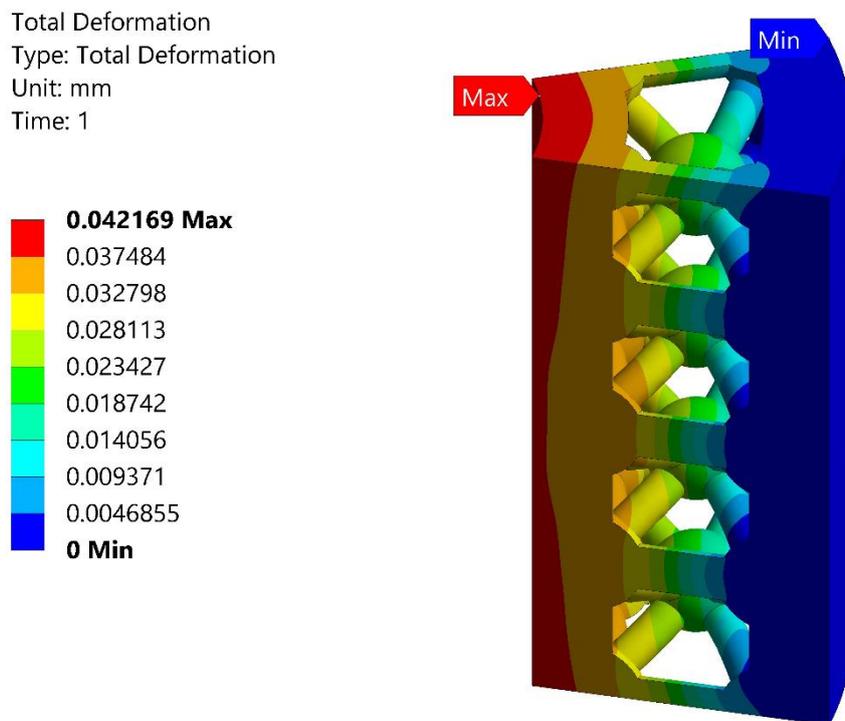
**Tabella 5.2.** Confronto aggiornato tra le proprietà della struttura piena e di quella cubica.

	<b>Cella piena (24 &lt; D &lt; 36 mm)</b>	<b>BCC + CP (24 &lt; D &lt; 36 mm)</b>	<b>Cella piena (20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>	<b>BCC + CP (20 &lt; D &lt; 40 mm)</b>
$V [mm^3]$	235,6	83,3	392,4	240,4
$A_{sup} [mm^2]$	232,8	276,5	339,7	460,3
$m [g]$	1,87	0,66	3,12	1,91
% riduzione	–	64,6%	–	38,8%

Ritornando all'ambito simulativo, in **Figura 5.6** e **5.7** sono stati raffigurati rispettivamente la tensione equivalente secondo von Mises e lo spostamento complessivo del nuovo sistema.



**Figura 5.6.** Distribuzione della tensione equivalente nella nuova configurazione della BCC + CP.



**Figura 5.7.** Andamento dello spostamento totale nella nuova configurazione della BCC + CP.

È possibile notare che, rispetto al caso precedente, le tensioni equivalenti si attestano globalmente su valori più bassi, che rispettano pressochè in toto il limite a rottura. In questo caso, si possono registrare alcuni picchi localizzati che potrebbero essere causati da un infittimento insufficiente, ma, che comunque eccedono il limite fissato solamente del 5%, quindi con buona probabilità, il sistema non andrà incontro a rottura. Permane tuttavia un comportamento abbastanza omogeneo delle trabecole, seppur molto meno rispetto a prima poiché i corpi sono leggermente più corti e tozzi.

L'andamento dello spostamento complessivo rispetta globalmente le aspettative poiché la struttura si muove verso il basso, contestualmente alla direzione in cui viene applicata la forza di spiantaggio da parte della pressa; inoltre, è possibile puntualizzare come, in corrispondenza della sezione in cui è applicato il vincolo, i valori sono pressochè nulli, mentre, man mano che si procede in direzione opposta, tale valore aumenta fino al massimo assunto in corrispondenza dell'estremo "libero" con un modulo pari a 0,042 mm, il quale risulterà molto utile nel successivo confronto qualitativo con le altre architetture.

Infine, questa nuova configurazione, permette sicuramente un assorbimento energetico inferiore rispetto al caso originale poi modificato, ma sicuramente bilancia molto meglio tale caratteristica con le proprietà resistenziali.

### **5.3.2 – Struttura con celle forate**

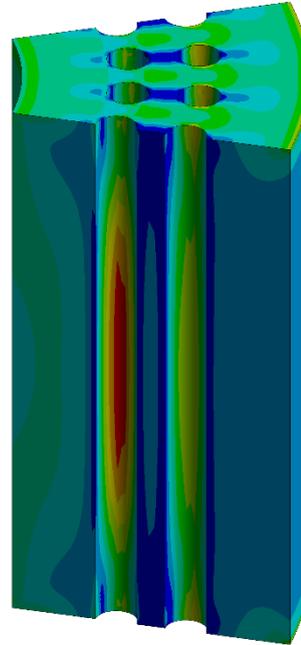
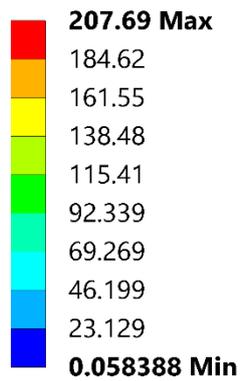
Come fatto precedentemente, i risultati sono stati riportati in **Figura 5.8 e 5.9**; dai valori della tensione equivalente secondo von Mises si può notare come il sistema continui a permanere in campo elastico, in quanto i valori massimi raggiungibili, pari a 209 MPa, risultano molto inferiori rispetto al limite di snervamento del materiale, riportato in **Tabella 5.1**. Pertanto, nelle condizioni imposte, questo sistema possiede un comportamento molto simile a quello che si registra con una configurazione completamente piena, determinando un'eccellente resistenza statica, ma, al contempo, una scarsa capacità di assorbimento energetico.

Ad avvalorare tale tesi, si possono analizzare i valori dello spostamento complessivo che risultano univocamente molto bassi, inferiori al centesimo, denotando l'incapacità di deformarsi propriamente. Ovviamente, i risultati dipendono fortemente dalla geometria di riferimento e quindi è possibile asserire come la variazione rispetto alla forma piena sia troppo contenuta per poter effettivamente apprezzare un netto cambiamento nel comportamento intrinseco del componente.

A differenza dell'architettura con celle cubiche, dove si è potuto apportare modifiche al design di partenza poiché si trattava di un'aggiunta di materiale, nella circostanza in esame questa strada non è

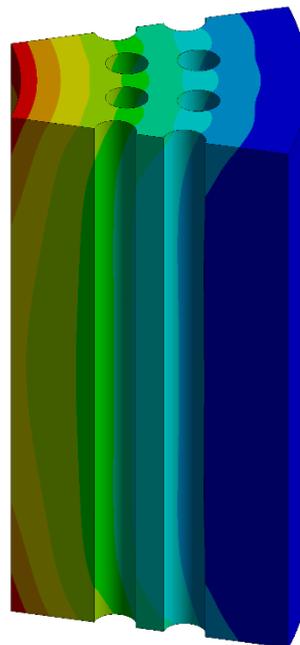
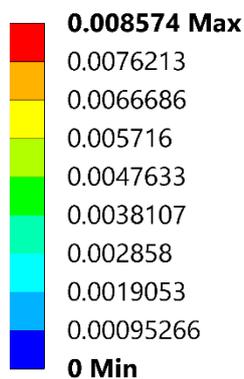
percorribile in quanto un allargamento ulteriore del diametro dei fori porterebbe ad avere nella zona centrale uno spessore di materiale troppo limitato, il quale porterebbe condurre al mancato rispetto dei vincoli geometrici imposti dal processo tecnologico utilizzato, e, conseguentemente, anche ad una certa variabilità dimensionale intrinseca.

Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Time: 1



*Figura 5.8. Distribuzione della tensione equivalente nella configurazione con celle forate.*

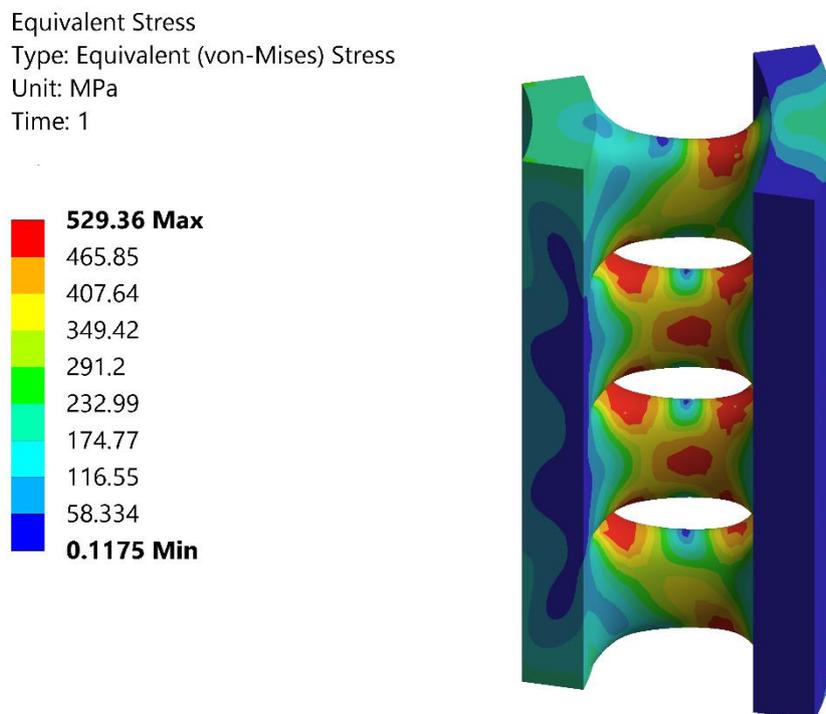
Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 1



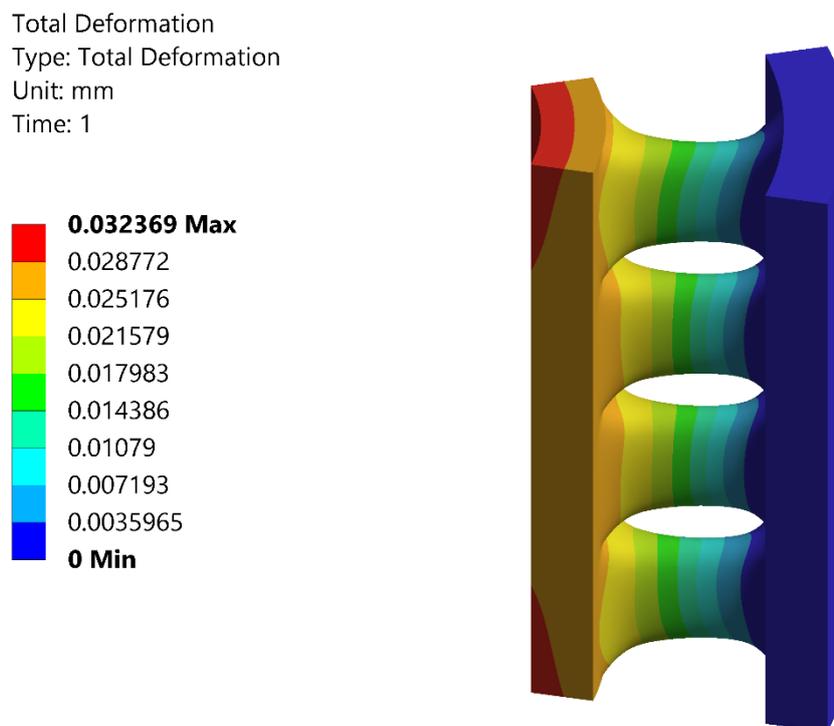
*Figura 5.9. Andamento dello spostamento totale nella configurazione con celle forate.*

### 5.3.3 – Struttura con celle realizzate tramite modellazione generativa

Infine, si esegue lo stesso procedimento anche per l'ultima tipologia di struttura, richiamando l'andamento della tensione equivalente e dello spostamento massimo in **Figura 5.10** e **5.11**.



**Figura 5.10.** Distribuzione della tensione equivalente nella configurazione con celle generative.



**Figura 5.11.** Distribuzione della tensione equivalente nella configurazione con celle generative.

I valori ottenuti per questa famiglia di celle rimarcano, da una parte, il buon comportamento meccanico, e dall'altra una discreta capacità di assorbimento energetico, indicativamente confrontabile con quella ottenuta a valle delle simulazioni di celle cubiche con nodo centrale. Il problema è ben posto poiché i braccetti che collegano il diametro interno con quello esterno, ed in particolar modo i due centrali, presentano una distribuzione di tensione abbastanza uniforme, indice del corretto sfruttamento del materiale; ovviamente, come auspicabile, nelle zone raggiate si concentrano i valori più critici in assoluto, benché tutti al di sotto del limite di rottura. Pertanto, per perseguire output ancora più uniformi, è possibile predisporre delle raggiature più grandi in fase di modellazione. L'assunzione di aver ragionato con un volume limite del 50% si è rivelata corretta per trovare il giusto compromesso tra resistenza ed assorbimento energetico.

Inoltre, a seguito del riadattamento della cella cubica, le architetture con schema generativo acquisiscono il primato per quanto riguarda l'alleggerimento strutturale, aspetto comunque da non trascurare nell'industria lightweight, anche se, per le applicazioni in esame, si parla comunque di masse di pochi grammi.

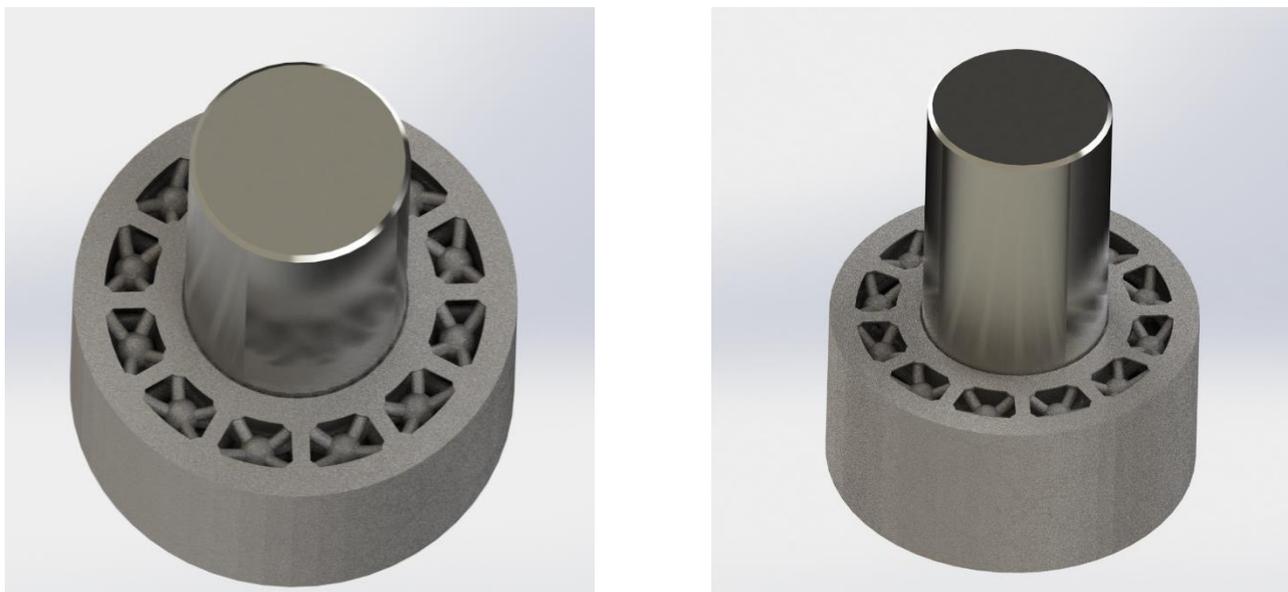
#### ***5.4 – Confronto e scelta del modello***

In estrema sintesi, la struttura forata non consente una riduzione in massa considerevole ed è molto rigida, quindi scarsamente competitiva ai fini dell'assorbimento energetico; al contrario, le varianti con celle cubiche e con modellazione generativa hanno un miglior comportamento sotto questi punti di vista. Alla fine, nonostante siano entrambe delle buone alternative, si prediligono le BCC + CP poiché garantiscono una miglior combinazione complessiva dei parametri richiesti. Infatti, la differenza legata all'alleggerimento è ridotta poiché si parla solamente di 10 g di scarto rispetto al competitor, ma, come già accennato, quelle cubiche riescono a deformarsi di più, incamerando una più alta quantità di energia.

Un'ulteriore qualità che può essere messa in luce è connessa alla riproducibilità del design: qualunque sia il software di modellazione utilizzato, le forme rimangono le medesime, riuscendo con estrema facilità ad eseguire cambiamenti e modifiche strutturali. Al contrario, le geometrie generative vengono definite a partire da un certo algoritmo risolutivo che può essere molto diverso in funzione del software CAD di riferimento.

Ovviamente, questo studio è solo un approccio alla materia, pertanto saranno necessari ulteriori indagini a riguardo, rivolti soprattutto alla ricerca di analogie e differenze nel campo dinamico ad alti regimi di velocità.

Infine, in **Figura 5.12** sono stati riportati i render dell'assembly finale con il collar realizzato da layer intervallati di materiale pieno e celle trabecolari.



**Figura 5.12.** *Render finale dell'assieme.*

## Conclusione

L'elaborato di tesi è stato principalmente rivolto alla “scoperta” e alla conoscenza di nuovi design geometricamente ottimizzati, con particolare attenzione verso i solidi cellulari. Questa nuova tecnologia si sta via via sviluppando ed affermando a livello industriale e, in questo caso, è stata utilizzata per la riprogettazione di un componente reale, ovvero un giunto pin-collar di cui si ricerca l'ottimizzazione geometrica e il miglioramento della capacità di assorbimento energetico, cercando di non limitare troppo la resistenza statica.

In primo luogo, è stata riportata una classificazione di queste strutture in funzione della distribuzione spaziale, a cui è seguito un focus sui diversi approcci con cui possono essere progettate le singole unità ripetenti, ovvero le celle, le quali poi si sviluppano nello spazio attraverso un certo pattern, soffermandosi sulla necessità di garantire la conservazione dell'integrità strutturale, tramite la capacità di adattamento anche nelle zone più esterne.

A seguire, è stato proposto il criterio di Maxwell, attraverso cui, sia per impieghi bidimensionali che tridimensionali, è possibile studiare la stabilità statica e cinematica del sistema; con questo calcolo, si possono caratterizzare facilmente sia le architetture stretching-dominated, che risultano rigide e adatte ad applicazioni strutturali leggere, sia quelle bending-dominated, le quali sono più cedevoli e adatte in caso di richieste di assorbimento energetico.

Negli ultimi anni, il grande sviluppo del settore additive (AM) ha “sbloccato” la possibilità di fabbricare parti tridimensionali dotate di forme assai complesse e di design topologicamente ottimizzati, come i sopramenzionati solidi cellulari, difficilmente replicabili con le tecniche tradizionali, o comunque con un notevole risparmio in termini di tempi e costi effettivi. Infatti, prima dell'avvento dei processi incrementali per layer successivi, le architetture leggere processabili erano tipicamente limitate ai pannelli sandwich a nido d'ape o espansi a celle aperte, mentre adesso, possono essere concepite forme sempre più complesse garantendo anche un'eccellente costanza dello spessore. Tra i tanti metodi di fabbricazione additiva disponibili, oltre al Fused Deposition Modeling (FDM), all'Electron Beam Melting (EBM), al Binder Jetting (BJ), una delle procedure più comuni a cui si può ricorrere è il Laser Powder Bed Fusion (LPBF) per via della sua semplicità, versatilità e compatibilità con i materiali del settore automotive. In ogni caso, è bene ricordare come si possano ottenere dei risultati diversi in termini di fattibilità geometrica e di densità relativa (definita come il rapporto tra la concentrazione della cella “vuota” ( $\rho$ ) e quella del solido “pieno” ( $\rho_s$ ) di cui il profilo è realizzato), in funzione della tecnica additiva selezionata, poiché, contestualmente, vengono definiti specifici vincoli di processo, tra cui si annoverano l'angolo d'inclinazione  $\theta$  ed il range di valori

minimi e massimi riferiti alla lunghezza, al diametro e allo spessore del singolo elemento ( $L_{\min}$  e  $L_{\max}$ ,  $D_{\min}$  e  $D_{\max}$ ,  $t_{\min}$  e  $t_{\max}$ ).

Successivamente, di pari passo allo studio di prove statiche, per avere una visione più ampia del comportamento delle strutture cellulari, è stata compiuta una ricerca approfondita sulla risposta di queste nuovissime architetture leggere in condizioni dinamiche. In estrema sintesi, si è evinto come il comportamento del sistema fosse strettamente correlato alla variazione di tempo, ad effetti addizionali, come quelli inerziali, e alla localizzazione della deformazione, causa principale dello sviluppo di fenomeni di tipo ondulatorio. Tuttavia, nonostante tutte queste differenze rispetto al caso statico, si è potuta constatare una globale correlazione tra gli effetti provocati da test dinamici a bassa velocità e quelli quasi-statici.

In generale, per migliorare globalmente il comportamento dinamico di un solido cellulare si può ricorrere alle cosiddette strutture progressive, ottenibili grazie all'introduzione di un certo gradiente di densità più o meno accentuato, il quale consiste nella modifica locale sia della distribuzione che della dimensione delle singole celle, ritoccando così la densità relativa. Gli effetti benefici legati al posizionamento di una struttura più concentrata e corposa, in prossimità della zona impattata, sono notevoli.

Infine, grazie alle conoscenze acquisite su base teorica, è stato possibile concentrarsi sul caso studio reale di riprogettazione della parte cava di un giunto pin-collar, passando da una geometria completamente piena, ad una che presenta layer intervallati di materiale pieno e di architetture trabecolari, valutandone l'effetto in funzione del tipo di celle scelte, tra cui una cubica con nodo centrale, una forata e una con modellazione generativa. A valle di opportune operazioni di progettazione prima e simulazioni poi, si è potuto evincere come il design cubico garantisse il miglior compromesso possibile tra le proprietà richieste, anche se le unità generative risultano più competitive sul fronte dell'alleggerimento, mentre quelle forate sono molto più rigide e pertanto poco affini allo studio in esame.

## Indice delle figure

<b>Figura 1.1.</b> Classificazione dei solidi cellulari.....	7
<b>Figura 1.2.</b> Esempio di tassellazione di Voronoi, in cui ciascun poligono contiene uno solo dei punti principali e dove ogni altro punto appartenente al poligono è più vicino al punto principale di quel poligono che a tutti gli altri n-1 punti principali.....	8
<b>Figura 1.3.</b> Celle TPMS più diffuse.....	9
<b>Figura 1.4.</b> Celle trabecolari comunemente utilizzate.....	10
<b>Figura 1.5.</b> Esempio del metodo basato sulle primitive.....	11
<b>Figura 1.6.</b> Schema di patterning uniforme o diretto.....	12
<b>Figura 1.7.</b> Confronto tra la distribuzione uniforme (a) in cui l'integrità strutturale delle celle nelle zone più esterne è accidentale e la distribuzione conforme (b), in cui l'integrità strutturale delle celle nelle zone più esterne è preservata.....	12
<b>Figura 1.8.</b> Tipici diagrammi $\sigma$ - $\epsilon$ di architetture (a) stretch-dominated, (b) bending-dominated.....	16
<b>Figura 1.9.</b> Schema di una cella che mette in luce i parametri definiti nella (1.3).....	17
<b>Figura 1.10.</b> Classificazione delle tecnologie additive in base al precursore utilizzato.....	20
<b>Figura 1.11.</b> Schema semplificato LPBF.....	21
<b>Figura 1.12.</b> Fasi successive di un processo Laser Powder Bed Fusion.....	22
<b>Figura 1.13.</b> Possibili difetti presenti all'interno di un prodotto finito.....	24
<b>Figura 2.1.</b> Differenza nella durata tra le prove statiche e quelle dinamiche.....	27
<b>Figura 2.2.</b> Classificazione dei fenomeni al variare dello strain-rate e della durata di applicazione del carico.....	28
<b>Figura 2.3.</b> Classificazione dei test meccanici in funzione dei valori di strain-rate.....	32
<b>Figura 2.4.</b> Schema dell'attrezzatura sperimentale della Hopkinson Bar.....	33
<b>Figura 2.5.</b> Schematizzazione degli impulsi all'interfaccia barre-provino.....	34
<b>Figura 2.6.</b> Schema 1D legato allo sviluppo di un'onda d'urto nelle strutture trabecolari.....	36
<b>Figura 2.7.</b> Esempi di gradienti di densità: (a) variazione repentina, (b) variazione graduale.....	38

<b>Figura 2.8.</b> Fenomeno dello strain-hardening nel diagramma $\sigma$ - $\epsilon$ di una struttura progressiva.....	39
<b>Figura 2.9.</b> Effetto del gradiente di densità sull'energia assorbita classica e specifica di strutture trabecolari in Ti-6Al-4V.....	39
<b>Figura 2.10.</b> Effetto del gradiente di densità sulla tensione specifica di plateau e sulla resistenza specifica al cedimento di strutture trabecolari in Ti-6Al-4V.....	40
<b>Figura 3.1.</b> Sezione di un giunto incollato.....	42
<b>Figura 3.2.</b> Tipologie e distribuzione delle sollecitazioni.....	47
<b>Figura 3.3.</b> Tipologie di cedimento: (a) coesivo, (b) adesivo, (c) rottura del substrato.....	48
<b>Figura 3.4.</b> Classificazione degli adesivi in base alle proprietà meccaniche.....	49
<b>Figura 3.5.</b> Confronto dei diagrammi forza-spostamento di un adesivo anaerobico e di un epossidico a valle di un test dinamico condotto a $v = 3$ m/s.....	54
<b>Figura 4.1.</b> Dimensionamento del giunto pin-collar del caso studio.....	58
<b>Figura 4.2.</b> Struttura piena del collar.....	59
<b>Figura 4.3.</b> Dimensioni e proprietà in massa della singola cella piena.....	60
<b>Figura 4.4.</b> Processo per conferire la preforma alla cella BCC + CP.....	61
<b>Figura 4.5.</b> Individuazione del centro della sferetta laterale nella porzione interna.....	62
<b>Figura 4.6.</b> Realizzazione dei profili trabecolari.....	63
<b>Figura 4.7.</b> Design della cella cubica con nodo al centro ( $24 \leq D \leq 36$ ).....	63
<b>Figura 4.8.</b> 1° design della cella tubolare ( $24 \leq D \leq 36$ ).....	65
<b>Figura 4.9.</b> 2° design della cella tubolare ( $24 \leq D \leq 36$ ).....	66
<b>Figura 4.10.</b> 3° design della cella tubolare ( $24 \leq D \leq 36$ ).....	66
<b>Figura 4.11.</b> Confronto dei parametri in massa tra i vari design di cella tubolare.....	68
<b>Figura 4.12.</b> Calcolo della massa totale del collar in funzione della forma della cella.....	68
<b>Figura 4.13.</b> Individuazione del volume limite entro cui si sviluppa la progettazione generativa.....	69
<b>Figura 4.14.</b> Definizione dei design criteria.....	71
<b>Figura 4.15.</b> Selezione delle impostazioni di studio.....	72

<b>Figura 4.16.</b> Geometria ottenuta a valle del processo di ottimizzazione.....	72
<b>Figura 4.17.</b> Forma finale ricostruita $V_{lim} = 60\%$ .....	73
<b>Figura 4.18.</b> Forma finale ricostruita $V_{lim} = 50\%$ .....	74
<b>Figura 4.19.</b> Confronto dei parametri in massa tra i vari design di cella generative.....	75
<b>Figura 4.20.</b> Calcolo della massa totale del collar in funzione della forma della cella.....	75
<b>Figura 5.1.</b> Individuazione delle fasi di un'analisi basata sul FEM.....	78
<b>Figura 5.2.</b> Geometrie aggiornate utilizzate come input delle simulazioni.....	80
<b>Figura 5.3.</b> Confronto delle curve tensione-deformazione in funzione di diversi processi produttivi.....	81
<b>Figura 5.4.</b> Distribuzione della tensione equivalente della BCC + CP.....	83
<b>Figura 5.5.</b> Nuovo design della cella cubica con nodo al centro.....	84
<b>Figura 5.6.</b> Distribuzione della tensione equivalente nella nuova configurazione della BCC + CP....	85
<b>Figura 5.7.</b> Andamento dello spostamento totale nella nuova configurazione della BCC + CP.....	85
<b>Figura 5.8.</b> Distribuzione della tensione equivalente nella configurazione con celle forate.....	87
<b>Figura 5.9.</b> Andamento dello spostamento totale nella configurazione con celle forate.....	87
<b>Figura 5.10.</b> Distribuzione della tensione equivalente nella configurazione con celle generative.....	88
<b>Figura 5.11.</b> Distribuzione della tensione equivalente nella configurazione con celle generative.....	88
<b>Figura 5.12.</b> Render finale dell'assieme.....	90

## Indice delle tabelle

<b>Tabella 1.1.</b> Calcolo analitico del numero di Maxwell delle celle trabecolari più utilizzate.....	14
<b>Tabella 1.2.</b> Classici parametri di processo impiegati per componenti in AISI-316L.....	23
<b>Tabella 2.1.</b> Proprietà medie acquisite a valle di prove quasi-statiche.....	35
<b>Tabella 3.1.</b> Confronto tra le proprietà delle varie metodologie di giunzione.....	41
<b>Tabella 3.2.</b> Livello d'azione dei meccanismi di adesione.....	44
<b>Tabella 3.3.</b> Confronto tra i detergenti comunemente utilizzati.....	45
<b>Tabella 3.4.</b> Confronto tra le caratteristiche dei principali adesivi strutturali.....	50
<b>Tabella 4.1.</b> Confronto tra le proprietà in massa della struttura piena e di quella cubica.....	64
<b>Tabella 4.2.</b> Confronto tra le proprietà in massa della struttura piena e di quelle tubolari.....	67
<b>Tabella 4.3.</b> Confronto tra le proprietà in massa della struttura piena e di quella generative.....	74
<b>Tabella 5.1.</b> Proprietà del materiale AISI-316L per AM.....	81
<b>Tabella 5.2.</b> Confronto aggiornato tra le proprietà della struttura piena e di quella cubica.....	84

## **Bibliografia**

- [1] D. Bhate, C.A. Penick, L.A. Ferry – **Classification and Selection of Cellular Materials in Mechanical Design: Engineering and Biomimetic Approaches**, Designs, Vol. 3, 2019, p. 1 – 31, doi: 10.3390/designs3010019.
- [2] W. Tao, M.C Leu – **Design of lattice structure for additive manufacturing**, International Symposium on Flexible Automation, 2016, p. 325 – 332.
- [3] F. Tamburrino, S. Graziosi, M. Bordegoni – **The design process of additively manufactured mesoscale lattice structures**, Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol. 18, 2018, doi: 10.1115/1.4040131.
- [4] A. Nowak – **Application of Voronoi diagrams in contemporary architecture and town planning**, Challenges of Modern Technology, Vol. 6, 2015, p. 30 – 34.
- [5] S. Khaleghi, F.N. Dehnavi, M. Baghani, M. Safdari, K. Wang – **On the directional elastic modulus of the TPMS structures and a novel hybridization method to control anisotropy**, Materials & Design, Vol. 210, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110074>.
- [6] T. Maconachie, M. Leary, B. Lazanovski, M. Quian, O. Faruque – **SLM lattice structures: properties, performance, applications and challenges**, Materials & Design, Vol. 183, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108137>.
- [7] O. Alketan, R. A. Al-Rub, R. Rowshan – **Topology mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials**, Additive Manufacturing, Vol. 19, 2018, p. 167 – 183, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.006.
- [8] M.F. Ashby – **The properties of foams and lattices**, Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. 364, 2006, p. 15 – 30, doi: 10.1098/rsta.2005.1678.
- [9] J. Austermann, A. J. Redmann, V. Dahmen, A. L. Quintanilla – **Fiber-Reinforced composite sandwich structures by co-curing with additive manufactured epoxy lattices**, Journal of Composites Science, Vol. 3, 2019, doi: 10.3390/jcs3020053.
- [10] F. Han, Z. Zhu, J. Gao – **Compressive deformation and energy absorbing characteristic of foamed aluminum**, Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 29, 1998, p. 2497 – 2502.
- [11] H. Alsalla, L. Hao, C. Smith – **Fracture toughness and tensile strength of 316L stainless steel cellular lattice structures manufactured using the selective laser melting technique**, Journal of Material Science & Engineering A, Vol. 669, 2016, p. 1 – 6, doi: 10.1016/j.msea.2016.05.075.

- [12] B. Hanks, J. Berthel, M. Frecker – **Mechanical properties of additively manufactured metal lattice structures: Data review and design interface**, Additive Manufacturing, Vol. 35, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101301>.
- [13] I. Maskery, N.T Aboulkhair, A.O Aremu, C.J Tuck – **Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices**, Additive Manufacturing, Vol. 16, 2017, p. 24 – 29, <http://dx.doi.org/10.1016/j.addma.2017.04.003>.
- [14] X. Liu, T. Wada, A. Suzuki, N. Takata, M. Kobashi, M. Kato – **Understanding and suppressing shear band formation in strut-based lattice structures manufactured by laser powder bed fusion**, Materials and Design, Volume 199, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109416>.
- [15] D. Bhate – **Four Questions in Cellular Material Design**, Materials, Vol. 12, 2019, doi:10.3390/ma12071060.
- [16] A.B. Arshad, A. Nazir – **The effect of fillets and crossbars on mechanical properties of lattice structures fabricated using additive manufacturing**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 111, 2020, p. 931 – 943, doi:10.1007/s00170-020-06034-x.
- [17] C. Koch, J. Richter, M. Vollmer, T. Niendorf – **Adhesively bonded joints in components manufactured via selective laser melting**, Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, p. 1–9, doi:10.1177/0954406220959376.
- [18] A.O. Aremu, I.A. Maskery, C.J. Tuck, I.A. Ashcroft, R.D Wildman, R.J.M. Hauge – **Effects of Net and Solid Skins on Self-Supporting Lattice Structures**, Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series, Vol. 2, 2016, doi:10.1007/978-3-319-22443-5\_10.
- [19] Z. F – Stewart, T. Coope, D. Bacheva, B.C. Kim – **Effect of the surface morphology of SLM printed aluminum on the interfacial fracture toughness of metal-composite hybrid joints**, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 105, 2021, doi:10.1016/j.ijadhadh.2020.102779.
- [20] S. Greco, K. Gutzeit, H. Hotz, B. Kirsch, J.C. Aurich – **Selective laser melting (SLM) of AISI 316L - Impact of laser power, layer thickness, and hatch spacing on roughness, density, and microhardness at constant input energy density**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 108, 2020, p. 1551 – 1162, doi:10.1007/s00170-020-05510-8.
- [21] L. Ceschini, E. Liverani, S. Toschi, A. Fortunato – **Effect of Selective Laser Melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 249, 2017, p. 255 – 263 <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.042>.

- [22] P. Leček, J. Čapek, M. Roudnická, O. Molnárová, J. Maňák, J. Duchoň, D. Dvorský, M. Koller – **Selective laser melting of iron: Multiscale characterization of mechanical properties**, Materials Science & Engineering A, Volume 800, 2021, doi: 10.1016/j.msea.2020.140316.
- [23] G. Dong, Y. Tang, Y.F. Zhao – **A Survey of Modelling of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing**, Journal of Mechanical Design, Vol.139, 2017, doi:10.1115/1.4037305.
- [24] B. Gorny, T. Niendorf, J. Lackmann, M. Thoene – **In situ characterization of the deformation and failure behavior of non-stochastic porous structures processed by selective laser melting**, Materials Science and Engineering, Vol. 528, 2011, p. 7962 – 7967, doi: 10.1016/j.msea.2011.07.026.
- [25] M.A. Meyers– **Dynamic behavior of materials**, John Wiley & Sons, Inc., First Edition, 1994, p. 1 – 681, ISBN:0-471-58262-X.
- [26] J.A. Zukas – **Impact dynamics: theory and experiment**, Technical Report ARBRL-TR-02271, US Army Armament Research and Development Command, 1980, p. 1 – 66.
- [27] A. Jonas, A. Zukas – **Dynamic behavior of materials and structures**, Studies in Applied Mechanics, Vol. 49: Introduction of Hydrocodes, 2004, p. 1 – 31, [https://doi.org/10.1016/S0922-5382\(04\)80002-3](https://doi.org/10.1016/S0922-5382(04)80002-3).
- [28] F.P. Yuan, V. Prakash, T. Tullis – **Origin of pulverized rocks during earthquake fault rupture**, Journal of Geophysical Research Atmospheres, Vol. 116, 2011, p. 1 – 19, doi: 10.1029/2010JB007721.
- [29] Z. Ozdemir, E.H Nava, A. Tyas, J.A. Warren, S.D. Fay, R. Goodall, H. Askes – **Energy absorption in lattice structures in dynamics: Experiments**, International Journal of Impact Engineering, Vol. 89, 2016, p. 1 – 40, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.10.007>.
- [30] R. Saremian, M. Badrossamay, E. Foroozmehr, M. Kadkhodaei, F. Forooghi – **Experimental and numerical investigation on lattice structures fabricated by selective laser melting process under quasi-static and dynamic loadings**, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 112, 2021, p. 2815 – 2836, doi:10.1007/s00170-020-06112-0.
- [31] X. Lijun, S. Weidong – **Additively manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: experiments**, International Journal of Impact Engineering, Vol. 111, 2018, p. 255 – 272, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2017.09.018.

- [32] J.A. Hawreliak, J. Lind, B. Maddox, M. Messner, N. Barton, B.J. Jensen, M. Kumar – **Dynamic Behavior of Engineered Lattice Materials**, Scientific Reports, Vol. 6, 2016, doi:10.1038/srep28094.
- [33] H.B Zeng, S. Pattofatto, H. Zhao, Y. Girard, V. Fascio – **Impact behavior of hollow sphere agglomerates with density gradient**, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 52, 2010, p. 680 – 688, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2009.11.012.
- [34] J.S. Weeks – **Mechanical response of lattice structures under high strain-rate and shock loading**, California Institute of Technology, 2022, p. 1 – 128, doi:10.7907/9v5k-1157.
- [35] M. De Agostinis – **Appunti del corso di Chassis and Body Design**, Anno accademico 2022 / 2023.
- [36] S. Ebnessajjad – **Introduction and adhesion theories**, Handbook of Adhesives and Surface Preparation, 2011, doi: 10.1016/B978-1-4377-4461-3.10001-X.
- [37] L.P. Demejo, D.S. Rimai, R.C. Bowen – **Mechanics of particle adhesion**, Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 8, 1994, p. 1333 – 1355, doi: 10.1163/156856194X00645.
- [38] Henkel Corporation – **How to increase reliability and prevent threaded assembly failure**, 2020, <https://dm.henkel-dam.com/is/content/henkel/LOCTITE-Threadlocker-Manual>.
- [39] A.N Gent – **Fracture mechanics of adhesive bonds**, Rubber Chemistry and Technology, Vol. 47, 1974, p. 202 – 212, <https://doi.org/10.5254/1.3540427>.
- [40] J.F. Lancaster – **The use of adhesives for making structural joints**, Chapt. 3 in Metallurgy of Welding (6<sup>th</sup> Edition), 1999, p. 54 – 84, <https://doi.org/10.1533/9781845694869.54>.
- [41] D. Croccolo, M. De Agostinis, N. Vincenzi – **Design and optimization of shaft–hub hybrid joints for lightweight structures: Analytical definition of normalizing parameters**, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 56, 2012, p. 77 – 85, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.01.007.
- [42] D. Croccolo, M. De Agostinis, P. Mauri– **Influence of the assembly process on the shear strength of shaft–hub hybrid joints**, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 44, 2013, p. 174 – 179, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.02.018>.
- [43] D. Croccolo, M. De Agostinis, P. Mauri, G. Olmi – **Influence of the engagement ratio on the joint strength of press fitted and adhesively bonded specimens**, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 53, 2014, p. 80 – 88, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.01.017>.

- [44] D. Croccolo, M. De Agostinis, S. Fini, G. Olmi – **Influence of the engagement ratio on the shear strength of an epoxy adhesive by push-out tests on pin-and-collar joints: Part I: Campaign at room temperature**, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 67, 2016, p. 69 – 75, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.12.028>.
- [45] D. Croccolo, M. De Agostinis, S. Fini, G. Olmi – **Influence of the engagement ratio on the shear strength of an epoxy adhesive by push-out tests on pin-and-collar joints: Part II: Campaign at different temperature levels**, International Journal of Adhesion & Adhesives, Vol. 67, 2016, p. 76 – 85, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.12.029>.
- [46] J.J.M. Machado, E.A.S. Marques, L.F.M da Silva – **Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An Overview**, The Journal of Adhesion, Vol. 94, 2018, p. 421 – 452, doi: 10.1080/00218464.2017.1282349
- [47] J.A. Harris, R.D. Adams – **An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures**, Journal of Mechanical Engineering Science, Vol. 199, 1985, p. 121 – 131, [https://doi.org/10.1243/PIME\\_PROC\\_1985\\_199\\_102\\_02](https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1985_199_102_02).
- [48] T.M. Brugo, D. Croccolo, M. De Agostinis, S. Fini, G. Olmi, A. Zucchelli – **On the impact strength of adhesive bonded pin-and-collar joints**, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol. 122, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103334>.
- [49] Erpro Group – **Material data-sheet stainless steel 316L**, Innovation & Additive Technology, [https://erpro-group.com/wp-content/uploads/2019/04/Fe\\_316L.pdf](https://erpro-group.com/wp-content/uploads/2019/04/Fe_316L.pdf).
- [50] Renishaw – **SS316L-0407 powder for additive manufacturing**, Apply Innovation [https://hypermetal.eu/wp-content/uploads/2019/02/H-5800-3001-01-A\\_SS\\_316L](https://hypermetal.eu/wp-content/uploads/2019/02/H-5800-3001-01-A_SS_316L).
- [51] A. Leicht – **Laser powder bed fusion of 316L stainless steel microstructure and mechanical properties as a function of process parameters, design, and productivity**, Department of Industrial and Materials Science, Chalmers University of Technology, 2020, p 1 – 64.
- [52] Henkel Adhesives – **Technical Data Sheet Loctite® EA 9466™**, [https://www.henkel-adhesives.com/it/it/prodotto/structural-adhesives/loctite\\_ea\\_94660.html](https://www.henkel-adhesives.com/it/it/prodotto/structural-adhesives/loctite_ea_94660.html).
- [53] L. Donati – **Appunti del corso di Processi e Metodi di Fabbricazione**, Anno accademico 2022 / 2023.