

ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITA' DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA

In TECNOLOGIA MECCANICA B

Analisi dello stato tensionale a flessione di strutture
reticolari stampate con tecnologia SLM
(Selective Laser Melting) tramite test meccanici e
correlazione di immagini.

CANDIDATO
Alberto Nicolini

RELATORE
Alessandro Fortunato

CORRELATORI
Erica Liverani
Paolo Proli

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Abstract	1
Introduzione	2
1. I processi additivi	4
1.1 Introduzione.....	4
1.2 Il processo SLM (Selective Laser Manufacturing).....	6
2. La lega CrCoMo	14
2.1 caratteristiche principali.....	14
3. Il settaggio in preparazione ai test sperimentali	15
3.1 La pressa: principali componenti e settaggio per la prova a flessione	15
3.2 La geometria dei provini e le lavorazioni di post produzione attuate.....	18
4. Analisi dello stato tensionale a flessione: dal test con pressa al metodo DIC (Digital Image Correlation)	20
4.1 La correlazione d'immagini mediante il programma Ncorr.....	20
4.2 Risultati sperimentali.....	23
4.2.1 Displacements and Strains: rappresentazioni grafiche degli spostamenti e delle deformazioni, a differente carico.....	23
5. Calcoli analitici	36
5.1 Calcoli analitici di tensione e deformazione nella sezione del provino; confronto con i risultati della DIC.....	36
6. Conclusioni e sviluppi futuri	43
7. Ringraziamenti	46
8. Bibliografia	47

Abstract

L'attività sperimentale svolta che verrà presentata in questo elaborato finale è focalizzata sull'analisi del comportamento a flessione di provini realizzati con tecnologia SLM (Selective Laser Melting), al fine di realizzarne una completa caratterizzazione in campo elastico.

L'obiettivo è quindi quello di fornire informazioni specifiche sulle proprietà meccaniche di tali strutture reticolari (anche denominate "lattice") in CrCoMo, in modo tale che esse possano poi essere implementate nell'analisi FEM (Finite Element Method) di veri e propri oggetti realizzati con tale tecnologia. Ad esempio nel caso in esame, per la realizzazione di protesi che garantiscano ottimi livelli di resistenza meccanica, resistenza all'usura e che al contempo, grazie alla geometria e alla porosità controllata che contraddistingue tali strutture, permettano l'osteointegrazione della componente protesica post impianto.

Il lavoro di analisi tensionale delle strutture lattice è stato possibile grazie all'impiego di una pressa meccanica appositamente costruita ed utilizzando un sistema di misurazione ottico costituito da una telecamera.

Le immagini dei provini, ottenute a valori dei carichi flessionali crescenti, hanno così permesso la caratterizzazione del provino mediante DIC (Digital Image Correlation).

I test sperimentali svolti e i risultati ottenuti hanno consentito una completa caratterizzazione a flessione delle diverse strutture lattice in CrCoMo studiate; quindi si è compiuto un passo avanti verso la possibilità di attuare, in futuro, analisi FEM su componenti realizzati con queste particolari strutture.

Introduzione

Alla fine degli anni '80 il vasto campo della Tecnologia Meccanica si è arricchito di una nuova classe di tecnologie, chiamate Additive Manufacturing, che si basano sul principio per cui un componente, di geometria anche molto complessa, possa essere fabbricato per deposizione successiva di strati di materiale, ciascuno di forma tale da comporre, alla fine, il componente desiderato.

Tale tecnologia inizialmente veniva utilizzata quasi esclusivamente con materiali polimerici al fine di realizzare modelli di supporto alla progettazione, nell'ultimo decennio invece, grazie allo sviluppo tecnologico, ed allo spirito visionario di alcune aziende ed enti di ricerca, l'additive manufacturing sta acquistando sempre più consensi anche a livello industriale.

Grazie al suo particolare processo di produzione "per strati", l'additive può essere impiegato per la realizzazione di geometrie estremamente complesse come quelle che caratterizzano i provini analizzati.

Considerare, ad oggi, le tecnologie additive come sostitutive rispetto a quelle convenzionali sarebbe un errore, ma i settori in cui il loro utilizzo risulta vantaggioso sono ormai molteplici ed uno di questi è il settore bio-medicale.

Una delle grandi esigenze derivante dal settore bio-medicale è quella di realizzare protesi leggere che possano garantire un saldo ancoraggio alla parte ossea del paziente e al contempo impedire che con il passare del tempo, a causa di piccoli urti e vibrazioni, si verifichi da parte della struttura protesica un'azione di usura nei confronti dell'osso che provochi la nascita di giochi nella giunzione e quindi la perdita di un corretto ancoraggio della protesi alla struttura ossea.

Per fare fronte a tali esigenze sono state realizzate grazie alla tecnologia SLM, particolari strutture reticolari aventi peso ridotto e che consentono l'osteointegrazione, la quale permette di migliorare la giunzione protesi-osso.

Tuttavia queste complesse strutture reticolari necessitano di un'accurata caratterizzazione per far sì che possano essere determinate le effettive proprietà meccaniche.

In questo contesto si inserisce il lavoro svolto per questo elaborato finale, che si propone di determinare la resistenza flessionale delle strutture sopra citate, mediante l'uso di una pressa dotata di telecamera, così da consentire l'analisi attraverso correlazione d'immagini.

A supporto dell'attività sperimentale svolta, i primi 2 capitoli hanno lo scopo di spiegare le generalità del processo produttivo Selective Laser Melting, e della lega CrCoMo (Cromo-Cobalto-Molibdeno).

A seguito di questa sezione teorica si è proceduto con la descrizione del processo di analisi DIC, dei metodi e dei materiali impiegati nei test sperimentali. A conclusione del lavoro, il capitolo 5 si occupa di trarre le conclusioni in funzione dei risultati ottenuti e di evidenziare eventuali sviluppi futuri delle strutture lattice.

1. I processi additivi

1.1 Introduzione

Con il termine processi additivi si identificano tutta una serie di tecniche e tecnologie di fabbricazione in cui il prodotto finito è formato senza la necessità di fonderne il materiale in stampi né di rimuoverlo da una forma grezza, bensì attraverso la realizzazione successiva di strati che andranno a comporre l'oggetto finito.

L'idea di produrre un manufatto mediante l'aggiunta di materiale è diametralmente opposta rispetto a quella delle tecnologie più tradizionali come ad esempio i processi per fusione, per deformazione plastica e le lavorazioni per asportazione di truciolo alle macchine utensili: queste ultime infatti utilizzano un approccio che consiste nella rimozione di gran parte del materiale di partenza per arrivare al prodotto finito.

Questo comporta che per la realizzazione di un pezzo è richiesta una grande quantità di materiale, spesso molto maggiore della quantità di cui è costituito il pezzo stesso e ciò, in aggiunta ai grandi dispendi di energia, provoca un incremento dei costi di produzione che con l'additive manufacturing può essere evitato.

L'additive Manufacturing, anche volgarmente chiamata stampa 3D, è ad oggi la tecnologia produttiva più dirompente, tanto da essere riconosciuta come uno dei punti chiave dell'ormai famosa quarta rivoluzione industriale (Industry 4.0). Il processo di produzione additiva ha come input la realizzazione, attraverso progettazione CAD, del modello 3D dell'oggetto, a cui segue un processo semi-automatico, svolto dal software di programmazione, di conversione del file in formato STL, che prevede la scomposizione dell'oggetto in strati (layer) stampabili dalle macchine per additive.

Infine, a valle del processo di stampa, sono spesso necessarie attività di post-produzione e finitura, per ottenere adeguati livelli di finitura e proprietà meccaniche del manufatto realizzato, ad esempio, soprattutto quando si parla di oggetti realizzati in materiali metallici, è necessario prevedere nel progetto CAD dei supporti che sostengano il peso delle parti a sbalzo, tali supporti una volta realizzato il pezzo andranno rimossi per rivelare l'effettiva geometria dell'oggetto realizzato.

Sebbene tale tecnologia sia “sotto i riflettori” apparentemente solo da qualche anno, il primo brevetto risale addirittura agli anni '80; ad inventarla fu Chuck Hull, tutt'oggi presidente di 3D Systems (una delle aziende leader di mercato nella produzione di stampanti in ambito industriale), che lanciò sul mercato il primo modello di stampante SLA (Stereolitografia), che tramite impressione da parte di un raggio UV permette la solidificazione di resine o fotopolimeri che andranno a comporre il prodotto desiderato.

I processi additivi originariamente venivano impiegati per la realizzazione di piccoli modelli tridimensionali, in materiale polimerico, di supporto al progettista nel caso in cui i disegni CAD fossero di difficile interpretazione; ora grazie allo sviluppo tecnologico vengono impiegati in numerose aziende, in particolare in quelle di settore meccanico aerospaziale e bio-medicale.



Fig. 1: Alcuni esempi di prodotti realizzati in Additive Manufacturing

1.2 Il processo SLM (Selective Laser Melting)

Le tecnologie additive attualmente disponibili sono molteplici e differenti tra loro; per quanto riguarda i materiali metallici, una prima distinzione viene fatta in funzione del materiale di partenza utilizzato, che può essere introdotto nella stampante sotto forma di:

- polvere (Powder Additive Manufacturing)
- filo (Wire Additive Manufacturing)
- lamine metalliche

Il processo additivo, Selective Laser Melting, che è stato impiegato per la realizzazione dei provini studiati, appartiene alla categoria dei processi additivi a letto di polvere (Powder Additive Manufacturing); è stata scelta la tecnologia SLM in quanto il potente laser (i cui dati sono riportati in Tabella 1) permette di realizzare componenti che rispettino più fedelmente le geometrie in input ed inoltre garantisce una densità del prodotto superiore al 99%, quindi con minime porosità all'interno del materiale, al contrario di ciò che accade con altri processi additivi come il Selective Laser Sintering (o SLS) dove si ha fusione parziale degli elementi che costituiscono il "letto" di polvere; questo è possibile grazie alle elevate temperature imposte dal laser le quali consentono la completa fusione di tutti gli elementi che compongono la lega. Tuttavia questa tecnologia additiva, se confrontata con le altre, presenta tempi di produzione maggiori, quindi è un processo più affine alla produzione di piccoli lotti, al limite unitari, per i quali si vogliono limitare le lavorazioni post fabbricazione.

Descrizione del processo:

Prima di entrare nei dettagli del processo è corretto puntualizzare che tutte le descrizioni, dal sistema di adduzione polveri, alla movimentazione, ecc...faranno riferimento alle scelte progettuali fatte da SISMA S.p.a. per la macchina MYSINT100 in commercio (Fig.2), le cui specifiche sono riportate in Tabella 1. Dove possibile i concetti verranno generalizzati o estesi ad altre varianti commerciali, per garantire che la descrizione del processo non sia strettamente legata ad una sola macchina.

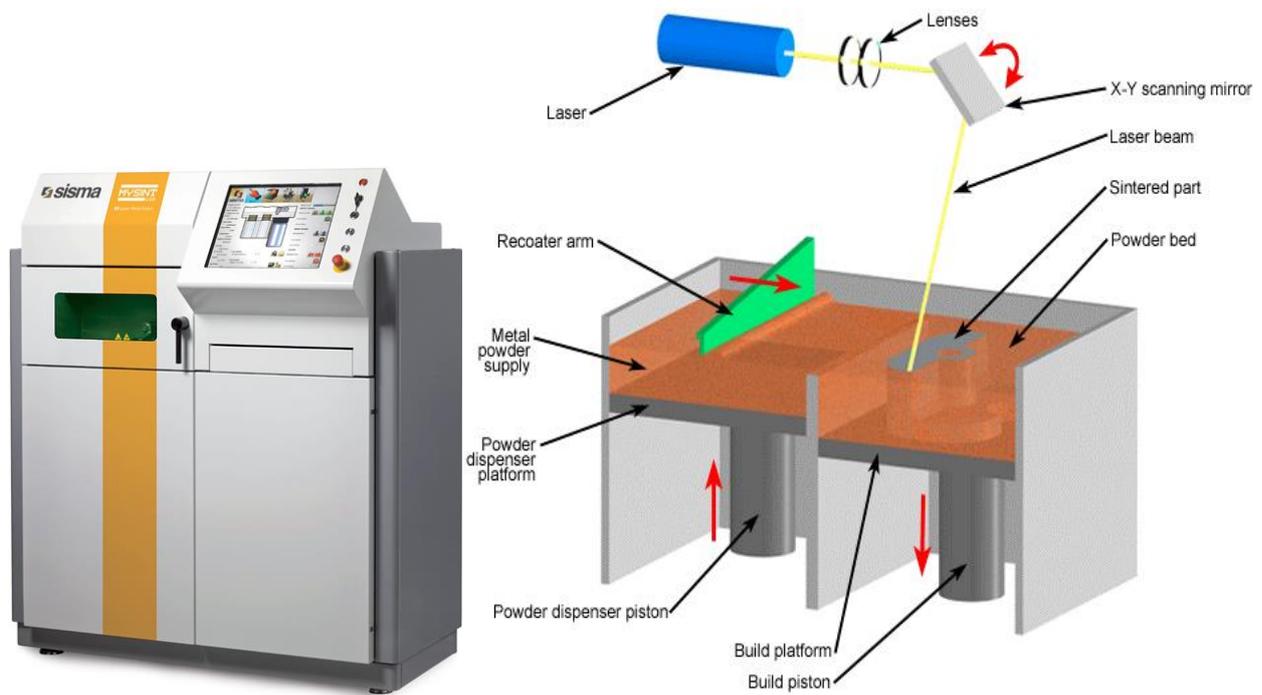


Fig. 2: Fotografia e modellazione della macchina per Selective Laser Melting MYSINT100, progettata e costruita da Sisma S.p.a.

Building volume - Volume di lavoro	Ø 100 mm x 100 mm
Laser source - Sorgente laser	Laser in fibra, $\lambda=1030$ nm
Precision optics - Ottiche di precisione	Quartz F-Theta Lens
Laser spot diameter - Diametro spot laser	50 μ m
Typical layer thickness - Spessore tipico layer	20 μ m - 30 μ m (adjustable/regolabile)
Power supply - Alimentazione elettrica	230 V 1ph - 50/60 Hz – 1 Ph
Max power absorbed - Potenza massima assorbita	1,53 kW
Inert gas - Gas inerti	Nitrogen, Argon - Azoto, Argon
Inert gas supply - Rifornimento gas inerte	6 mm / 2.5 ÷ 5bar @ 35 L/min
Inert gas consumption - Consumo gas inerte	<0,3 L/min @ 0,5% O ₂
O ₂ concentration - Concentrazione O ₂	<0,1%
Machine dimensions - Dimensioni macchina	1390 mm x 777 mm x 1600 mm (LxWxH)
Net weight - Peso netto	650 kg

Tabella 1: Specifiche tecniche della macchina per SLM venduta da SISMA: MYSINT100.

In Figura 3 è riportato uno schema di massima della MYSINT100: ci sono tre camere principali, due delle quali movimentate lungo l'asse z da due pistoni collegati al motore tramite una cinghia di trasmissione. La terza camera è costituita da un contenitore cilindrico che serve solo per l'accumulo della polvere in eccesso. Nella prima camera, chiamata camera di alimentazione, viene depositata la materia prima, ovvero la polvere nuova o riciclata. La quantità di polvere minima da mettere in camera a inizio lavoro viene calcolata in base all'altezza (lungo Z) del componente e dei supporti, e di un fattore moltiplicativo maggiore di zero (oversupply), che tiene conto delle riduzioni di volume dovute alla fusione della polvere e dell'eventuale ablazione del materiale in superficie. La seconda camera è quella su cui viene costruito il componente ed è coassiale al fascio laser. Attualmente i principali sistemi SLM presenti nel mercato sono equipaggiati con sorgenti laser in fibra, che emettono la radiazione laser nel vicino infrarosso (1064 nm) in modo continuo e con potenze che variano tra i 100W e i 400W per i sistemi di piccole-medie dimensioni. Per sistemi di grandi dimensioni le aziende costruttrici stanno quasi tutte prevedendo sistemi multi-laser che lavorano in contemporanea e con potenze fino ad 1 kW.

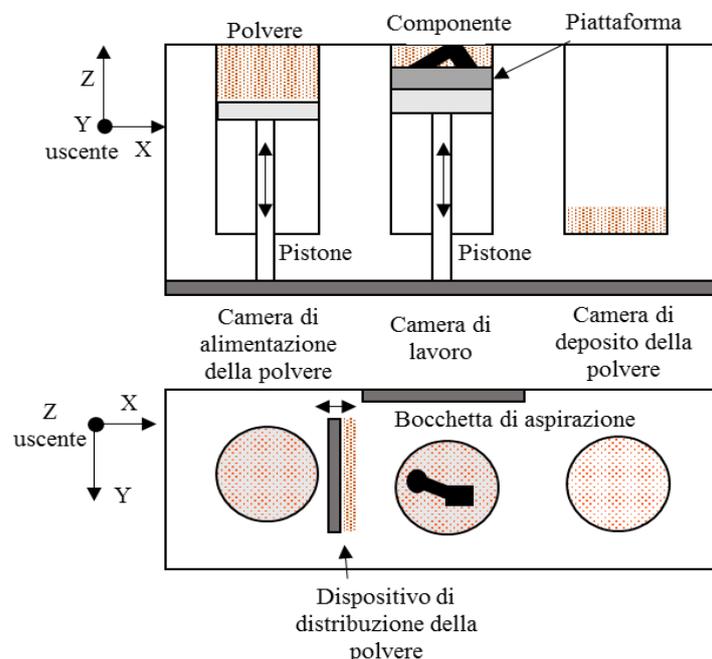


Figura 3: Schema di funzionamento della macchina MYSINT100.

Il fascio laser viene movimentato tramite specchi galvanometrici (Figura 4) e poi passa attraverso una lente f-theta che lo indirizza correttamente sulla piattaforma di lavoro.

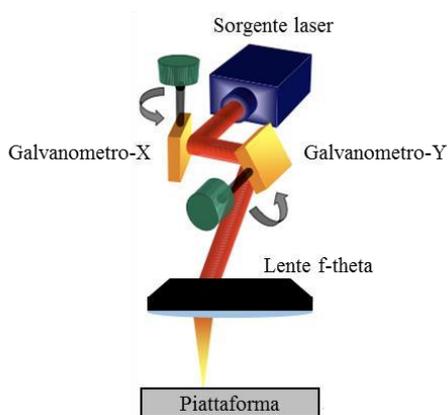


Figura 4: Sistema di specchi galvanometrici e lente f-theta per il trasporto del fascio.

In assenza della lente f-theta, il fascio riflesso dagli specchi galvanometrici verrebbe indirizzato su una lente convessa e focalizzato su una superficie cilindrica, con centro di curvatura coincidente con l'asse di rotazione dello specchio. In questa configurazione (Figura 5a), però, se gli specchi galvanometrici ruotano con velocità angolare costante, lo spot si muove con una velocità maggiore nel bordo della piattaforma rispetto al centro. Questo effetto causa anche una variazione nella distribuzione di energia al variare dell'angolo di scansione.

Utilizzando lenti piane (Figura 5b) la focalizzazione non avviene più su una circonferenza, ma su un piano, però la relazione tra lo spostamento angolare del fascio e la posizione dello spot rimane non lineare e non viene comunque garantita l'uniformità della densità di potenza.

Le lenti f-theta (Figura 5c) hanno l'obiettivo di eliminare questi errori permettendo una relazione lineare fra lo spostamento angolare del fascio (Θ) e la posizione dello spot sul piano focale.

Nonostante questo accorgimento lo spot focalizzato non mantiene la circolarità in tutta la piattaforma, ma tende ad assumere una forma ellittica lungo i bordi. La risoluzione definitiva ai problemi di aberrazione del fascio viene risolta con l'utilizzo delle lenti f-theta telecentriche (Figura 5d) che garantiscono la perpendicolarità dell'asse ottico, rispetto al piano di lavoro, in tutta l'area di pertinenza.

Gli svantaggi nell'utilizzo di questo tipo di lenti sono legati al diametro utile dell'obiettivo, che deve essere sempre maggiore o uguale del diametro dell'area da scandire, e i costi molto elevati (migliaia di euro per una sola lente), quindi nei sistemi attuali non sono quasi mai utilizzate.

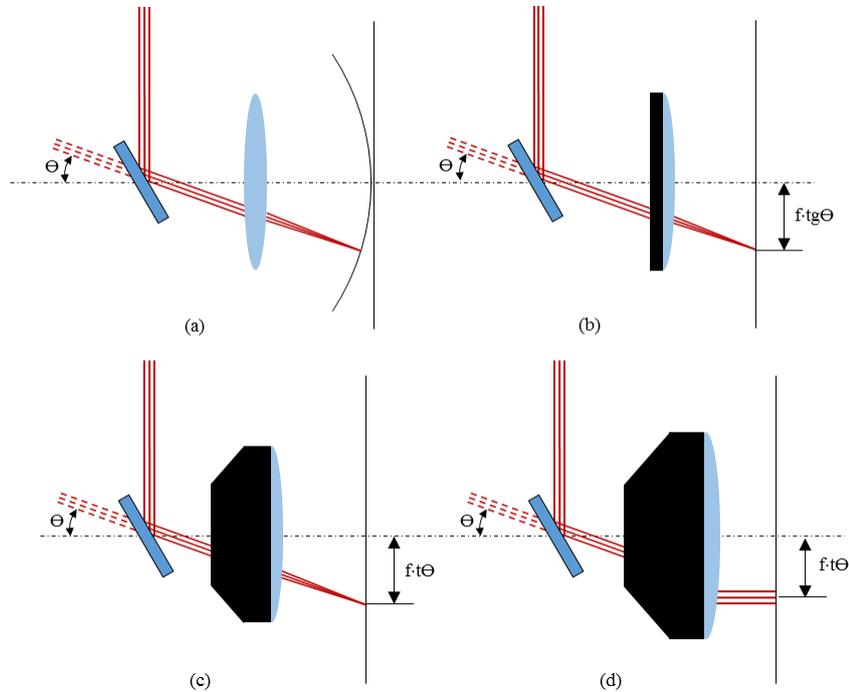


Figura 5: Lente di focalizzazione (a) sferica, (b) piana, (c) f -theta e (d) f -theta telecentrica.

Ritornando allo schema di Figura 3, la polvere viene trasportata dalla camera di alimentazione alla camera di lavoro tramite una lama in materiale polimerico chiamata Recoater (elemento in verde Fig.2). Tale dispositivo si muove su una guida lineare, sfiorando il piano di lavoro, in direzione X; durante la corsa di ritorno alla camera di accumulo, la spazzola ruota di qualche grado attorno all'asse Y per evitare il contatto con la polvere e con lo strato di materiale che si sta solidificando e che si trova ancora ad altissima temperatura. La lavorazione avviene in atmosfera controllata e nelle situazioni più comuni si lavora in presenza di Argon o Azoto con una percentuale di ossigeno residuo tra lo 0,1-0,5%. Davanti alla camera di lavoro è presente una bocca di aspirazione per la rimozione di eventuali ossidi che si formano durante il processo, quindi il flusso di gas si muove in direzione -Y all'interno della bocca di aspirazione e prosegue lungo una tubazione che porta al sistema di filtraggio delle polveri.

La percentuale di ossigeno residuo viene monitorata tramite due sensori, il primo misura la percentuale di ossigeno direttamente in camera, mentre il secondo si trova lungo il condotto di

aspirazione a monte del sistema di filtraggio.

Per entrare più nei dettagli del processo, lo schema di Figura 6 mostra l'istantanea delle quattro fasi principali della produzione di un componente SLM. All'inizio della stampa la camera di alimentazione dovrà contenere un volume di polvere sufficiente al completamento del componente, la camera di lavoro avrà la piattaforma con la superficie allo stesso piano della base e la camera di raccolta sarà completamente vuota (Figura 6a). Non appena la percentuale di ossigeno raggiunge i valori indicati in fase di programmazione della macchina, il pistone della prima camera si alza (direzione Z) di una quantità pari allo spessore dello strato desiderato (moltiplicato per un fattore costante scelto dall'operatore), lasciando quindi un certo volume di polvere disponibile al di sopra del livello della base che il Recouter provvederà a distribuire. Allo stesso tempo il pistone della camera di lavoro si abbasserà (direzione -Z) di una quantità pari allo spessore del singolo layer moltiplicato per l'ovesupply, lasciando libero il volume necessario ad accogliere la polvere in arrivo con il Recouter. La lama polimerica del sistema di distribuzione proseguirà il percorso fino alla camera di raccolta della polvere in eccesso, ruoterà di qualche grado e poi tornerà alla posizione di partenza (Figura 6b).

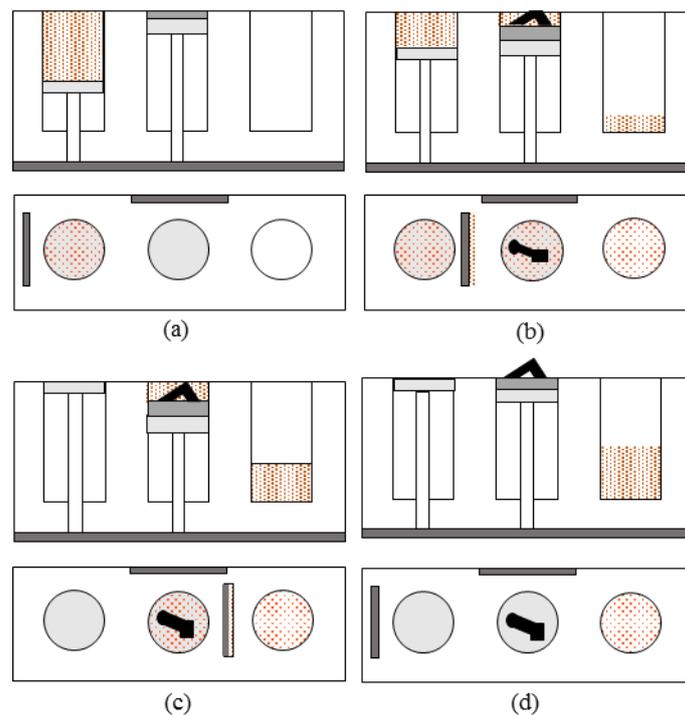


Figura 6: Fasi di lavoro durante la costruzione di un componente per SLM.

11 Questa operazione si ripeterà un numero di volte pari al numero di strati in cui è stato suddiviso il componente ovvero fino a quando la polvere della camera di alimentazione non sarà finita, il campione sarà stato interamente costruito nella camera di lavoro e tutta la polvere in eccesso sarà contenuta nella camera di deposito polvere (Figura 6c).

Alla fine del processo il pistone della camera di lavoro viene alzato manualmente, liberando dalla polvere il componente desiderato (Figura 6d).

Inoltre è da evidenziare il fatto che trattandosi di polveri metalliche estremamente fini e quindi potenzialmente dannose se inalate, è estremamente importante che i pezzi realizzati e la camera di stampa della macchina vengano puliti con aspiratore a bagno d'olio e DPI (dispositivi di protezione individuale) adeguati.

In particolare con l'aspiratore si rimuovono gli ossidi (riconoscibili grazie al loro colore grigio scuro) i quali per evitare che volatilizzino finiranno in un bagno d'olio a valle del condotto d'aspirazione, ed esso dovrà essere smaltito come rifiuto speciale.

Sui pezzi invece viene fatta una prima pulitura all'interno della macchina, in modo tale da poter recuperare la polvere metallica che verrà utilizzata in una stampa successiva; dopodiché gli oggetti realizzati vengono estratti dalla macchina ed immersi in una pulitrice ad ultrasuoni per far sì che vengano rimossi anche i granelli di polvere intrappolati all'interno della fitta struttura reticolare (lattice).

Per far sì che possano essere realizzate geometrie con parti a sbalzo, siccome la polvere metallica non è in grado di svolgere funzione portante, è necessario prevedere dei supporti.

Questi ultimi possono essere costituiti dallo stesso materiale del componente oppure da una resina diversa, nel nostro caso ciò non è stato possibile sia per il fatto che la stampante non era predisposta all'impiego di due diversi materiali d'apporto sia per il fatto che i provini da realizzare sono in materiale metallico e quindi alto fondente.

I sistemi più economici, tra i quali MYSINT100, prevedono un solo estrusore e di conseguenza supporti e componenti saranno dello stesso materiale.

In questi casi è necessaria una progettazione più accurata dei supporti che dovranno essere separati dal componente alla fine del processo; è possibile in questo caso agire sulla distanza tra i layer successivi in modo da minimizzare l'adesione tra supporti e componente e facilitarne il successivo distacco.

Se la macchina prevede la presenza di due ugelli separati, invece, il materiale dei supporti potrà essere diverso da quello del componente (Figura 7): in questo caso è possibile giocare con le

proprietà del polimero scelto per i supporti; ad esempio è molto comune utilizzare polimeri che possono essere rimossi tramite opportuni solventi.

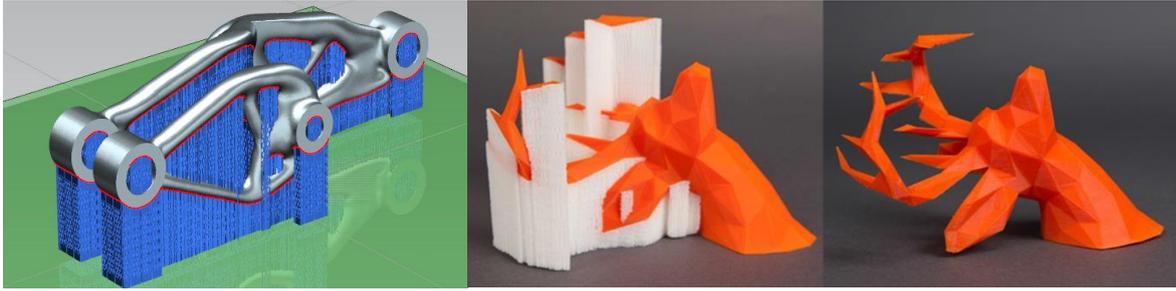


Figura 7: Esempio di progetto Additive Manufacturing con supporti in materiale differente rispetto a quello del pezzo finale desiderato.

I supporti vengono generalmente posizionati su tutta la superficie che si affaccia sulla piattaforma, in modo da rendere più facile il distacco del componente alla fine della lavorazione.

Inoltre, i supporti devono essere progettati per sostenere tutte le parti a sbalzo del componente che, come già detto, non sono in grado di auto supportarsi con la sola presenza della polvere non fusa.

Una volta che il componente viene estratto dalla camera di lavoro deve essere separato dalla piattaforma e dai supporti, generalmente tramite metodi manuali o, quando possibile, con processi di asportazione di truciolo.

A seguito della fabbricazione additiva possono essere eseguite una serie di operazioni aggiuntive, a seconda dell'applicazione finale:

- Operazioni di finitura superficiale: sabbiatura alle macchine utensili a seconda della rugosità imposta.
- Trattamenti termici di distensione per abbattere le tensioni residue.
- Trattamenti termici per l'indurimento oppure la ricottura del componente.

2. La lega CrCoMo

2.1 caratteristiche principali

Le polveri utilizzate in questo studio per la fabbricazione SLM dei campioni di caratterizzazione e dei primi modelli di protesi, sono polveri commerciali acquistate da LPW®. Le polveri vengono vendute dichiarando un diametro compreso tra 1545 μm e una geometria sferica. Dalle immagini al SEM effettuate sulla polvere vergine (Figura 42) tuttavia, si vede che una percentuale non trascurabile di particelle ha una forma allungata e molte sono unite a satelliti di diametro molto inferiore.

In particolare, l'80% delle polveri hanno un diametro equivalente compreso tra 23-43 μm , mentre il 9% di esse ha dimensioni fuori dal campo garantito dall'azienda. I valori minimi e massimi misurati sono, rispettivamente 9,1 μm e 55,1 μm .

La composizione chimica delle polveri è stata valutata tramite EDS e i risultati sono riassunti in Tabella:

Misura	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Co	Mo	
1		0.1	0.86	28.88	0.91	0.08	62.88	6.39
2		0.1	0.85	29	0.82	0	62.85	6.48
3		0.12	0.83	28.82	0.75	0	63	6.47
		0	0.91	28.86	0.72	0.08	62.58	6.84
			0.86	28.89	0.80	0.04	62.83	6.55
								4
								Media 0.07
St. Dev.	0.06	0.03	0.08	0.08	0.05	0.18	0.20	

Questi valori sono stati poi confrontati con quelli stabiliti dalla norma ASTM F75 e il risultato ottenuto ha permesso di dichiarare che le polveri sono conformi alla normativa.

La lega Cromo-Cobalto-Molibdeno, presenta i vantaggi apportati sia dal cromo sia dal cobalto che dal molibdeno, conferendo elevate doti di temperabilità, durezza (soprattutto grazie alla presenza del cobalto) ed eccellente resistenza all'usura e alla corrosione. I componenti principali sono il cromo e il molibdeno, il cobalto già in piccolissime quantità è in grado di aumentare notevolmente le proprietà meccaniche della lega. Questo tipo di lega essendo compatibile con il corpo umano, e avendo ottime resistenze all'usura è stato ampiamente impiegato in ambito biomedicale per la produzione di protesi.

3. Il settaggio in preparazione ai test sperimentali.

3.1 La pressa: principali componenti e settaggio per la prova a flessione

Per poter attuare i test a flessione dei provini è stato necessario realizzare una pressa ad hoc (vedi Fig. 8); essa è costituita da:

- Un telaio in alluminio (in modo da garantire resistenza meccanica e al contempo leggerezza) composto da un basamento con cava centrale, realizzata per asportazione di truciolo con fresa a controllo numerico (CNC), e da quattro colonne che consentono l'alloggio e lo scorrimento verticale della traversa.
- Una cella di carico estensimetrata e collegata al ponte di Wheatstone, con configurazione a ponte intero, per la rilevazione dell'effettivo carico esercitato sul provino. Essa è stata collegata da un lato alla traversa e dall'altro al punzone che viene a contatto con il provino.
- Un sistema di serraggio ad "U" che permettesse di vincolare il provino e quindi simulare la condizione ideale di "trave incastrata". Esso è stato realizzato in acciaio e a partire da un blocco pieno si è ricavato il vincolo caratterizzato dalla presenza della sede per provino di dimensioni 16 x 10 x 20 mm.
- Una fotocamera, per l'acquisizione delle immagini, a carichi crescenti, da correlare attraverso Ncorr
- Sistema di illuminazione realizzato con strisce di LED incollate ad una piastra metallica e accuratamente posizionato in modo tale da illuminare al meglio la superficie oggetto delle analisi
- Una traversa in alluminio, realizzata per asportazione di truciolo, caratterizzata da un foro cieco filettato M12 per l'accoppiamento con la barra filettata, 4 fori passanti Ø6 per

permettere l'ancoraggio della cella di carico, 4 piccole appendici per consentire lo scorrimento lungo le guide delle colonne.

- Due sistemi di movimentazione manuale; uno per la movimentazione verticale della traversa e quindi per l'applicazione del carico da parte del punzone, l'altro per il corretto posizionamento della telecamera.

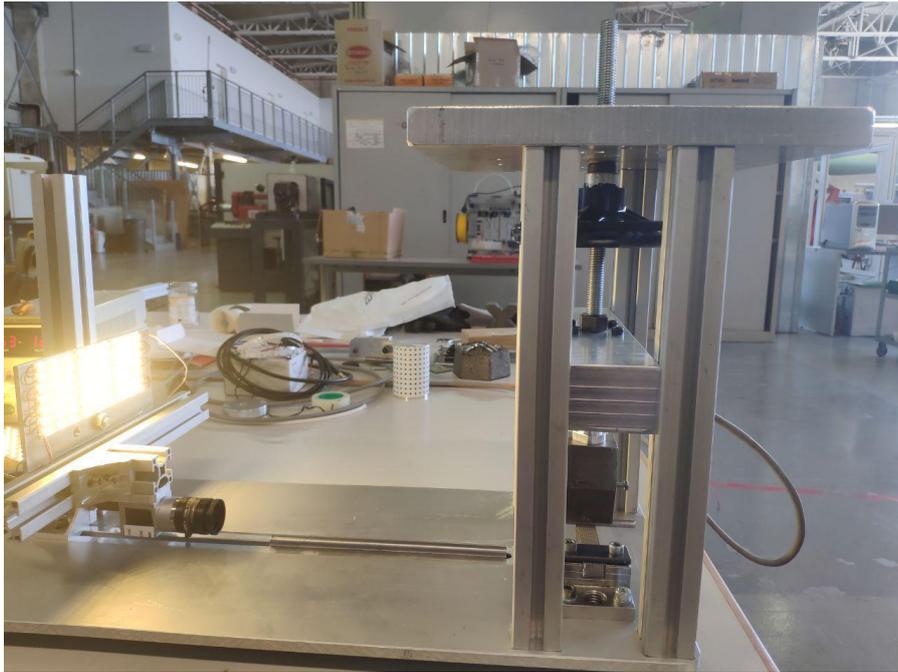


Figura 8: Pressa realizzata ed utilizzata per la prova a flessione dei provini

Settaggio dei sistemi di movimentazione:

Il sistema di movimentazione necessario per l'applicazione e rimozione del carico, è stato realizzato facendo uso di una piastra in alluminio, un volantino in plastica, un dado M12, un cuscinetto reggispira e una barra filettata. Innanzitutto, il volantino, il cui foro al centro risulta filettato, è stato avvitato alla barra filettata che a sua volta è stata accoppiata con la piastra mediante un foro passante e fissata ad essa attraverso il dado; dopodiché la piastra è stata fissata alla superficie superiore delle colonne del telaio mediante 4 bulloni M6. Ora grazie al foro M12 la traversa è stata accoppiata con la barra filettata; quindi semplicemente avvitando il volantino sulla barra esso tenderà a salire verso l'alto finché arriverà a battuta con la superficie inferiore piastra

stessa, a quel punto continuando ad avvitare il volante la traversa si sposterà verso il basso consentendo quindi al punzone di venire a contatto col provino ed esercitare il carico flettente. Per consentire il raggiungimento di carichi più elevati, è stato inserito un cuscinetto reggispinta tra il volantino e la piastra; inoltre per far sì che la traversa possa risalire (e quindi il provino possa essere scaricato), viene impiegato il dado precedentemente avvitato alla barra; infatti una volta che esso è arrivato a battuta con la faccia superiore della piastra se lo si continua ad avvitare sarà possibile sollevare la barra filettata e quindi la traversa con tutti gli elementi ad essa accoppiati. Il sistema di movimentazione della telecamera invece è costituito da una colonna ed una traversa, entrambe dotate di guide per consentire lo scorrimento rettilineo di elementi ad esse accoppiati. Pertanto la colonna è stata collegata ad un elemento corsoio che scorrendo nella cava del basamento permette al sistema di rilevazione ottica di avvicinarsi al provino; la traversa è accoppiata alla colonna ed è in grado di traslare su di essa verticalmente. La fotocamera invece è collegata con un altro elemento corsoio alla traversa, in questo modo sarà possibile movimentare la telecamera lungo tre assi (quello definito dalla cava del basamento, quello definito dalla colonna, quello definito dalla traversa) e quindi di ottenere ottime immagini per l'analisi DIC. La pressa così realizzata viene quindi azionata e regolata manualmente ruotando il volante; come dati output che essa fornisce a computer si hanno: il carico esercitato dal punzone (il quale viene letto dalla cella di carico) e le fotografie scattate ai diversi carichi dalla fotocamera.

3.2 La geometria dei provini e le lavorazioni di post-produzione attuate

I provini sono stati stampati a Bologna presso il laboratorio del dipartimento di ingegneria (DIN) dove è presente la macchina MYSINT100 realizzata da Sisma S.p.a.

La complessa struttura lattice disegnata con CREO (software di modellazione 3D) che contraddistingue i provini analizzati è caratterizzata dall'accostamento di celle elementari (vedi Fig. 9) aventi tutte la stessa geometria fino ad ottenere le dimensioni finali del provino.

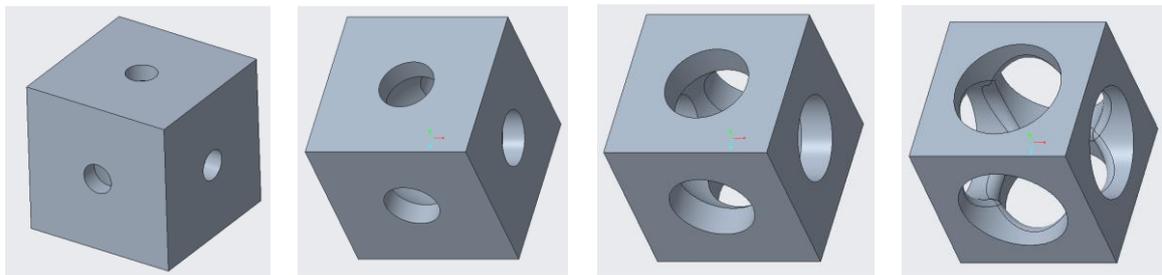


Figura 9: Disegni CREO delle celle elementari che costituiscono la struttura reticolare dei diversi provini (da sinistra a destra: 300/500/750/1000)

Per la realizzazione della particolare geometria dei provini, il laser della stampante ha dovuto seguire una complessa traiettoria fatta di tratti rettilinei e curvilinei (vedi Fig. 10) e per questo motivo sono state impiegate 56 ore di Selective Laser Melting per la realizzazione dei 12 provini. In particolare il laser è stato applicato con diversi parametri tra perimetro e cuore del layer:

- sul perimetro Potenza=130 W velocità= 1200 mm/s
- al cuore Potenza=110 W velocità= 1200 mm/s

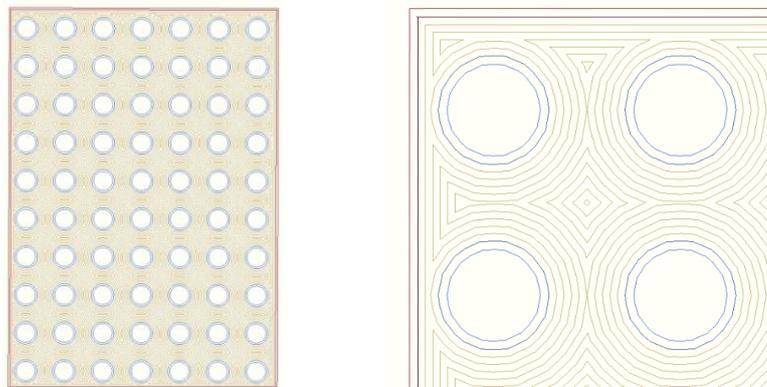


Figura 10: Traiettorie seguite dal laser per la realizzazione di un layer

Come precedentemente spiegato, le componenti realizzate con tecnologia SLM necessitano di supporti per consentire la realizzazione di parti a sbalzo.

Nel nostro specifico caso i supporti sono stati realizzati per consentire un distacco agevolato dei provini dalla tavola portapezzi sulla quale è avvenuta la fusione della polvere metallica. Per eliminare i supporti è stato utilizzato un piccolo scalpello dalla punta piatta dopodiché è stato necessario inglobare con della resina bicomponente, (per un'altezza di 2cm), il provino.



Figura 11: Traiettorie seguite dal laser per la realizzazione di un layer

La resina è stata impiegata per far sì che la parte di provino incastrata a telaio avesse una rigidità superiore e quindi non si verificassero fenomeni di schiacciamento nella fase di serraggio dell'incastro stesso.

Per realizzare lo strato di 2cm di resina e CrCoMo, sono stati posizionati i provini in degli stampi contenenti la resina bicomponente dopodiché la fase di asciugatura della resina è avvenuta all'interno di una camera pressurizzata a 2 bar in modo tale che eventuali bolle d'aria intrappolate nella resina venissero in superficie e quindi migliorasse la sua omogeneità.

Successivamente attraverso la fresa CNC è stata asportata la parte di resina in eccesso così che questi 2cm di provino avessero le dimensioni adatte per entrare nell'alloggiamento dell'incastro.

Infine, prima di poter procedere ai test di flessione, è stata verniciata con bomboletta spray di colore bianco, la superficie del provino oggetto di studio; poi su questo primo strato sono state spruzzate rapidamente delle gocce di colore nero. Tale processo di verniciatura è fondamentale in quanto costituisce il riferimento per l'analisi DIC (ampiamente descritta nel capitolo successivo).

4. Analisi dello stato tensionale a flessione: dal test con pressa al metodo DIC (Digital Image Correlation)

4.1 La correlazione d'immagini mediante il programma Ncorr

Ncorr è un programma open source di MATLAB che si occupa di realizzare correlazioni digitali di immagini.

La correlazione di immagini è un metodo rapido ed intuitivo che permette di determinare quali siano le deformazioni (strains) e gli spostamenti (displacements) dei vari punti che costituiscono la regione d'interesse.

Il programma Ncorr, una volta scaricato ed installato sul computer, viene lanciato direttamente dalla Command Window di MATLAB semplicemente digitando `>>ncorr`.

Una volta lanciato il software, compare la finestra di lavoro in cui inserire i dati relativi alla correlazione d'immagini che si vuole attuare (vedi figura 12).

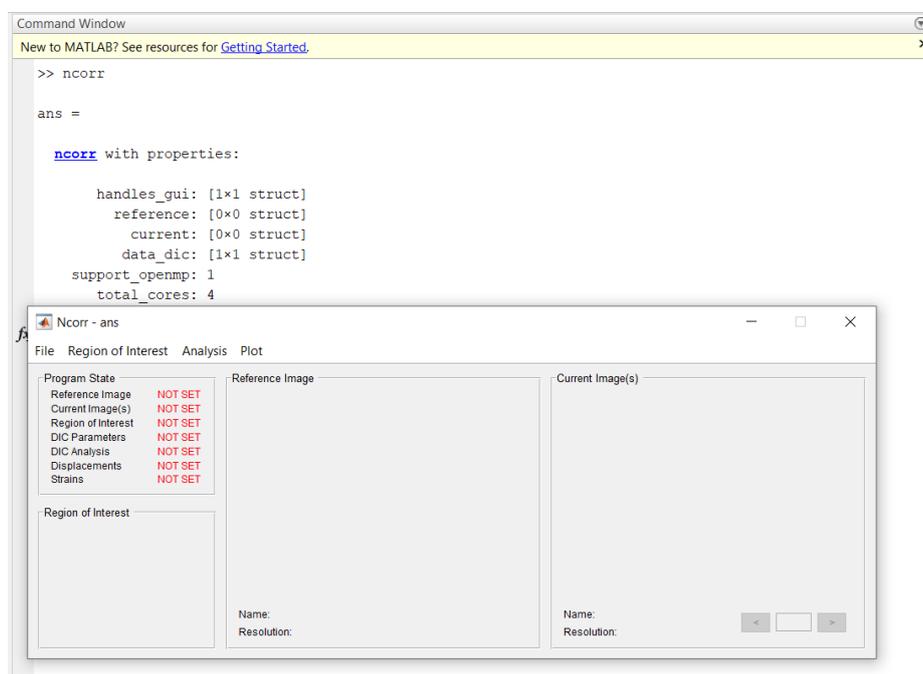


Figura 12: finestra di dialogo per la correlazione d'immagini

Il primo passaggio da compiere è caricare l'immagine di riferimento, che nel nostro caso sarà quella relativa al provino soggetto a carico nullo, dopodiché andranno caricate tutte le altre

immagini in cui il provino è soggetto a flessione così da poterle confrontare con quella di riferimento.

Il secondo passo consiste nella definizione della ROI (Region Of Interest; vedi Fig. 13), essa è una immagine di geometria analoga alla superficie oggetto di studio e riveste un ruolo chiave nell'analisi DIC. La ROI infatti, indica ad Ncorr quale sia la regione di interesse che deve analizzare quando le immagini vengono correlate tra loro. Essa viene realizzata al CAD (o estrapolata dallo schizzo del modello 3D) dopodiché affinché possa essere letta correttamente da Ncorr, nel nostro caso, è stato necessario realizzarla di colore bianco su sfondo nero.

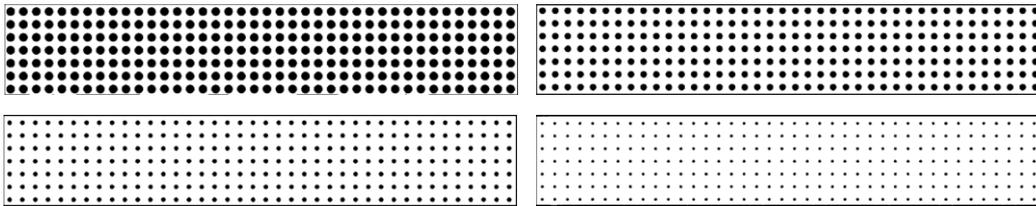


Figura (13): Le quattro tipologie di ROI impiegate (1000/750/500/300 μm)

Successivamente si è passati all'inserimento dei parametri di analisi, quindi sotto la voce Analysis si è fatto il setup delle seguenti impostazioni:

- 1) Set DIC Parametres; sono parametri richiesti per l'analisi delle immagini:
 - i) Subset options: sono le opzioni principali dell'analisi DIC e definiscono le dimensioni dei sottoinsiemi e la loro distanza reciproca. I parametri da inserire sono: 1) Subset Radius, ovvero la grandezza del sottoinsieme dell'analisi. 2) Subset spacing, cioè la distanza reciproca tra i sottoinsiemi. Per questi valori è presente molta letteratura, ma spesso tali articoli si basano su osservazioni empiriche, perciò si è preferito effettuare un insieme di prove che ha permesso di scegliere i valori più adeguati alle immagini acquisite.

Questi valori sono stati impostati a 45 per il Subset Radius e a 3 per il Subset Spacing dei provini con fori da 300 μm, 40/3 per i provini con fori da 500 μm, 35/3 per i provini con fori da 750 μm, 28/3 per i provini con fori da 1000 μm.
 - ii) Iterative solver options: queste opzioni impostano i valori delle iterazioni dell'analisi DIC, sono presenti valori preimpostati che in questo caso sono stati lasciati inalterati.

- iii) Multithreading options: corrispondono al numero di core specificato dall'utente in fase di installazione; 4 per questa analisi
- 2) Perform DIC analysis: tramite questa opzione è possibile collocare dei "Seeds" nella propria ROI, permettendo così al programma di dividere la ROI e analizzare in parallelo, quindi più rapidamente, le regioni ricavate (che saranno 4 come il numero di core impostato precedentemente). I Seeds vanno posizionati non troppo vicino ai bordi dell'immagine per evitare di avere problemi in caso di forti compressioni e deformazioni e vanno posizionati in modo da ottenere regioni con circa la stessa area per permettere al software di analizzare le aree in tempi uguali e non avere discrepanze durante l'analisi.
 - 3) Format Displacements: tramite questa opzione si può caricare l'immagine di riferimento e fornire le dimensioni di essa. Il programma provvederà poi a calcolare la conversione pixels-mm e impostarla per le immagini successive
 - 4) Calculate Strain: l'unico parametro modificabile è lo Strain Radius, ovvero il raggio di un cerchio che seleziona dei punti su cui adattare un piano. Tale raggio, per far sì che l'analisi sia accurata, deve essere il più basso possibile senza fornire errori nei dati. Per questa analisi lo si è impostato a 9.

Finita l'analisi tramite Ncorr all'interno del Workspace di MATLAB è possibile reperire tutti i valori di deformazione e spostamento lungo gli assi X e Y, dei punti analizzati. Questi risultati pertanto sono stati salvati e confrontati con quelli derivanti dai calcoli analitici, in modo tale da verificare l'effettiva affidabilità del metodo DIC come metodo d'analisi dello stato tensionale a flessione.

4.2 Risultati sperimentali

4.2.1 Displacements and Strains: rappresentazioni grafiche degli spostamenti e delle deformazioni, a differente carico

La prova di flessione sollecita le fibre superiori del provino a trazione, mentre le fibre inferiori a compressione, pertanto ci aspetteremo di ottenere deformazioni negative nella parte inferiore e positive in quella superiore; per quanto riguarda invece gli spostamenti, essi saranno molto accentuati in direzione Y in quanto è la direzione di applicazione del carico e quindi della freccia che verrà a formarsi, mentre in direzione X gli spostamenti saranno quasi nulli e dovuti alla trazione e compressione delle fibre. Il carico è stato esercitato con step differenti (50N, 100N o 150N) a seconda della geometria del provino.

L'analisi per correlazione d'immagini (DIC) ha fornito i seguenti dati:

Provini con fori da 1000 μm

Le figure 14 e 15 mostrano la sequenza di spostamenti, a carico crescente, registrati dall'analisi su un provino con fori da 1000 μm ; in particolare per gli spostamenti in direzione X notiamo che

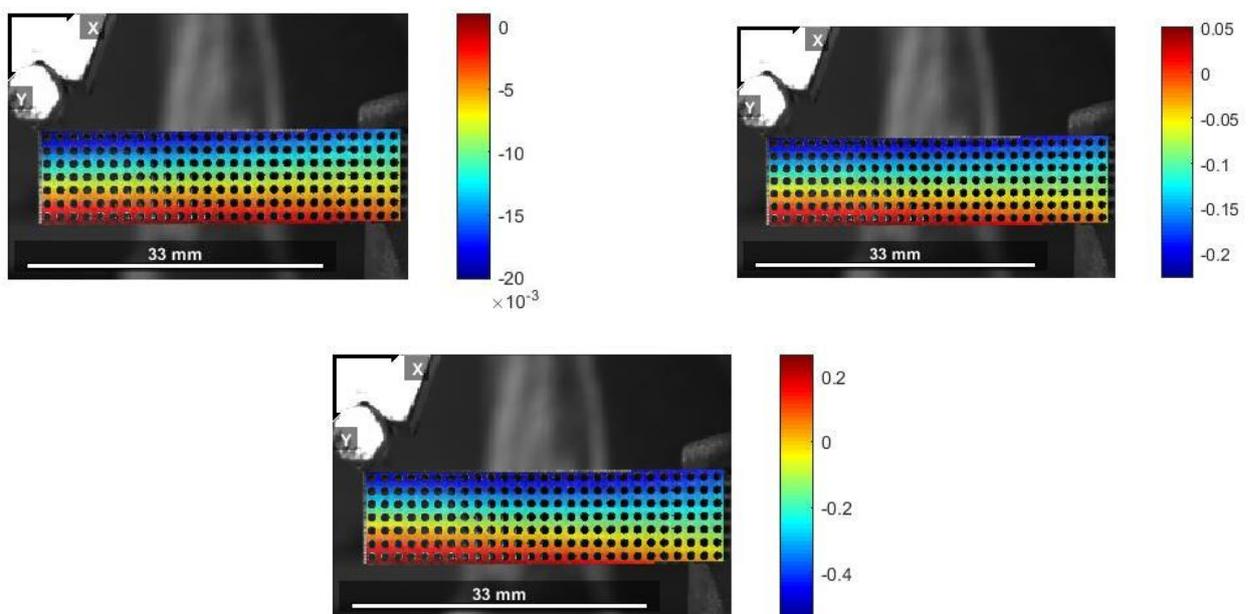


Figura 14: spostamenti in direzione X per carichi crescenti; provini da 1000 μm

a causa del fatto che le fibre superiori sono soggette a tensione, gli spostamenti sono con segno meno perché opposti al verso X del sistema di riferimento (ma ciò di cui bisogna tener conto è il

valore assoluto non il segno), mentre nelle fibre inferiori essendovi compressione, i punti tenderanno ad avvicinarsi all'incastro subendo quindi spostamenti che presentano segno positivo poiché concordi con la direzione del SdR (sistema di riferimento).

Relativamente agli spostamenti in direzione Y invece possiamo notare come via via che ci allontaniamo dall'incastro (elemento di vincolo) essi aumentano notevolmente, anche di un ordine di grandezza e ciò è assolutamente in linea con i concetti teorici di trave inflessa.

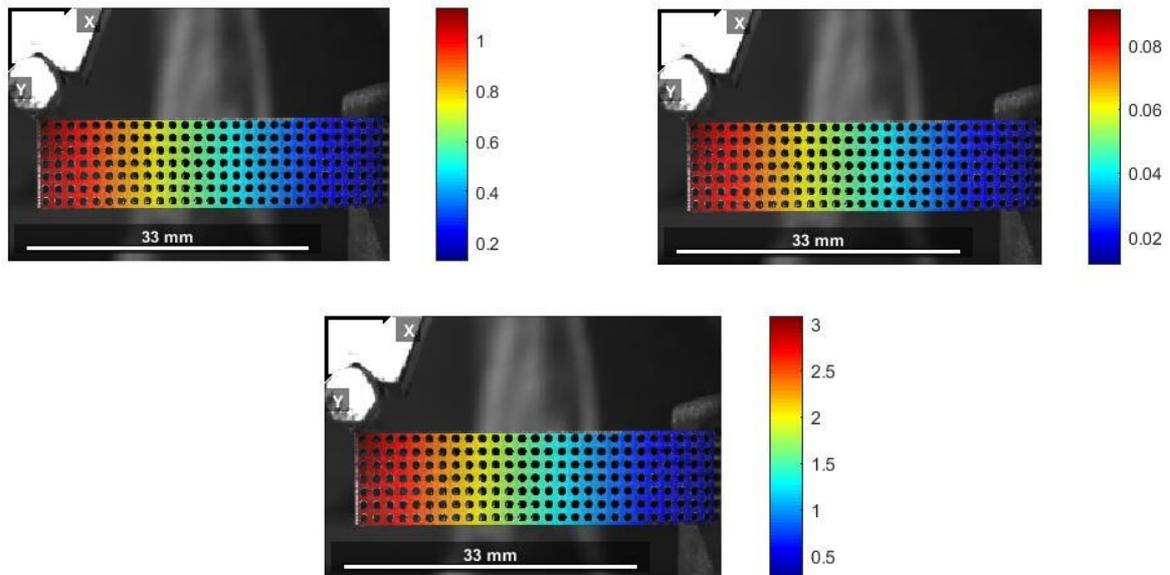


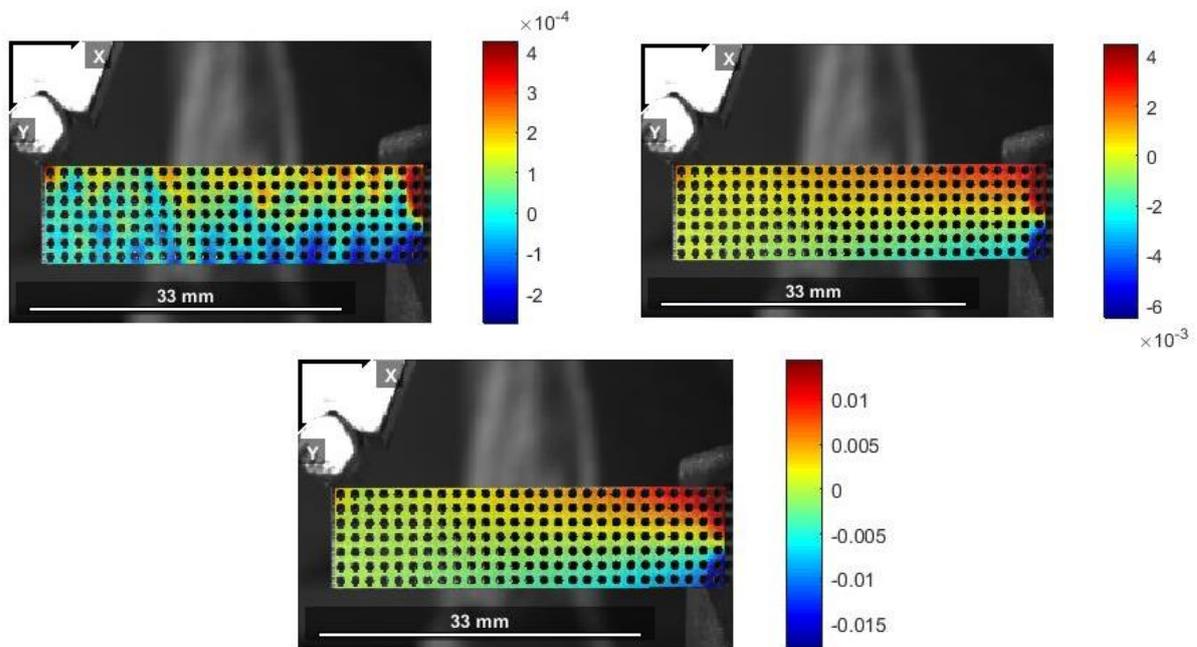
Figura 15: spostamenti in direzione Y a carichi crescenti; provini da 1000 μm

In figura 16 osserviamo le deformazioni a flessione lungo l'asse X; notiamo che il provino subisce le maggiori deformazioni all'incastro, proprio perché in tal punto il momento flettente è massimo (in quanto il braccio è massimo), in particolare è evidente l'asse neutro disposto orizzontalmente in mezzzeria, le fibre superiori soggette a trazione presentano deformazioni positive, mentre quelle inferiori essendo soggette a compressione subiscono deformazioni negative.

È interessante notare come all'aumentare del carico le deformazioni si concentrino sempre più verso la zona maggiormente sollecitata, ottenendo deformazioni praticamente nulle nel resto del provino. Ciò è motivato dal fatto che superando il limite di snervamento (in quei punti vicino all'incastro), si passa in campo plastico e si ha una concentrazione ancor più evidente delle deformazioni nelle zone maggiormente soggette a momento flettente; infatti nella prima immagine della figura 16, dove il carico è 50N, si vede che le deformazioni delle fibre superiori ed inferiori non sono presenti solamente vicino all'incastro ma in tutta la luce del provino. Tale concetto lo potremo facilmente osservare anche nei provini successivi, tuttavia essendo i provini da 1000 μm

quelli meno rigidi, il fenomeno si verificherà a carichi minori proprio perché già a 700/800 Newton di carico esercitato dal punzone si supera il limite di snervamento.

Tant'è vero che quando durante il test sperimentale si è letto alla cella di carico un valore di 1000N, il provino era evidentemente deformato plasticamente una volta scaricato e svincolato dall'incastro.



*Figura 16: Deformazioni in direzione X con carichi crescenti (48,475N, 497,298N, 996,837N);
provini da 1000 μm*

Nella figura 17 troviamo una rappresentazione grafica delle deformazioni in direzione Y. Si può notare che in tale direzione le deformazioni sono negative o quasi nulle agli estremi e di valore positivo o nullo al cuore; ciò è dovuto al fatto che le sezione della trave in direzione Y presentano trazione al centro e compressione alle estremità. In particolare possiamo rilevare le deformazioni maggiori (in termini di valore assoluto) in corrispondenza della zona inferiore dell'incastro e nei punti vicini al contatto tra il punzone ed il provino, dove viene esercitato il carico. Queste due zone infatti sono soggette a forti carichi di compressione che portano ad ottenere quelle aree di elevata deformazione contrassegnate col colore blu.

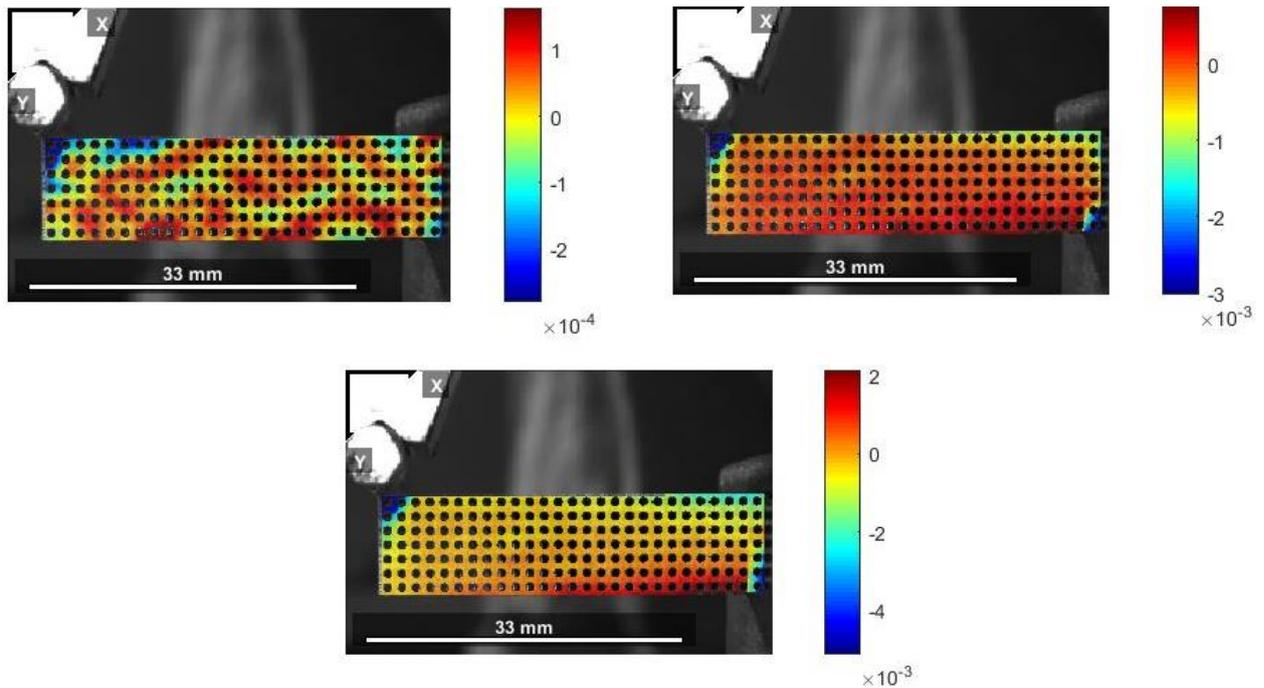


Figura 17: Deformazioni in direzione Y con carichi crescenti (48,475N, 497,298N, 996,837N); provini da 1000 μm

Provini con fori da 750 μm

I provini con fori da 750 μm sono più rigidi rispetto ai precedenti da 1000 μm in quanto presentando forature e vani interni di dimensioni minori avranno una sezione resistente maggiore; pertanto si è deciso di sottoporre il provino fino a carichi maggiori (circa 1500 Newton).

Per quanto riguarda gli spostamenti in direzione X, come si può osservare dalla figura 18, notiamo che i punti appartenenti alle fibre superiori riportano piccoli spostamenti negativi, mentre i punti sulle fibre inferiori subiscono spostamenti positivi in quanto concordi con l'ascissa del SdR.

Tali valori maggiori e minori di zero sono motivati dal fatto che le fibre al di sopra dell'asse neutro sono soggette a trazione e quelle al di sotto sono soggette a compressione, quindi i punti che costituiscono le fibre superiori tenderanno a spostarsi verso sinistra (in verso opposto a quello di X, da qui i valori negativi), invece i punti che costituiscono le fibre inferiori a causa della compressione tenderanno a spostarsi verso l'incastro (quindi in direzione e verso concordi con l'asse X) dando origine a valori positivi.

Questi spostamenti come si può facilmente intuire dalla teoria della trave incastrata e flessa, sono molto piccoli se confrontati con quelli in direzione Y.

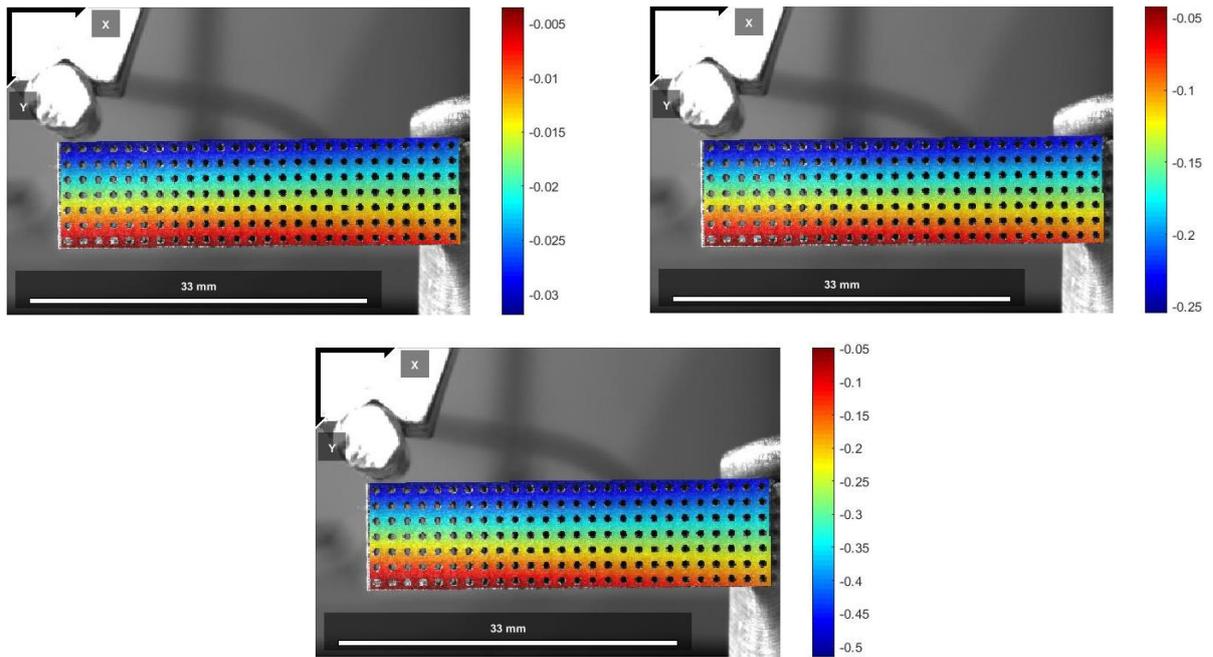


Figura 18: spostamenti in direzione X per carichi crescenti; provini da $750\ \mu\text{m}$

Per gli spostamenti in direzione Y (vedi fig. 19) avviene un comportamento analogo a quello descritto nei provini con fori da $1000\ \mu\text{m}$; pertanto piccoli spostamenti tutti positivi, poiché diretti verso il basso come l'asse Y del SdR, che aumentano di valore via via che ci spostiamo verso l'estremo libero

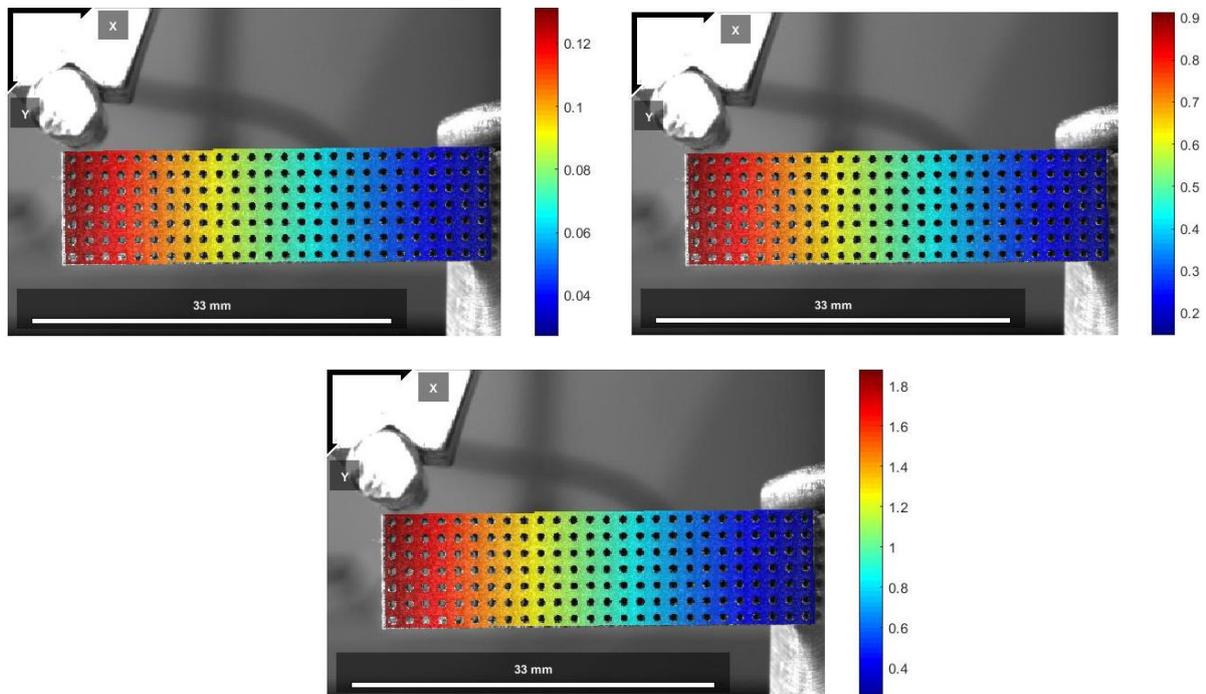


Figura 19: spostamenti in direzione Y a carichi crescenti; provini da $750\ \mu\text{m}$

Anche per le deformazioni delle sezioni in direzione X e Y valgono i ragionamenti fatti per i provini da 1000 μm , quindi in direzione X notiamo deformazioni negative delle fibre inferiori in quanto esse sono soggette a compressione, mentre nei punti appartenenti alle fibre superiori osserviamo deformazioni positive proprio perché tali fibre applicando una coppia flettente verranno tese.

Da questa analisi DIC notiamo inoltre che l'asse neutro non è perfettamente rettilineo e posizionato in mezzeria, tale risultato è in contrasto rispetto ai risultati teorici, tuttavia ciò è ammissibile in quanto trattandosi di prove sperimentali non si riesce a realizzare la condizione ideale di trave incastrata, quindi potrebbe essersi verificato un piccolo errore nel serraggio dell'incastro e/o una non perfetta verticalità della direzione del carico; nonostante ciò i risultati possono essere considerati attendibili in quanto sono stati confrontati coi risultati dei calcoli analitici e la differenza è molto piccola, quindi accettabile.

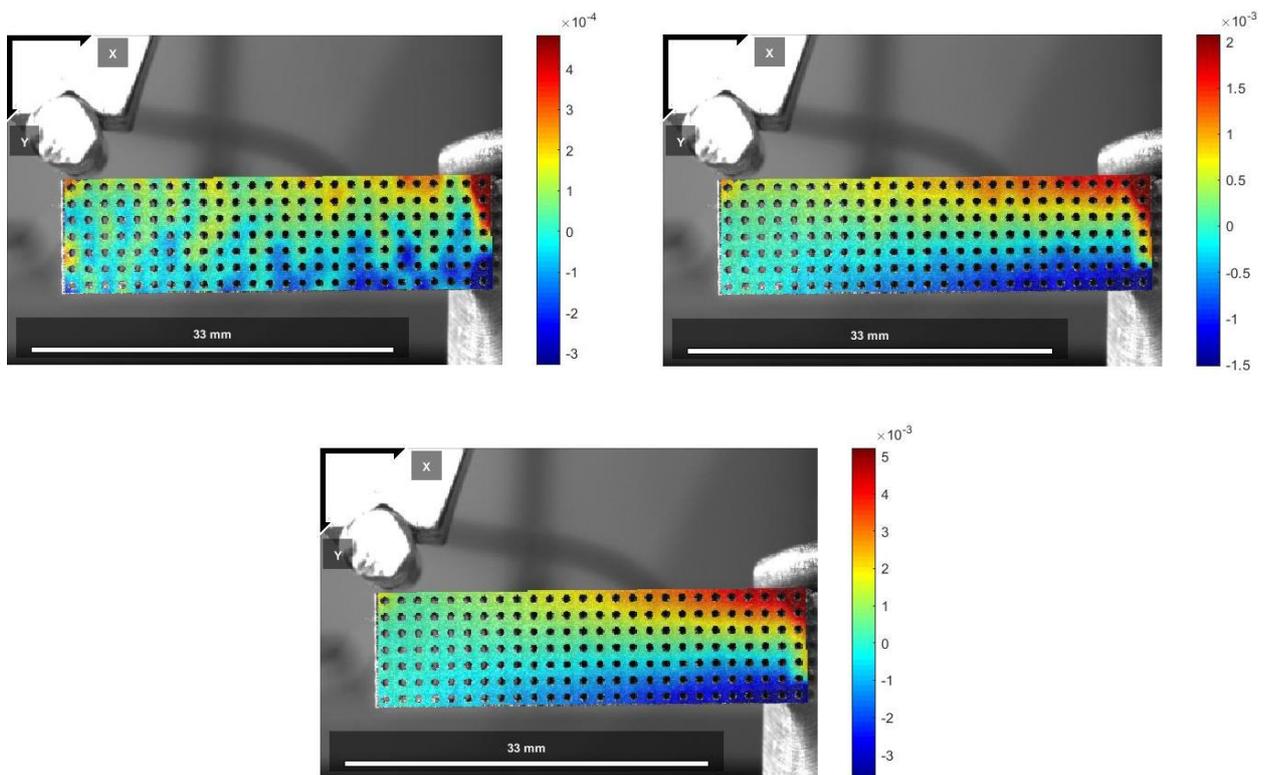


Figura 20: Deformazioni in direzione X con carichi crescenti (109,300N; 799,531N; 1519,951N); provini da 750 μm

In direzione Y abbiamo risultati simili a quelli registrati con i provini del tipo 1000 μm , infatti si nota un'elevata deformazione sia nella zona dell'incastro sia nella zona di applicazione del carico; tuttavia nei provini con fori da 1000 μm si ottenevano valori di deformazione di un ordine di grandezza più grandi, ma ciò è motivato dal fatto che la rigidità dei provini aumenta man mano che diminuisce la grandezza delle forature e dei vani interni.

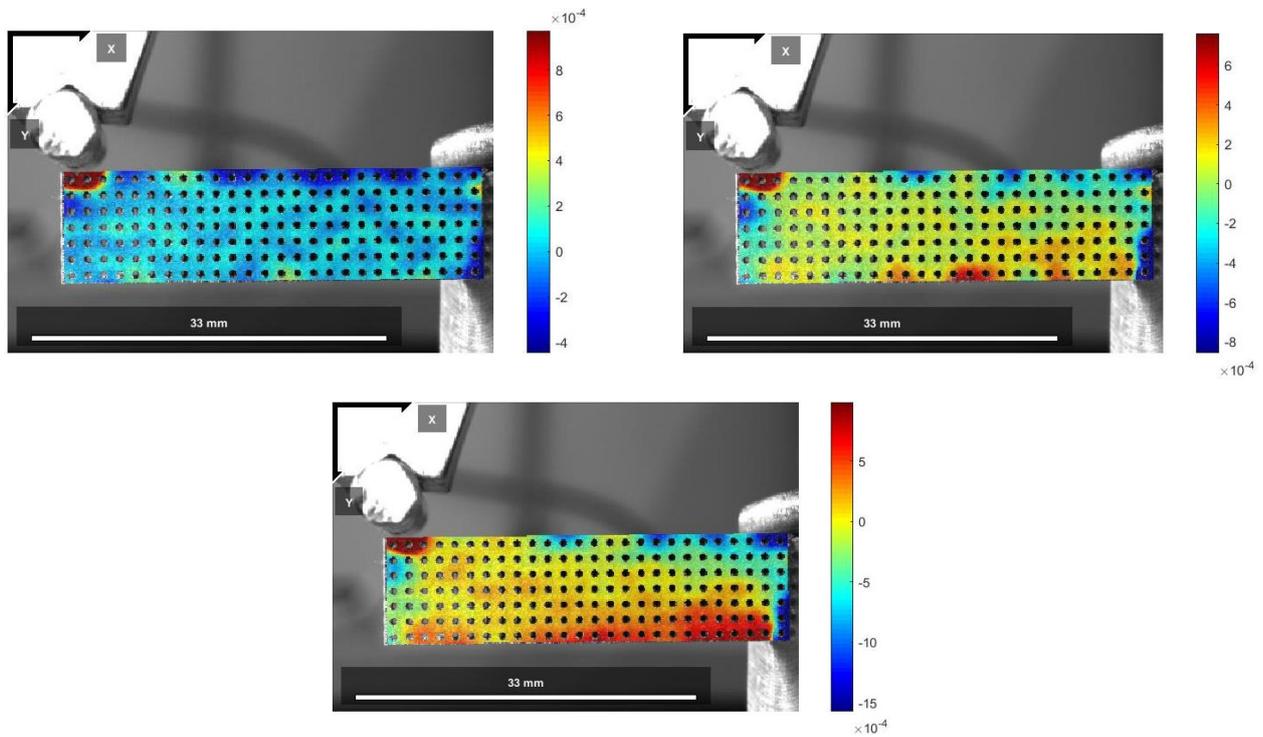


Figura 21: Deformazioni in direzione Y con carichi crescenti (109,300N; 799,531N; 1519,951N); provini da 750 μm

Provini con fori da 500 μm

Questi provini presentano una rigidità maggiore rispetto ai provini fino ad ora descritti pertanto è stato possibile esercitare carichi maggiori a parità di deformazioni.

Quindi i provini (3 per questo tipo di geometria) sono stati sollecitati con carichi anche di circa 2550 Newton; a tali livelli di sollecitazione però i provini entravano in campo plastico e anche ad occhio “nudo”, dopo aver scaricato il provino, era possibile notare la deformazione plastica.

I risultati ottenuti mediante la DIC sono molto simili a quelli ottenuti con le tipologie 1000 e 750 μm .

Gli spostamenti in direzione X notiamo essere simili a quelli registrati con i provini da 1000 μm quando i carichi insistenti sul provino incastrato sono doppi in termini di intensità; questo evidenzia ancor di più la maggiore rigidezza dovuta ad una sezione resistente molto maggiore.

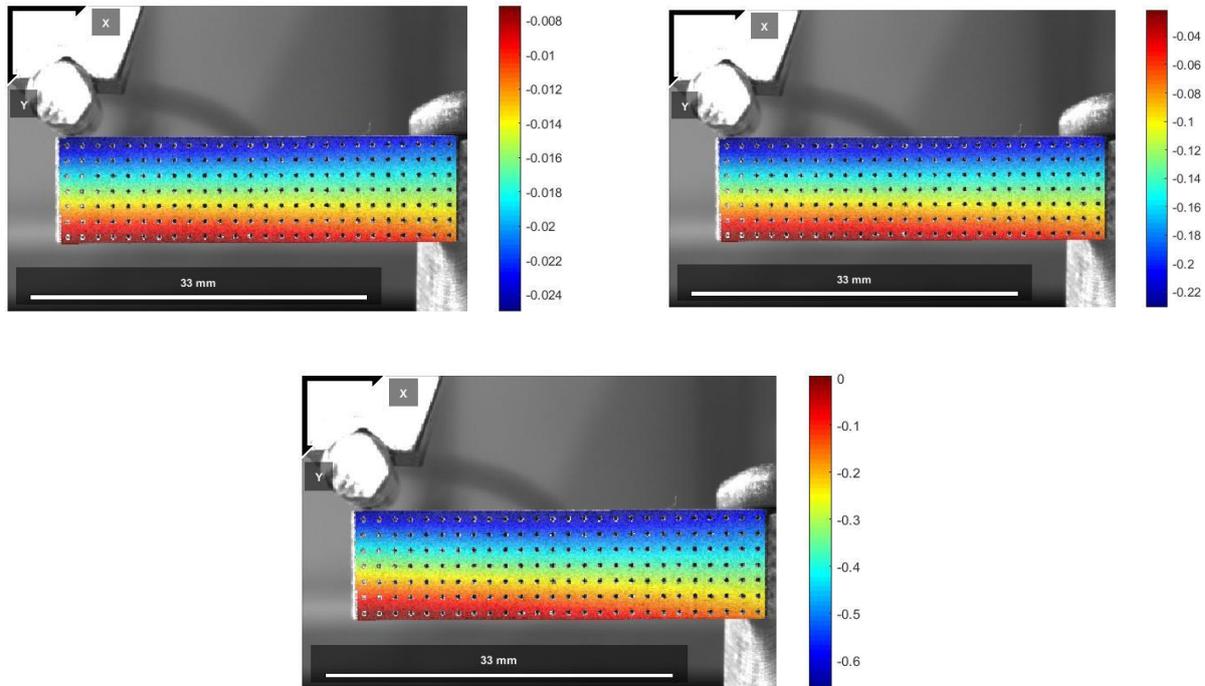


Figura 22: spostamenti in direzione X per carichi crescenti; provini da 500 μm

In direzione Y notiamo che gli spostamenti sono di qualche centesimo di millimetro per bassi carichi (104,243 Newton), appena si superano i 500N di carico sul punzone gli spostamenti iniziano a variare di qualche decimo di millimetro, ed infine arrivando addirittura a 2500N notiamo dalla terza immagine di figura 23 che si hanno spostamenti di oltre i 2,5mm; tuttavia tali valori, se osserviamo le immagini relative ai provini con minor rigidezza, venivano raggiunti già a 1000 Newton. Questi valori di freccia incrementano così tanto e raggiungono valori elevati soprattutto per il fatto che a tali carichi (1500N e oltre) si entra in campo plastico, quindi incrementando il carico esercitato della stessa quantità (ad esempio per questo provino si aumentava a step di 150N), l'incremento di deformazione è maggiore e ciò provoca la nascita di questi incrementi di freccia; ovviamente nei provini con rigidezza minore tale comportamento è ancor più evidente.

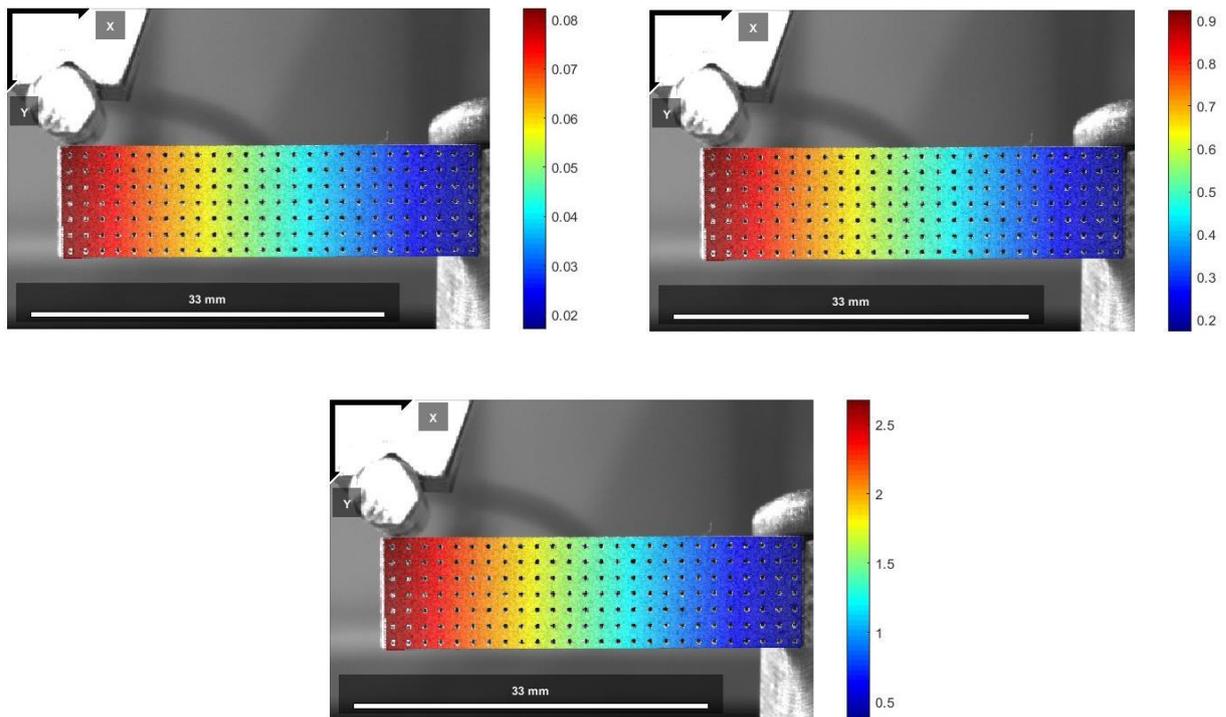


Figura 23: : spostamenti in direzione Y per carichi crescenti; provini da 500 μm

Le deformazioni in direzione X e Y ottenute attraverso l'analisi DIC di questi provini sono analoghe a quelle ottenute con i provini aventi fori da 1000 μm e 750 μm , però i valori (a parità di carico) saranno sicuramente inferiori perché l'area della sezione resistente aumenta via via che diminuisce la dimensione dei fori e delle cavità interne.

Per quanto riguarda la direzione X notiamo dalla figura 24 che con un lieve carico (104,243 N) le deformazioni non si distribuiscono omogeneamente all'interno del provino; dopodiché se invece aumentiamo il carico si iniziano a delineare le tre zone descritte nelle pagine precedenti, ovvero la zona di trazione (fibre superiori) con deformazioni positive, la zona centrale (asse neutro) dove le deformazioni oscillano nell'intorno del valore nullo, ed infine la zona di compressione (fibre inferiori) con deformazioni negative.

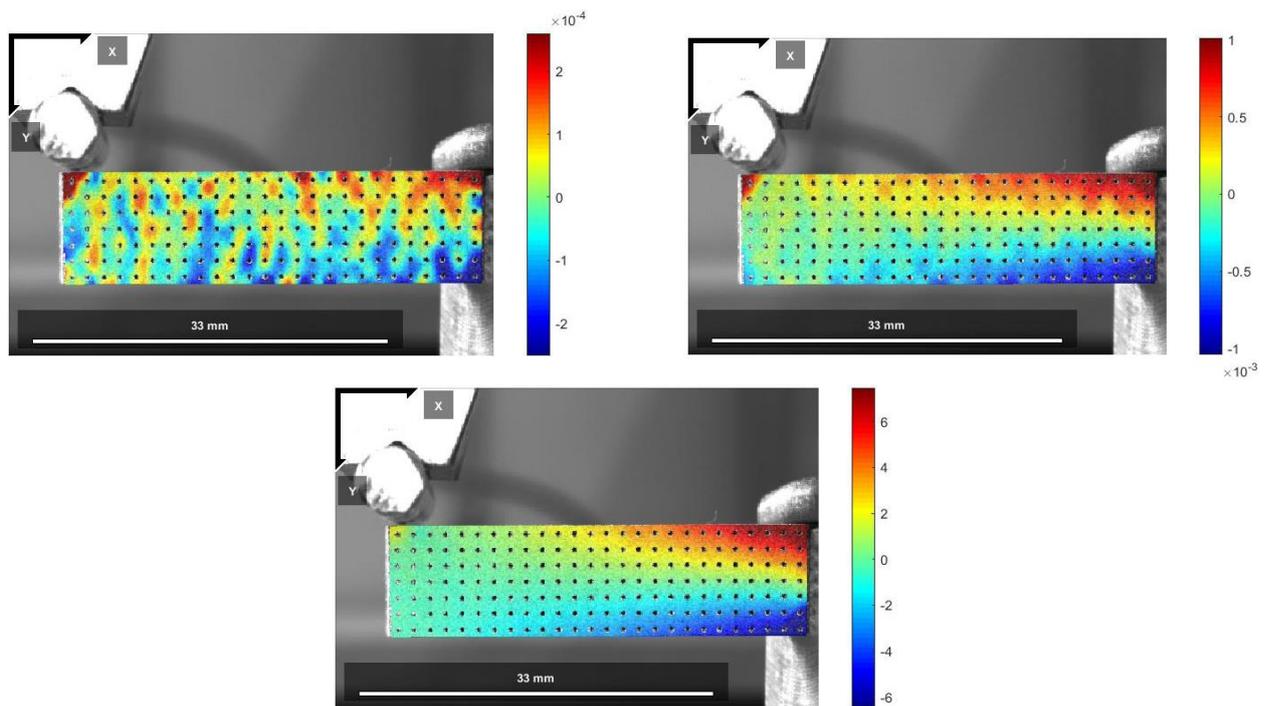


Figura 24: Deformazioni in direzione X con carichi crescenti (104,243N; 701,575N; 2504,606N); provini da 500 μm

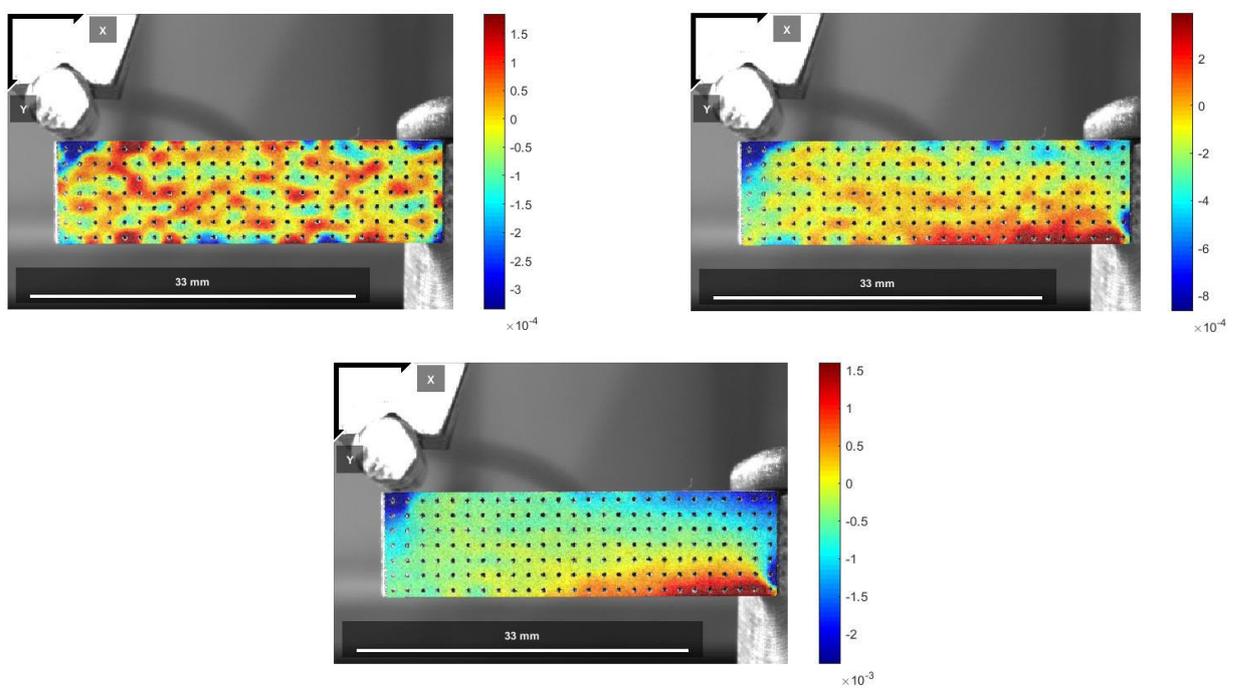


Figura 25: Deformazioni in direzione Y con carichi crescenti (104,243N; 701,575N; 2504,606N); provini da 500 μm

Provini con fori da 300 μm

I provini con fori e cavità sferiche da 300 μm sono i più rigidi utilizzati in questi test di flessione, tale geometria risulta di interessante applicazione laddove sia necessario resistere a forti sollecitazioni, pertanto se facciamo riferimento alle protesi, l'interfaccia osso protesi e gli ancoraggi dell'elemento protesico saranno realizzati con tale geometria, mentre il resto del volume occupato dalla protesi sarà realizzato con geometrie a minor rigidità così da poter favorire l'osteointegrazione. Anche su tali provini è stata realizzata la prova a flessione e il comportamento alla sollecitazione evidenziatosi è analogo a quello descritto per i provini precedenti; di seguito alcune immagini di spostamenti e deformazioni a carichi crescenti:

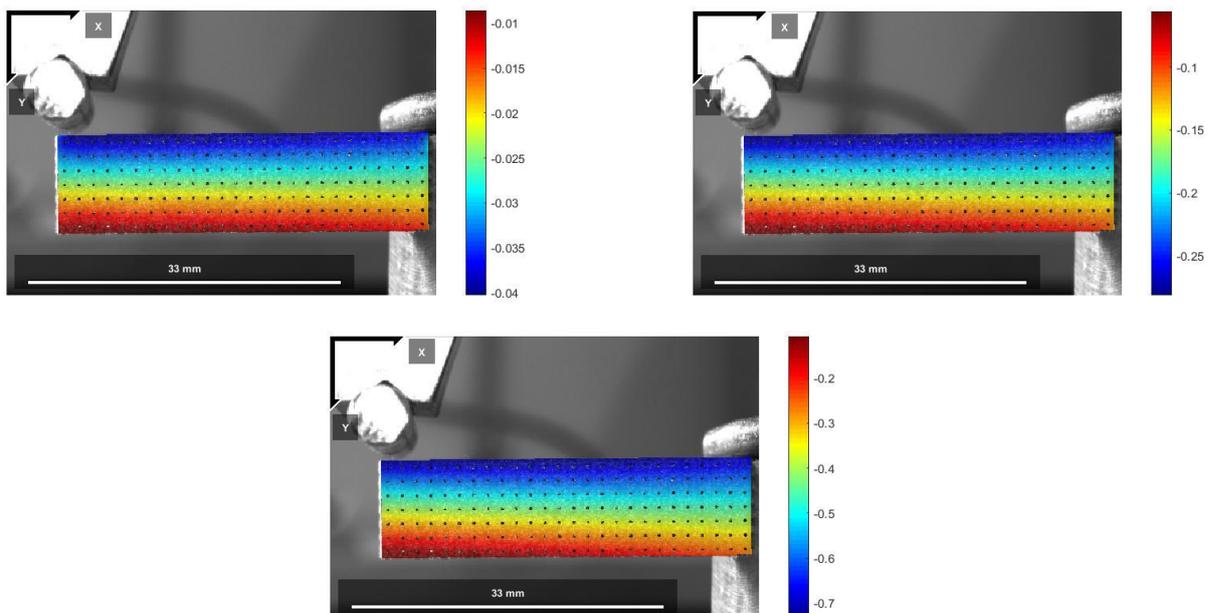


Figura 26: spostamenti in direzione X per carichi crescenti; provini da 300 μm

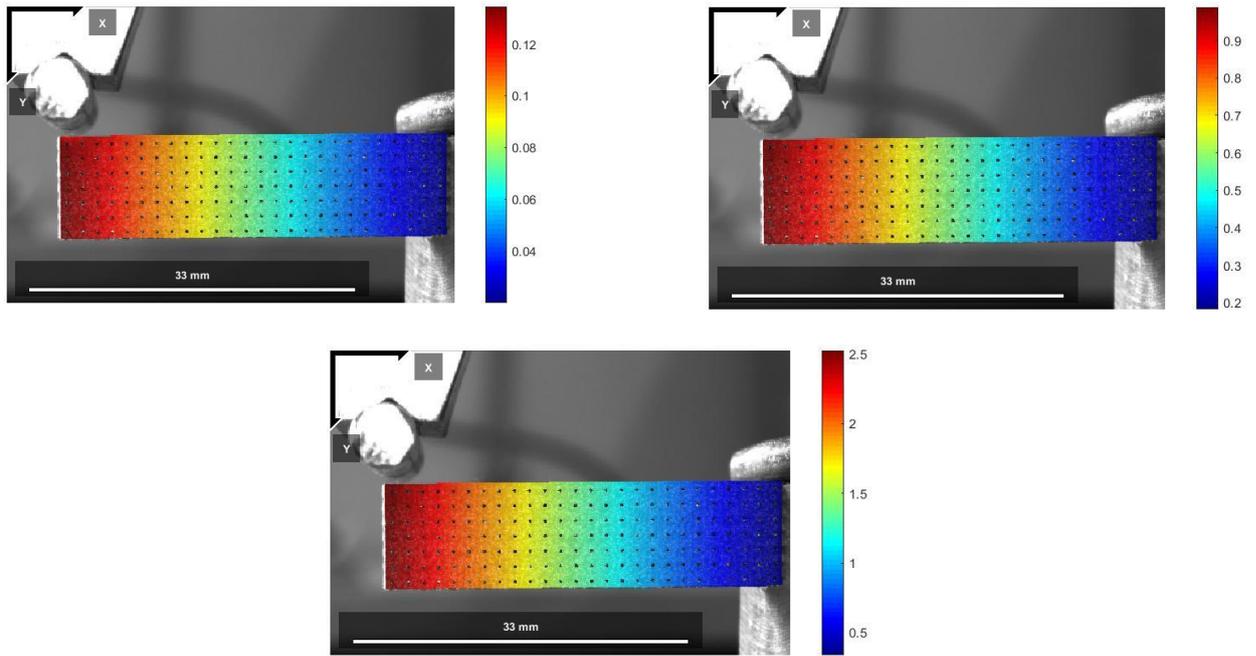


Figura 27: spostamenti in direzione Y per carichi crescenti; provini da 300 μm

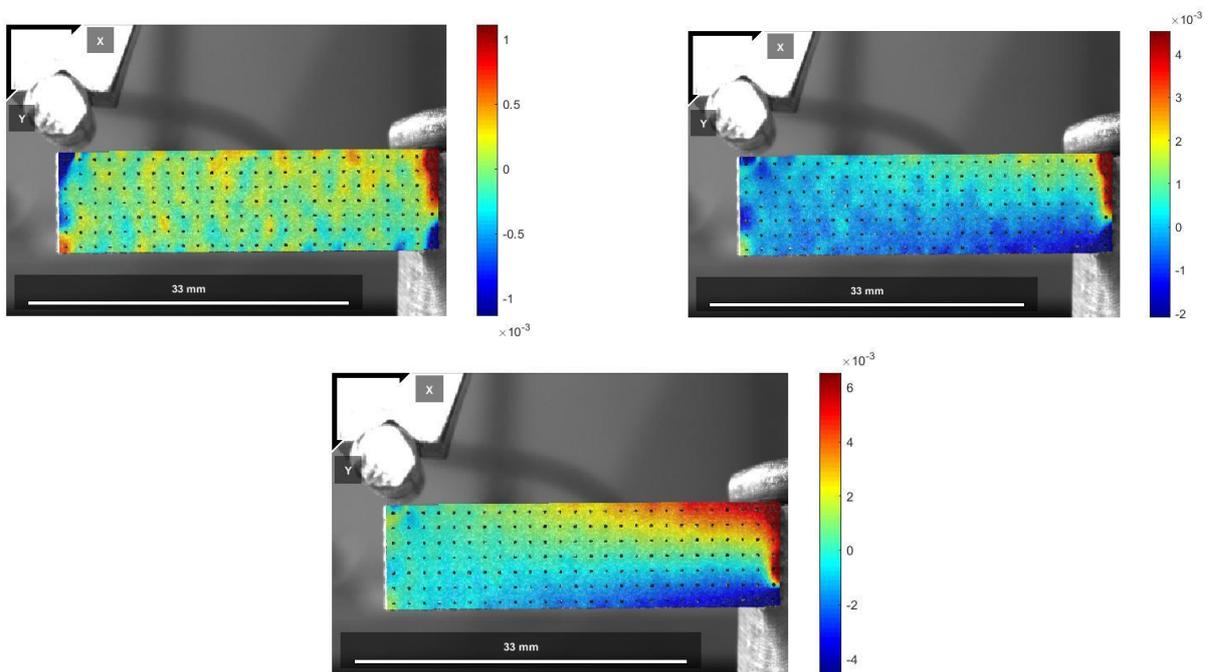


Figura 28: Deformazioni in direzione X con carichi crescenti (153,650N; 1048,613N; 2491,353N); provini da 300 μm

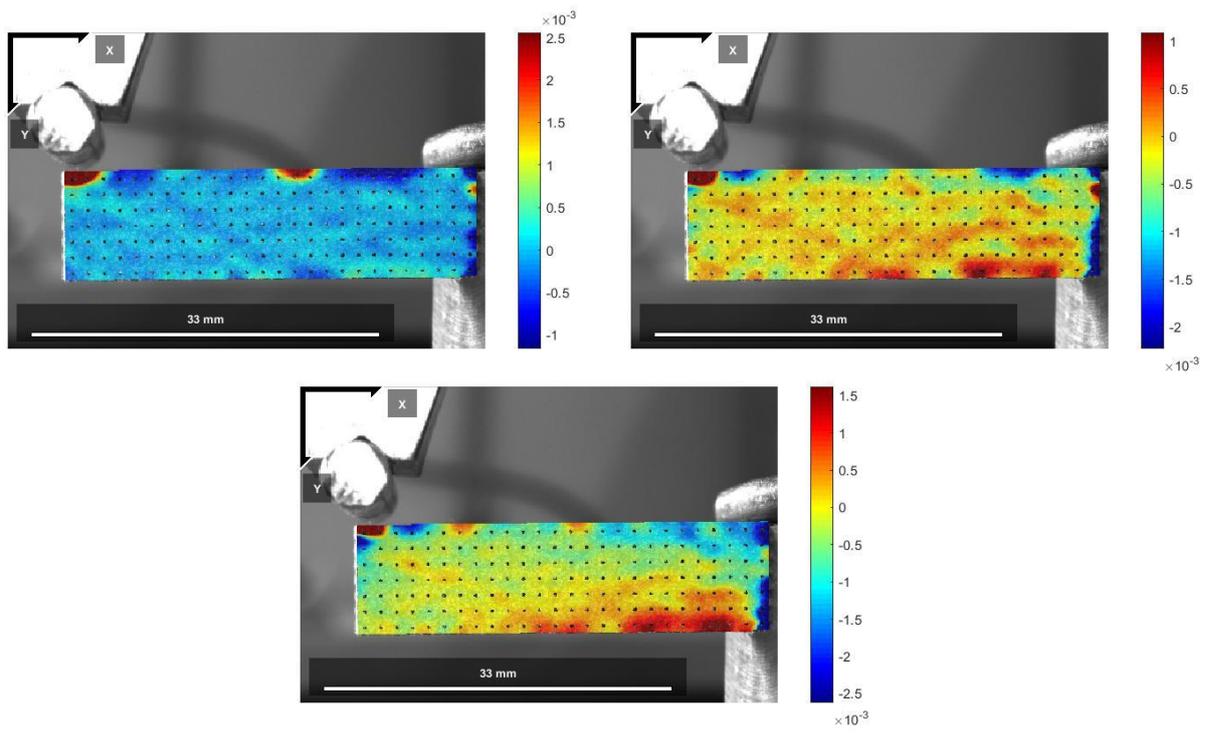


Figura 29: Deformazioni in direzione Y con carichi crescenti (153,650N; 1048,613N; 2491,353N); provini da 300 μm

5. Calcoli analitici

5.1 Calcoli analitici di tensione e deformazione nella sezione del provino; confronto con i risultati della DIC.

Una volta ottenuti da Ncorr i risultati delle analisi DIC è stato necessario verificare che tali valori fossero plausibili ed in linea con i risultati teorici; a tal fine su ognuna delle quattro geometrie testate (1000;750;500;300 μ m) sono stati svolti calcoli analitici per determinare i valori di deformazione e una volta ottenuti sono stati confrontati con quelli derivanti dall'analisi DIC.

In particolare dalle matrici numeriche restituite a fine analisi da Ncorr si è notato che, come da previsioni, i valori di deformazione presentano una simmetria assiale (in termini di valore assoluto) rispetto all'asse neutro; pertanto si è potuto effettuare il calcolo delle deformazioni della sola fibra superiore, distante 5,25mm dall'asse neutro, in quanto i valori assoluti saranno analoghi a quelli ottenibili dai calcoli sulle fibre inferiori (cambierà solo il segno: positivo per le fibre tese, negativo per le fibre compresse).

Di seguito troviamo le tabelle riportanti i risultati analitici ottenuti sulle diverse tipologie di geometria:

TIPOLOGIA PROVINI	AREA NOMINALE SEZIONE CELLA [mm ²]	CARICO APPLICATO [N]	BRACCIO (distanza forza-sezione) [mm]
FISSA 300	0,931	1048,613	19,5
FISSA 500	0,783	701,575	19,5
FISSA 750	0,543	799,531	19,5
FISSA 1000	0,250	447,44	20,25

TABELLA DI CALCOLO									
TIPOLOGIA PROVINI	AREA REALE SEZIONE CELLA [mm ²]	AREA QUADRATINO	LATO QUADRATINO [mm]	MOMENTO D'INERZIA (baricentrico del singolo quadratino) [mm ⁴]	AREA SINGOLA RIGA [mm ²]	MOMENTO D'INERZIA (baricentrico della singola riga) [mm ⁴]	METÀ LATO QUADRATINO [mm]	DISTANZA; tra asse medio quadratino e asse cella	Kt
FISSA 300	1,3034	0,32585	0,570832725	0,008848185	6,517	0,176963704	0,285416363	0,464583637	1,9
FISSA 500	1,0962	0,27405	0,523497851	0,006258617	5,481	0,125172338	0,261748925	0,488251075	1,6
FISSA 750	0,7602	0,19005	0,435947245	0,003009917	3,801	0,060198338	0,217973622	0,532026378	1,5
FISSA 1000	0,35	0,0875	0,295803989	0,000638021	1,75	0,012760417	0,147901995	0,602098005	1,5

MOMENTI D'INERZIA DI OGNI RIGA RISPETTO ALL'ASSE Z'-Z'							
TIPOLOGIA PROVINI	RIGA 1	RIGA 2	RIGA 3	RIGA 4	RIGA 5	RIGA 6	RIGA 7
FISSA 300	160,8020538	106,3036056	78,40272906	42,07043027	25,32990436	7,163754969	1,583579665
FISSA 500	136,5069703	88,3370958	66,8174079	34,70415822	21,79234548	5,735720641	1,431783059
FISSA 750	96,3064196	59,90623889	47,47847281	23,21168567	15,75502603	3,621632457	1,136079243
FISSA 1000	45,56771752	26,60163035	22,71920299	10,07514487	7,745688459	1,423659402	0,647173931

RISULTATI				
TIPOLOGIA PROVINI	$I_{TOTALE\ z'-z'}$ [mm ⁴]	$W_{f y^*}$ [mm ³]	σ_{reale} [MPa]	ϵ_x
FISSA 300	843,3121153	160,6308791	241,8657724	0,001151742
FISSA 500	710,6509628	135,3620882	161,708055	0,000770038
FISSA 750	494,8311094	94,25354465	248,1209788	0,001181528
FISSA 1000	229,560435	43,72579715	310,8231499	0,00148011

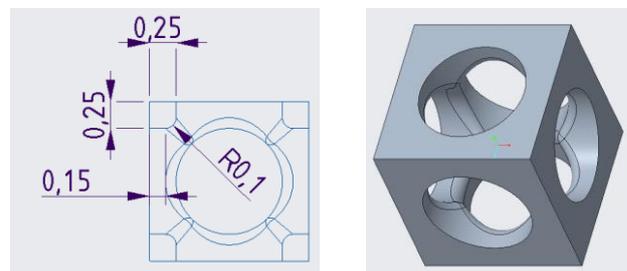
Per questo elaborato finale si è deciso di riportare a titolo esplicativo, il procedimento seguito per il calcolo della deformazione in direzione X della fibra superiore della sezione trasversale di mezzeria, del primo provino (di 2) con fori da 1000µm testato.

Dati di partenza:

-Dimensioni del provino: 40,5 x 10,5 x 15 mm

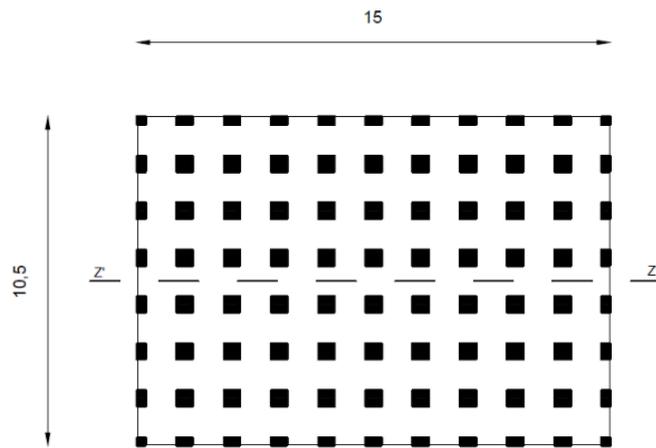
-Dimensioni cella elementare sezionata:

$$A_{sez-ideale} = (0,25 * 0,25) * 4 = 0,25 \text{ mm}^2$$



-Calcolo di deformazione effettuato nella sezione di mezzeria a carico (letto dalla cella di carico) pari a 447,44N.

-Disegno della sezione resistente (ottenuta sezionando con piano trasversale alla superficie oggetto di studio):



Calcoli analitici :

Inanzitutto è stato calcolato il momento d'inerzia del singolo quadratino (della sezione resistente) rispetto al proprio asse baricentrico orizzontale.

$$I_{G-G} = \frac{bh^3}{12} ;$$

dove $b=h=0,25\text{mm}$, tuttavia $0,25\text{mm}$ è una misura nominale proveniente dalla quotazione al CAD, per far sì che vengano valori di deformazione paragonabili a quelli ottenuti con l'analisi DIC è necessario porci in condizioni reali non nominali. Attraverso il microscopio elettronico a scansione (SEM) è stato rilevato che per quanto riguarda la dimensione della struttura portante del reticolo la variazione media rispetto al progetto originale oscilla tra il 30 e il 40 %, sempre in positivo rispetto al riferimento, pertanto l'area della sezione della cella elementare è stata moltiplicata per un fattore moltiplicativo pari a 1,4. Quindi si ottiene che il lato del quadrato aumenta:

$$A_{sez-reale} = (0,25*0,25) *4*1,4 = 0,35\text{mm}^2$$

$$b=h=\sqrt{(A_{sez-reale})/4} = 0,2958$$

$$I_{G-G} = \frac{bh^3}{12} = 6,38 \times 10^{-4}$$

Dopodiché si è proceduti al calcolo del momento d'inerzia dell'intera riga di quadrati rispetto all'asse baricentrico della sezione (asse $Z'-Z'$ rappresentato nell'immagine sovrastante); per fare questo calcolo è stato sfruttato il teorema di Huygens-Steiner il cui enunciato afferma che: “Il

momento d'inerzia rispetto ad un asse a , parallelo ad un altro c passante per il centro di massa, si ottiene sommando al momento di inerzia iniziale rispetto a c il prodotto tra la massa del corpo stesso e il quadrato della distanza tra gli assi c ed a ; $I_z = I_{CM} + Md^2$ ". Ovviamente nel nostro caso il calcolo del momento d'inerzia è stato fatto proporzionalmente alle aree non alle masse e in riferimento ad assi baricentrici.

$$I_{RIGA} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2)$$

Siccome in ogni "riga" della sezione resistente ci sono 20 quadrati (10 celle elementari adiacenti), allora l'area totale di una fila di quadrati vale:

$$A_{RIGA} = (b*h)*20 = (0,2958^2)*20 = 1,75\text{mm}^2$$

Invece il termine (d^2) rappresenta il quadrato della distanza tra l'asse baricentrico della riga di quadratini e l'asse $Z'-Z'$ al quale vogliamo riferire il momento d'inerzia complessivo, perciò questo termine sarà l'unico che varierà poiché il momento d'inerzia (I_{G-G}) e l'area della "riga" (A_{RIGA}) restano invariati. A questo punto utilizzeremo tale formula per il calcolo dei momenti d'inerzia di tutte 7 le "righe" di quadrati, poi li sommeremo tra loro ed infine siccome la sezione del provino è speculare rispetto a $Z'-Z'$, moltiplicheremo per 2 ottenendo il momento d'inerzia cercato.

$$I_{RIGA1} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2) = (6,38 \times 10^{-4} * 20) + 1,75 * (0,6021 + 0,75 + 1,5 + 1,5 + 0,75)^2 = 45,568\text{mm}^4$$

$$I_{RIGA2} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2) = (6,38 \times 10^{-4} * 20) + 1,75 * (0,1479 + 1,5 + 1,5 + 0,75)^2 = 26,602\text{mm}^4$$

$$I_{RIGA3} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2) = (6,38 \times 10^{-4} * 20) + 1,75 * (0,6021 + 0,75 + 1,5 + 0,75)^2 = 22,719\text{mm}^4$$

$$I_{RIGA4} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2) = (6,38 \times 10^{-4} * 20) + 1,75 * (0,1479 + 1,5 + 0,75)^2 = 10,075\text{mm}^4$$

$$I_{RIGA5} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2) = (6,38 \times 10^{-4} * 20) + 1,75 * (0,6021 + 0,75 + 0,75)^2 = 7,746\text{mm}^4$$

$$I_{RIGA6} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2) = (6,38 \times 10^{-4} * 20) + 1,75 * (0,1479 + 0,75)^2 = 1,424\text{mm}^4$$

$$I_{RIGA7} = (I_{G-G} * 20) + (A_{RIGA} * d^2) = (6,38 \times 10^{-4} * 20) + 1,75 * (0,6021)^2 = 0,647\text{mm}^4$$

$$I_{\text{metà superiore}} = \sum_{i=1}^7 I_{RIGA_i} = 114,781 \text{mm}^4;$$

quindi risulta che il momento d'inerzia totale della sezione rispetto all'asse Z'-Z' vale:

$$I_{Z'-Z' \text{ TOTALE}} = I_{\text{metà superiore}} * 2 = 229,562 \text{ mm}^4$$

Ora che è stato trovato il momento d'inerzia possiamo determinare il valore del modulo di resistenza a flessione ristretto ad un punto della sezione distante " y* " dall'asse neutro, dove y*= 5,25mm così da trovarci, in seguito, la deformazione sulla fibra superiore.

$$W_{f|y^*} = \frac{I_{Z'-Z' \text{ TOTALE}}}{y^*} = 229,562/5,25 = 43,726 \text{ mm}^3$$

Successivamente si è determinata la tensione nominale (σ_{nominale}) data dal rapporto tra il momento flettente (Forza*braccio) nel punto considerato e il modulo di resistenza flessionale appena calcolato; ne risulta:

$$\sigma_{\text{nominale}|y^*} = \frac{Mf(x)}{W_{f|y^*}} = (447,44*20,25)/43,726 = 207,214 \text{ Mpa}$$

Una volta trovata la tensione nominale essa è stata moltiplicata per il coefficiente di concentrazione delle tensioni (Kt) in modo tale che si tenga conto degli effetti di bordo foro, ovvero di quegli aumenti di tensione che si verificano nei punti in prossimità delle cavità che contraddistinguono la geometria del provino.

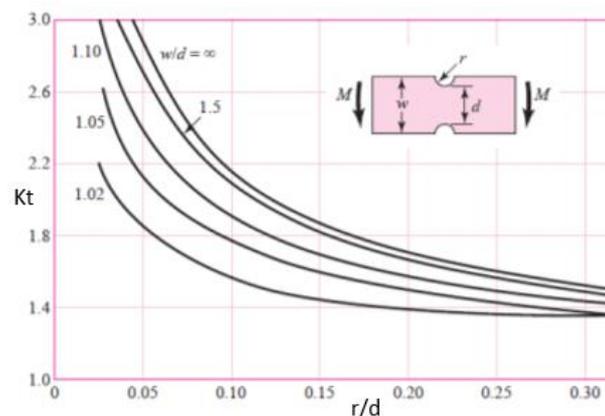


Figura 30: diagramma per la determinazione di Kt

Tale risultato è estremamente simile al risultato numerico ottenuto mediante analisi DIC (vedi figura 30) pertanto si può concludere che i test sperimentali a flessione di strutture lattice possono essere correttamente analizzati attraverso correlazione d'immagini. In particolare, notiamo dalla matrice numerica (seconda immagine della figura 31) che nel punto analizzato ci scostiamo dal risultato teorico di soli $0,14\mu\epsilon$; il valore che più si avvicina a quello teorico si trova a meno di 1,5mm di distanza ed è evidenziato all'interno del rettangolo rosso. La DIC quindi si rivela non solo un metodo estremamente rapido per la determinazione (punto a punto) di spostamenti e deformazioni ma anche uno strumento affidabile proprio per il fatto che i risultati sono compatibili con quelli teorici derivanti da calcoli analitici.

6. Conclusioni e sviluppi futuri

A conclusione dell'elaborato finale si può affermare che l'obiettivo prefissato, di caratterizzazione a flessione di questi particolari provini stampati con tecnologia SLM, è stato raggiunto; in aggiunta si può altresì constatare che l'analisi dello stato tensionale a flessione di strutture lattice, mediante correlazione di immagini, fornisce risultati attendibili (come dimostrato analiticamente) e di rapido ottenimento, grazie all'impiego del software open source di MATLAB, Ncorr.

Inoltre, un fondamentale vantaggio derivante dalla DIC riguarda principalmente la non globalità delle deformazioni ricavate. Infatti, i valori delle deformazioni che vengono fornite in output sono valori puntuali che permettono di verificare e trovare le differenze delle deformazioni all'interno di uno stesso provino, cosa non effettuabile tramite i metodi di analisi sperimentale convenzionali. La Digital Image Correlation risulta quindi estremamente vantaggiosa per provini prodotti, come in questo caso, tramite additive manufacturing, e che presentano una geometria complessa non più caratterizzabile solamente da una prova di compressione o trazione.

I risultati ottenuti e le analisi effettuate hanno portato ad una caratterizzazione del comportamento a flessione delle strutture reticolari descritte nei paragrafi precedenti; ora questi dati potranno essere utilizzati come parametri diretti per eventuali simulazioni FEM di veri e propri componenti realizzati in Selective Laser Melting con tali geometrie.

In seguito a questi primi test sperimentali risulterà particolarmente interessante analizzare il comportamento di strutture lattice a rigidità variabile, che nel caso di stress flessionali saranno realizzate con layer a rigidità variabile, ovvero caratterizzati da elevata rigidità nelle fibre più esterne (poiché come si è potuto osservare esse sono soggette a elevate deformazioni dovute a sollecitazioni di trazione e compressione) e rigidità calante via via che ci si avvicina al centro del pezzo, cosicché si possa far fronte alle necessità di resistenza meccanica, leggerezza e al contempo si abbia un'ottima osteointegrazione della componente protesica.

I campi d'applicazione delle strutture lattice sono talmente vasti da rendere l'additive manufacturing la tecnologia chiave dell'ormai nota quarta rivoluzione industriale; i principali settori d'interesse per quanto riguarda le strutture reticolari in leghe metalliche sono quello aeronautico, meccanico e biomedicale.

In particolare, gli sviluppi futuri previsti per le strutture lattice studiate, riguardano la realizzazione di impianti protesici per ginocchio e caviglia (vedi figura 32)

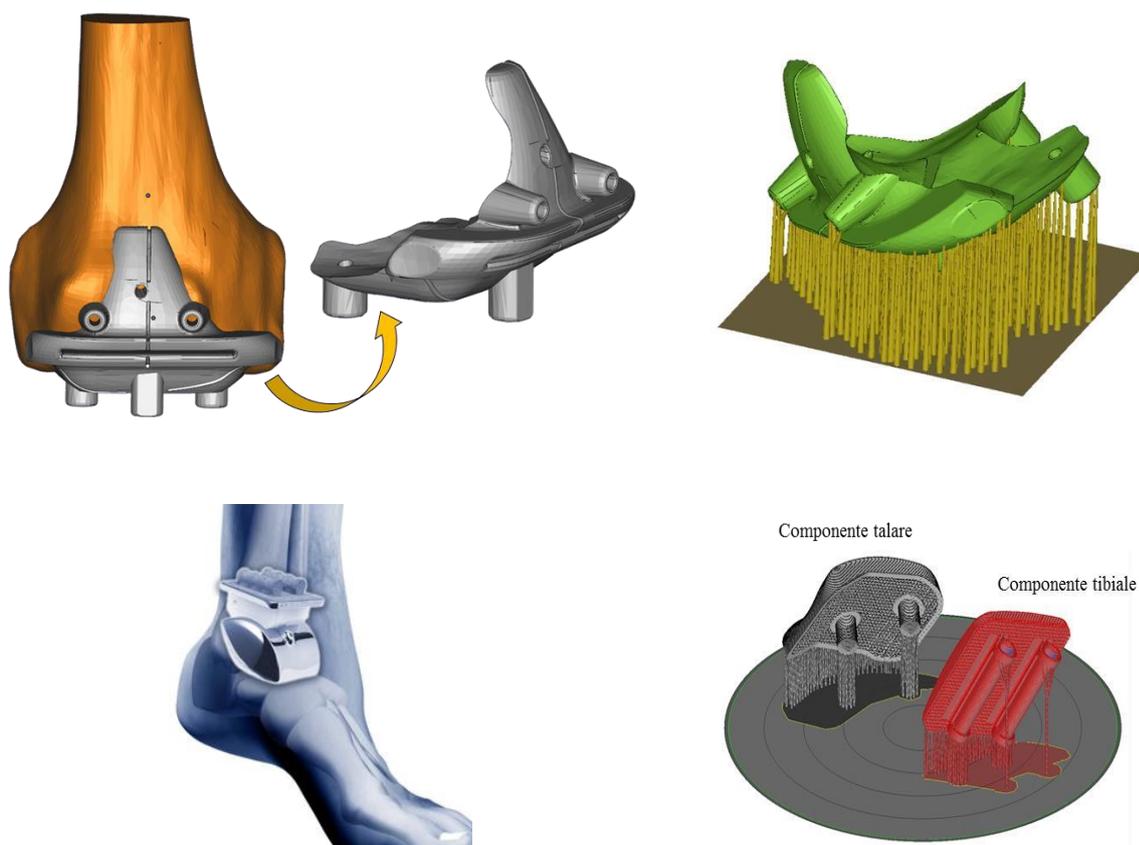


Figura 32: Rappresentazioni di protesi al ginocchio, alla caviglia e relativi orientamenti e supporti per la realizzazione dei componenti tramite Selective Laser Melting.

La complessa geometria e il materiale impiegati nella realizzazione delle protesi, forniranno numerosi vantaggi rispetto agli impianti protesici attualmente in uso; i principali vantaggi sono:

- La possibilità di avere osteointegrazione della componente protesica: il deterioramento delle protesi, è spesso causato da fratture che si generano all'interfaccia tra impianto e tessuto osseo, perciò un fattore molto importante da considerare nella progettazione di protesi è quello di ottimizzare la superficie di contatto.

Per risolvere questo problema e migliorare la stabilità per anni si è ricorso alla cementazione e solo più recentemente si è passati all'utilizzo di impianti protesici che prevedono all'interfaccia osso-protesi delle superfici porose e/o ad elevata rugosità per favorire l'osteointegrazione. Tramite l'utilizzo di queste protesi di nuova generazione, si ridurranno i problemi relativi all'aderenza tra la protesi e i tessuti, che spesso erano causa di fallimenti dell'impianto e quindi di interventi di riprotesizzazione.

- Si riduce il problema dello stress shielding. Un grave problema che affligge i tradizionali impianti protesici in lega di titanio è proprio lo stress shielding, ovvero il fenomeno di deterioramento delle proprietà meccaniche del tessuto osseo per via del completo assorbimento dei carichi da parte della protesi. Quindi si rivela necessaria una protesi avente caratteristiche meccaniche il più possibile simili a quelle della struttura ossea che altrimenti col passare degli anni tenderà a degradarsi e a perdere di rigidità. Ciò sarà consentito dalle future protesi realizzate con strutture lattice, infatti, una volta attuata un'analisi di quali siano le zone maggiormente sollecitate, verrà realizzato il componente a geometria variabile, caratterizzato da piccole cavità (quindi elevata rigidità) laddove i carichi saranno molto intensi e cavità di maggiori dimensioni nelle sezioni soggette a lievi sollecitazioni.

7. Ringraziamenti

L'elaborato finale presentato è frutto e conclusione di un percorso di studi universitario fatto con grande impegno, motivazione ed entusiasmo; le difficoltà incontrate (non solo di carattere scolastico) in questi tre anni sono state molteplici e dure da affrontare, ma mantenendo la lucidità e col supporto delle molte persone a me care ho raggiunto uno dei miei più grandi sogni, la laurea in Ingegneria Meccanica. Il primo ringraziamento è dedicato a mia sorella e ai miei genitori, amorevoli persone a cui erroneamente non riesco mai a dire grazie ma che mi sono state d'esempio per affrontare questo percorso universitario e che mi hanno aiutato mostrandomi sostegno e supporto nei momenti di maggiore bisogno. Un ulteriore grazie va al mio gruppo di amici, quei matti dei Barzotti, che semplicemente con la loro presenza ed euforia sono sempre in grado di rendermi spensierato e leggero.

Infine, ma non per importanza, un enorme ringraziamento ad Erica Liverani e Paolo Proli i miei correlatori; persone valide, molto competenti che mi hanno fatto appassionare ancor di più al mondo della Tecnologia Meccanica, sono stati estremamente disponibili, gentili e sempre pronti a darmi una mano nel risolvere i continui problemi insorti, mi auguro di poterli rincontrare nel percorso magistrale.

Pertanto, grazie a tutti voi per avermi regalato emozioni bellissime, emozioni che non ho mai provato prima.

...dobbiamo essere grati alle persone che ci rendono felici. Sono i premurosi giardinieri che fanno fiorire la nostra anima. (Marcel Proust)

8. Bibliografia

- www.scopus.com
- www.justprint3d.it/stampa-3d/tecnologie/slm
- www.sciencedirect.com
- Tesi di dottorato a cura di Liverani Erica
- www.sisma.com
- ncorr.com
- https://it.wikipedia.org/wiki/Acciai_legati#Acciai_al_cromo-molibdeno
- Additive Manufacturing - Sviluppi in formazione e istruzione. Editore Springer International Publishing
- <https://www.youtube.com/watch?v=te9OaSZ0kf8> – DMGMORI.com