

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

**Studio della correlazione tra difetti della stampa 3D e proprietà meccaniche di provini
in ABS attraverso analisi tomografiche**

Relatore

Prof. Luca Iuliano

Co-relatore

Prof. Paolo Minetola

Candidato

Serena Rifuggiato

Anno Accademico 2020/2021

*Ai miei genitori, mia sorella e Leonardo,
che in questi anni mi sono stati accanto
sostenendomi e incoraggiandomi sempre.*

ABSTRACT

Negli ultimi anni, la diffusione delle stampanti 3D a filamento sia per uso industriale che personale ha avuto una rapida crescita in numerosi ambiti applicativi grazie alla diminuzione dei costi di macchine e materiali. Per questo motivo, diventa oggi fondamentale assicurare e certificare la qualità dei componenti prodotti con tale tecnologia. Tuttavia, la deposizione di filamenti termoplastici per strati successivi può introdurre difetti di stampa, come pori o vuoti, nella struttura interna di un componente stampato 3D.

Obiettivo di questa tesi è la ricerca di una correlazione tra i difetti presenti in un componente stampato 3D e la sua resistenza a trazione. L'attività sperimentale è volta a comprendere quale tipologia e dimensione di difetto rappresentino una causa di peggioramento delle proprietà meccaniche.

Lo studio è stato svolto su provini di trazione stampati in ABS (Acrilonitrile Butadiene Stirene) con percentuali e strategie di riempimento differenti, in modo da considerare l'influenza dei parametri di processo sulle caratteristiche finali del materiale. Prima della prova di trazione, i provini sono stati sottoposti a collaudo non distruttivo mediante tomografia computerizzata per identificare i difetti interni risultanti dalla stampa 3D. I dati e le statistiche relativi alla difettosità interna di ognuno dei campioni sono stati correlati ai risultati delle prove di trazione, monitorate attraverso una telecamera digitale per analisi DIC (Digital Image Correlation). L'attività sperimentale ha consentito di ricercare una corrispondenza tra porosità e difetti interni al materiale e resistenza meccanica.

ABSTRACT

In the most recent years, 3D printing popularity for both industrial and consumer use achieved great development in many different applications thanks to cost reduction of printers and materials. For this reason, the research for quality assurance of finished parts is becoming more and more important. However, the layer by layer polymeric filament deposition introduces defects such as pores and voids which are typical of the internal structure of pieces realized with this technique.

This thesis aims to research a correlation between defects of a 3D printed part and its tensile strength. The experimental activity is conducted to understand which kind and characteristic dimension of defect worsen the mechanical properties of the final product the most.

This study was performed on ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) tensile testing specimens that were 3D printed with different infill percentages and strategies to understand the effects of the process parameters on the material characteristics. Before the tensile test performance, specimens were analyzed by a nondestructive dimensional inspection test through computed tomography to identify the internal defects originated by the 3D printing process. Internal defect data and statistics of every specimen were correlated to the results of the tensile tests observed through a digital camera for DIC analysis (Digital Image Correlation). The experimental activity allowed to search a correspondence between porosity and internal defects and mechanical strength.

INDICE

Introduzione.....	1
Capitolo 1: Principi di funzionamento	2
1.1 La tomografia computerizzata come metodo di analisi di componenti realizzati con tecnica FDM	2
1.2 Tomografia Computerizzata	6
1.2.1 Hardware	10
1.2.1.1 Sorgente di raggi X.....	10
1.2.1.2 Tipologie di detector	13
1.2.1.3 Sistema cinematico della piattaforma.....	14
1.2.2 Software.....	14
1.2.2.1 Ricostruzione volumetrica 3D.....	14
1.2.2.2 Segmentazione o determinazione della superficie.....	18
1.2.2.3 Alcuni possibili effetti indesiderati	20
1.3 Fused Deposition Modeling.....	22
1.3.1 Ciclo di produzione	22
1.3.2 Meccanimo e caratteristiche del processo	23
1.3.3 Materiali e Applicazioni	26
1.3.4 Vantaggi e limiti.....	27
1.4 Caratterizzazione meccanica	28
1.4.1 Prova di Trazione	28
1.4.2 Curva di elasticità del materiale	30
1.4.3 Il provino	31
1.4.4 DIC (Digital Image Correlation).....	33
Capitolo 2: Strumentazione per l'indagine sperimentale.....	35
2.1 Caratteristiche e specifiche tecniche della strumentazione tomografica	35
2.1.1 Hardware: v tome x S	35
2.1.2 Software.....	38
2.1.2.1 Phoenix datos x.....	38
2.1.2.2 Volume Graphics VG Studio Max 3.4	42
2.2 Attrezzatura per la stampa 3D dei provini di trazione.....	46
2.2.1 Hardware	46
2.2.1.1 3ntr A4v3.....	46
2.2.1.2 Filamento di ABS.....	48
2.2.2 Software.....	49

2.2.2.1 KISSlicer PRO	49
2.2.2.2 Repetier Host.....	51
2.3 Strumenti per la caratterizzazione meccanica.....	53
2.3.1 Macchina di misura per prove di trazione	53
2.3.2 Strumentazione DIC (Digital Image Correlation)	54
2.3.2.1 Telecamera	55
2.3.2.2 Software DIC: GOM Correlate	55
Capitolo 3: Metodologia d’indagine	57
3.1 Produzione dei provini.....	57
3.2 Acquisizione dei dati tomografici.....	61
3.3 Analisi di porosità.....	66
3.4 Prove di trazione con monitoraggio DIC.....	70
3.5 Correlazione tra difetti della stampa 3D e risultati di trazione.....	79
Capitolo 4: Analisi dei risultati sperimentali.....	82
4.1 Risultati ottenuti dall’analisi di porosità.....	82
4.1.1 Volumi dei difetti	82
4.1.2 Percentuali di porosità	84
4.2 Correlazione tra proprietà meccaniche e caratteristiche di difettosità.....	86
4.3 Correlazione tra difetti e punti sul provino maggiormente sollecitati	90
Conclusioni.....	100
Bibliografia e sitografia	102

INTRODUZIONE

La stampa 3D a filamento è una delle tecniche più diffuse nell'ambito della Fabbricazione Additiva poiché caratterizzata da numerosi pregi, tra cui la possibilità di realizzare modelli geometricamente complessi in poco tempo, la flessibilità legata ad un'ampia varietà di materiali polimerici tra cui poter scegliere, e i costi che sono nettamente inferiori rispetto a quelli richiesti dai metodi di produzione tradizionali. Il tipo di processo in sé, però, provoca la formazione di difetti all'interno del componente realizzato con questa tecnica che possono comprometterne il corretto funzionamento. L'obiettivo di questo studio consiste nel ricercare una correlazione tra i difetti generati internamente al filamento depositato durante la stratificazione e la capacità di resistenza a trazione di provini realizzati con tale tecnica. In base ai parametri di processo scelti per realizzarli, si ottengono distribuzioni, volumi e percentuali di porosità differenti che possono avere un maggiore o minore impatto sulle proprietà meccaniche. Per svolgere uno studio di questo tipo è stato fondamentale eseguire una prima fase di indagine non distruttiva che precedesse la fase successiva di trazione dei provini per rilevarne la resistenza. Per questo motivo si è reso necessario l'utilizzo di strumenti e software basati sulla tomografia computerizzata che consente ispezioni interne ad alta risoluzione fornendo informazioni sulla densità e composizione del materiale.

La tesi è stata suddivisa in quattro capitoli principali. Il capitolo 1 introduce gli aspetti teorici alla base degli strumenti utilizzati durante le varie fasi dello studio: il principio di funzionamento della tomografia computerizzata e le ragioni per cui, fra i vari metodi di indagine, è la più efficace e versatile per componenti AM; la descrizione del processo di stampa 3D con i vantaggi e gli svantaggi che lo caratterizzano; lo studio delle proprietà meccaniche e il funzionamento della tecnologia DIC per il monitoraggio delle deformazioni durante la prova di trazione. Nel capitolo 2 sono stati descritti le macchine e i software attraverso i quali si sono stampati i provini, sono state acquisite le scansioni tomografiche utili alla ricostruzione del modello volumetrico, con cui sono state effettuate analisi interne per rilevarne la porosità, e infine tramite i quali sono state eseguite le prove di trazione. Nel capitolo 3 è stata mostrata la procedura dettagliata di ogni fase con cui è stato eseguito il lavoro di tesi e le scelte effettuate nell'utilizzo della strumentazione. Infine, nel capitolo 4 sono stati esposti i risultati ottenuti dalle analisi di porosità e dalle prove di trazione.

CAPITOLO 1: PRINCIPI DI FUNZIONAMENTO

1.1 La tomografia computerizzata come metodo di analisi di componenti realizzati con tecnica FDM

Negli ultimi anni, la Fabbricazione Additiva si è diffusa in maniera considerevole al livello industriale in molti campi, tra cui l'automotive, l'aerospaziale e il biomedicale. Nata col nome di "Prototipazione Rapida", è una tecnologia che consente di realizzare un oggetto aggiungendo materiale strato dopo strato sulla base di un disegno CAD 3D inserito nel software della macchina di costruzione. Si tratta di un'innovazione nel campo della fabbricazione in quanto permette di creare componenti dalla geometria altamente complessa che sarebbero irrealizzabili sfruttando le tecniche tradizionali. Oggigiorno, l'Additive Manufacturing non è più unicamente dedicata ad applicazioni nel campo della prototipazione ma gode di un grande sviluppo sul piano della produzione di componenti funzionali realizzati utilizzando varie tipologie di materiali (metalli, polimeri e ceramiche) e tecniche diverse in base all'applicazione specifica.



Figura 1. Differenza fondamentale tra Fabbricazione "Sottrattiva" e "Additiva"

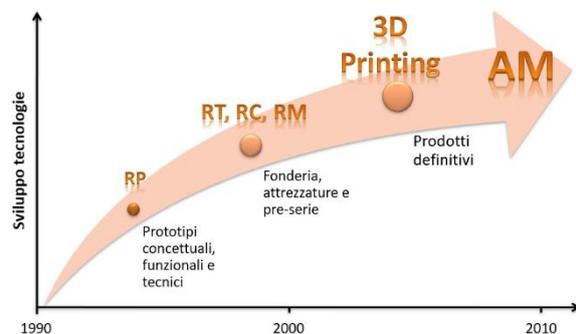


Figura 2. Evoluzione dell'FA

In particolar modo per quel che riguarda i polimeri, una delle tecniche oggi più diffuse è la Fused Filament Fabrication (FFF) meglio conosciuta come Fused Deposition Modeling (FDM). Il processo di fabbricazione consiste nella deposizione selettiva di materiale su una piattaforma collegata ad un sistema di sollevamento e abbassamento. Il componente viene costruito strato dopo strato, dal basso verso l'alto, riscaldando ed estrudendo un filamento di materiale polimerico attraverso uno o più ugelli.



Figura 3. Esempi di oggetti comuni realizzati con tecnica FDM

Depositato il materiale, questo si raffredda ma l'energia termica residua deve essere tale da garantire la giunzione di uno strato con quello sottostante. Infatti, se l'energia fosse insufficiente a causa di uno scorretto settaggio di temperatura all'interno della camera dell'ugello, potrebbe crearsi una superficie d'interfaccia. Ciò potrebbe causare fenomeni di delaminazione delle superfici.

Inoltre, il passaggio di stato da liquido a solido comporta la contrazione del materiale appena deposto a cui si oppone lo strato sottostante precedentemente estruso provocando uno stato tensionale che compromette la corretta realizzazione del pezzo. Per ovviare al problema, oltre al monitoraggio e controllo della temperatura della camera di riscaldamento e della piattaforma, si possono attuare specifiche strategie di deposizione delle sezioni caratterizzando la geometria di riempimento e creando così una struttura a reticolo. [1,2]

I pezzi realizzati con metodo FDM, quindi, non hanno una densità del 100%. Al contrario, tra gli strati e tra la parte interna di uno strato (infill) e il suo contorno, si creano “vuoti” -piccoli canali creati da quattro tracce allineate deposte strato dopo strato- e pori la cui forma, dimensione e distribuzione nello spazio è stato dimostrato dipendere fortemente dai parametri di processo stabiliti prima di avviare il job. I vuoti riducono le sezioni, aumentano la concentrazione di stress e causano interdiffusioni incomplete tra le catene polimeriche provocando nel complesso una riduzione delle proprietà meccaniche nelle applicazioni di carichi trasversali alla direzione di estrusione [3].

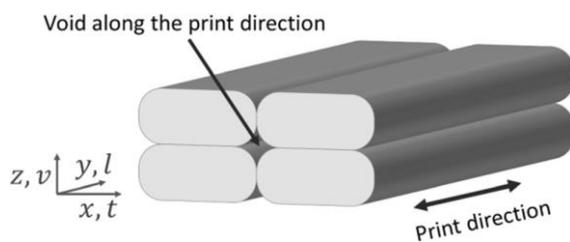


Figura 5. Esempio di vuoto originato dall'estrusione di 4 filamenti

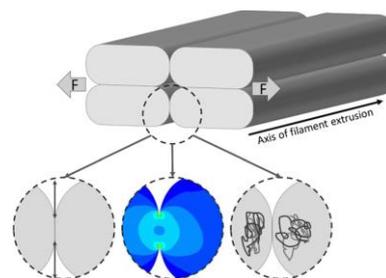


Figura 4. Conseguenze della presenza di un vuoto su un componente sottoposto a carico trasversale

Naturalmente, questi potrebbero essere eliminati aumentando il flusso di filamento in uscita dall'ugello ma ciò comporterebbe una scarsa qualità superficiale a causa dell'eccesso di materiale che l'ugello stesso trascinerrebbe estrudendolo [4]. Nonostante la ripetitività di questa struttura dovuta alla stratificazione e al tipo di strategia applicata, la forma e la dimensione dei vuoti cambiano poiché influenzate dai parametri di processo.

In aggiunta, tra i vuoti vi sono pori, bolle d'aria la cui posizione, forma e dimensione, a differenza dei primi, non è prevedibile e può compromettere l'integrità strutturale del componente [5]. Alcuni studi, utilizzando l'approccio DOE (Design of Experiments), hanno dimostrato che parametri di processo come l'orientamento di costruzione, la larghezza del raster, il numero di strati, la strategia di riempimento e l'hatch distance abbiano una forte influenza sulla porosità e come i campioni con minor presenza di pori avessero migliori proprietà meccaniche. [6]

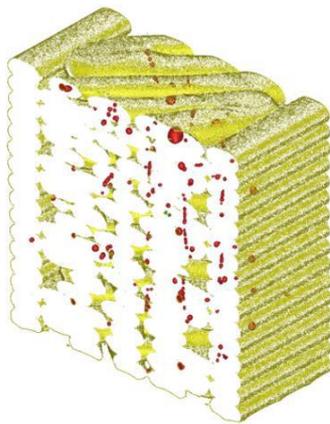


Figura 7. Porosità interna ad un componente realizzato in FDM

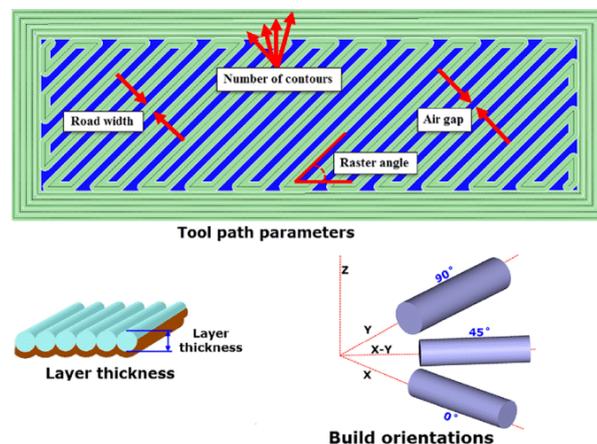


Figura 6. Parametri di processo che influenzano le proprietà meccaniche del componente

In conclusione, il processo di fabbricazione descritto è di tipo termico, aspetto che comporta eterogeneità al livello micro e mesoscopico. In particolare, la porosità del materiale influenza la struttura interna dando origine, di conseguenza, ad un potenziale peggioramento delle proprietà meccaniche del componente [7].

Si può allora affermare che, con il crescente sviluppo delle tecniche AM e la necessità di assicurare qualità ed efficienza dei componenti prodotti, comprendere quale sia la correlazione tra le proprietà meccaniche di un componente e la presenza di vuoti e porosità all'interno della sua struttura sta diventando oggetto di grande interesse e un obiettivo ricercato sia in campo accademico che industriale. Infatti, la caratterizzazione e localizzazione di questi difetti permetterebbe di modificare e migliorare il processo di fabbricazione in quanto essi sono indotti da un preciso settaggio dei parametri di lavorazione.

Uno studio di questo tipo può essere intrapreso ispezionando internamente il pezzo in esame su scala microscopica. Tuttavia, è necessario scegliere il metodo di ispezione che meglio si adatta alle caratteristiche di un prodotto AM e alle esigenze dettate dal tipo di analisi che si vuole intraprendere.

Ad esempio, una semplice analisi micrografica svolta attraverso l'utilizzo di un microscopio SEM o un microscopio confocale ha come limite principale l'impossibilità di ispezionare zone interne al componente potendo visualizzare solo gli strati superficiali. L'alternativa consiste nel sezionarlo sacrificandolo ma anche in questo caso continuerebbe a presentarsi il problema della bidimensionalità delle informazioni che si possono trarre dalla sezione esaminata [5, 8]. Un altro aspetto importante da attenzionare per scegliere il metodo più adatto all'ispezione di una struttura interna riguarda la complessità geometrica tipica dei componenti realizzati con tecnica additiva che rende difficile l'utilizzo di tecniche di misura convenzionali. Una fra queste è la Macchina di Misura a Coordinate (CMM) che, nonostante la precisione che la caratterizza, non è adatta al collaudo e validazione di superfici nascoste o difficili da raggiungere e le cui ispezioni richiederebbero una grande quantità di tempo [9].

Per queste ragioni è necessario in questo caso prendere in considerazione tecniche di collaudo che non danneggino il pezzo ma che allo stesso tempo siano efficaci ed accurate. Noti con l'acronimo NDT (Non Destructive Testing), i controlli non distruttivi sono metodi di misura largamente utilizzati su pezzi prodotti con tecniche convenzionali ma che è possibile applicare a componenti realizzati mediante fabbricazione additiva tenendo però in considerazione degli aspetti tipici dei risultati ottenibili da questa tecnologia di costruzione: geometria complessa, rugosità delle superfici e mancanza di informazioni per quel che riguarda il legame tra tolleranze dei difetti di un pezzo sotto carico e la sua microstruttura. Ad esempio, degli studi mostrano l'inadeguatezza di alcuni metodi NDT come la tecnica ad ultrasuoni, il Penetrant Testing (PT) e l'Eddy Current Testing (ECT). Infatti, a causa dell'elevata rugosità delle superfici, della porosità interna e dei sottosquadri, i metodi che richiedono il contatto con la superficie del pezzo da collaudare non possono essere utilizzati senza prima preparare la superficie stessa con lavorazioni di finitura come la lucidatura [4, 10].

Tra le tecniche NDT, quindi, la più efficace e versatile per componenti AM è la tomografia computerizzata ai raggi X (CT-scan). Si tratta di una tecnica che permette di visualizzare e analizzare al computer la geometria complessa esterna ed interna di un componente sottoposto a raggi X. Le caratteristiche della tomografia computerizzata si prestano perfettamente ad un'indagine sulle porosità e inclusioni interne ad un componente realizzato con tecnica FDM. A differenza di altre tecniche non distruttive avanzate di scansione ottica tridimensionale, come la luce strutturata e il laser, la tomografia è più costosa e più lenta ma consente un'ispezione ad alta risoluzione dell'interno del pezzo senza doverlo sezionare e sacrificare [11]. In molti studi la microtomografia computerizzata viene utilizzata sia per la possibilità di avere accesso alla microstruttura del componente con una buona risoluzione sia per l'utilizzo da parte dei software di analisi dei dati tomografici di efficienti algoritmi con cui ispezionare difetti e porosità così da distinguerne forma, dimensione e distribuzione nello spazio [4].

1.2 Tomografia Computerizzata

La tomografia computerizzata è una tecnologia non distruttiva di tipo ottico che, basandosi sull'emissione di raggi X, permette la realizzazione del modello 3D dell'oggetto in esame e quindi l'analisi della porosità e dei difetti al suo interno. Il pezzo viene scansionato così da rendere possibile la visualizzazione della geometria interna ed esterna dello stesso ricavando anche informazioni sulla densità e composizione del materiale con cui è stato realizzato. Questa tecnica è insensibile alla riflettività delle superfici o al tipo di materiale se non a quelli isolanti come il piombo.

Rispetto alla tomografia convenzionale impiegata in ambito medico, la TAC industriale risulta meno affidabile a causa della complessità degli algoritmi utilizzati per la ricostruzione del pezzo a partire dalle viste bidimensionali dello stesso correggendo eventuali distorsioni. Inoltre, la quantità di radiazione emessa nel campo della tomografia industriale è decisamente maggiore. La macchina lavora in automatico e richiede tempi brevi per il set up ma lunghi per quel che riguarda l'acquisizione delle immagini. [12]

Un sistema di tomografia computerizzata industriale è costituito da una sorgente di raggi x, una piattaforma rotante con sistema cinematico e un sensore (il detector), oltre alle unità di visualizzazione e calcolo per svolgere rispettivamente le funzioni di interfaccia e settaggio di scansione e quelle di analisi dei dati acquisiti. L'oggetto in esame, posto sulla piattaforma, ruotando di circa 360°, viene attraversato in corrispondenza di varie angolazioni da un fascio di radiazione che risulta totalmente o parzialmente respinto in base alla composizione e densità del materiale e quindi alla presenza di vuoti o inclusioni che ne ostruiscono o meno il passaggio. La geometria della parte è quindi ottenuta in base a come l'emissione d'onde a lunghezza corta e alta frequenza viene alterata dal materiale soggetto ad essa [13]. Se l'ampiezza del fascio di scansione è limitata, l'oggetto oltre ad essere ruotato dovrà anche essere traslato in verticale lungo l'asse. Dietro l'oggetto è posto il detector, un sensore che registra l'intensità della radiazione ricevuta e la trasforma in un'immagine a toni di grigio. Combinando le varie immagini attraverso un processo denominato "ricostruzione", si ottiene il modello matematico 3D dell'intera struttura in voxel (la versione tridimensionale di un pixel) dove il livello di grigio di un voxel è una misura dell'assorbività del materiale. [12, 14]

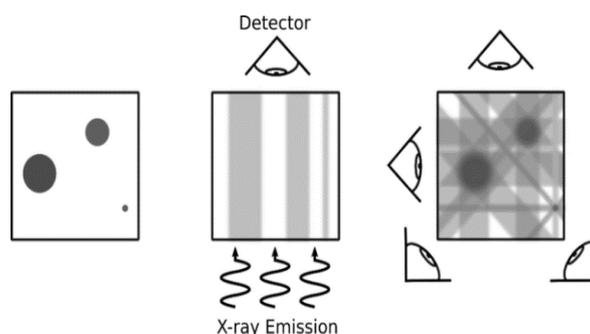


Figura 8. Schema di funzionamento del TC

I sistemi CT possono essere classificati in base alla loro configurazione e traiettoria di scansione, distinguendo i sistemi 2D (o “fan-beam systems”) da quelli 3D (o “cone-beam systems”) rappresentati in Fig. 9 [14].

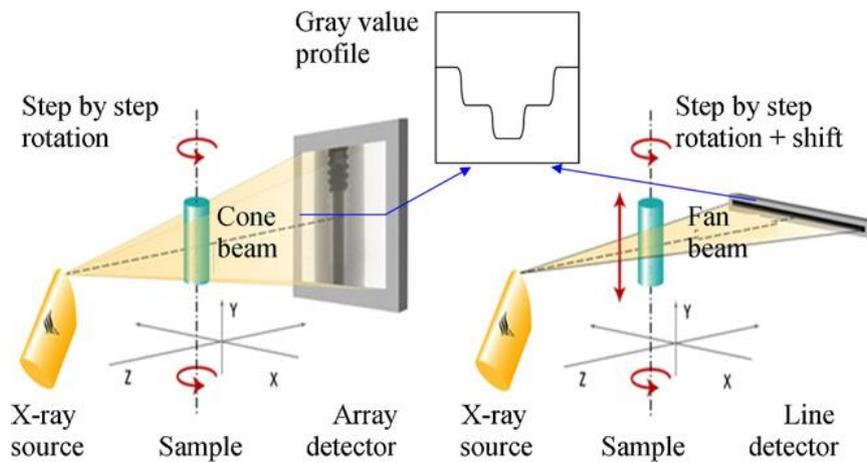


Figura 9. Configurazioni sistemi 2D e 3D

I sistemi 2D sono caratterizzati dall'utilizzo di un sottile fascio di raggi X e un detector costituito da un'unica riga di pixel. La nomenclatura è da riferirsi al fatto che l'oggetto viene scansionato sezione dopo sezione. Con questo tipo di configurazione, l'oggetto viene traslato lungo l'asse verticale della piattaforma su cui è posto fermandosi ad ogni coordinata predeterminata e ruotando di 360°, così da ottenere una proiezione 1D per ogni angolazione. Il modello 3D viene ricostruito attraverso le sezioni ottenute per ogni coordinata y unendo le proiezioni 1D acquisite alle varie angolazioni.

Nei sistemi 3D, invece, il fascio di raggi X utilizzato ha una forma conica e il detector è un pannello piatto costituito da numerose righe e colonne di pixel. Questo tipo di configurazione è il più diffuso nel campo della tomografia industriale e permette di ottenere il modello volumetrico acquisendo ad ogni angolazione proiezioni 2D senza il bisogno di traslare l'oggetto verticalmente a differenza del sistema precedentemente descritto, riducendo decisamente i tempi di scansione. Vi sono però anche svantaggi rispetto ai sistemi 2D come la maggior presenza del fenomeno dello scattering dei raggi X e dei “cone-beam artifacts” o “Feldkamp artifacts”, ovvero fattori di influenza sulle scansioni prodotte con traiettoria circolare dal fascio conico, che modificano la geometria stessa del fascio. Maggiori sono l'angolo del cono e la distanza tra l'oggetto in esame e il detector, maggiormente presenti saranno i cone-beam artifacts.

La dimensione dello spot di emissione dei raggi X della sorgente è un altro dei possibili criteri di classificazione dei tomografi. Essa è collegata alla qualità delle immagini e alla risoluzione spaziale che il sistema CT è in grado di fornire [14]. In base a ciò si distinguono i tomografi di tipo macrofocus, microfocus e nanofocus. Più la dimensione dello spot è piccola, maggiore è la risoluzione/nitidezza che si riesce a ottenere sul detector. Al contrario, uno spot di dimensione maggiore provoca l'aumento di zone in penombra e quindi una risoluzione peggiore.

In base allo spot selezionato, si ha un range diverso di massimo voltaggio utilizzabile come si può notare dal grafico contenente la classificazione di alcune macchine tomografiche (Fig. 10). Normalmente, infatti, occorre considerare che all'aumentare della potenza (kV) della radiazione emessa, il controllo del fascio di elettroni che fuoriesce dal tubo radiogeno peggiora e la radiazione è meno pulita, con un aumento della macchia focale o spot [12].

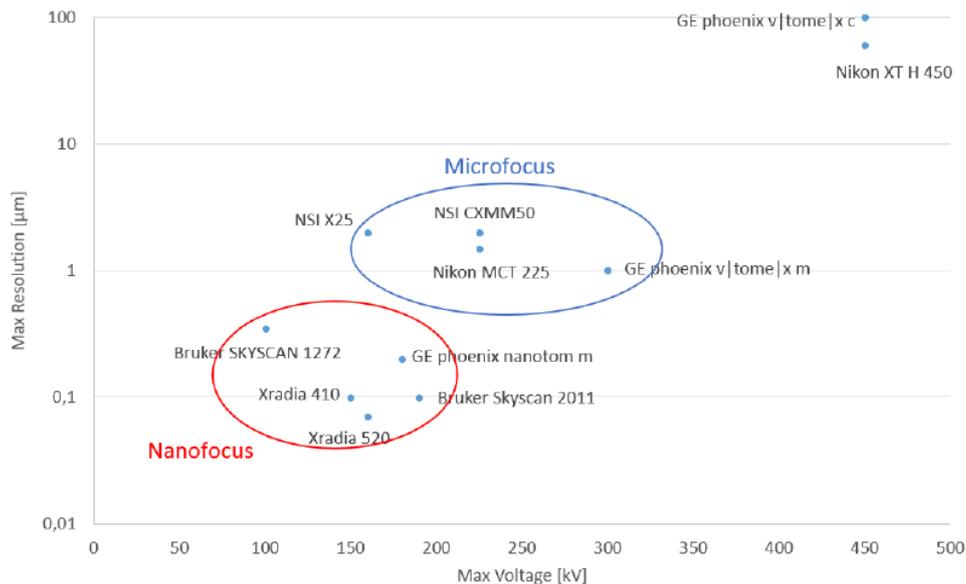


Figura 10. Esempi di tomografi macro-, micro- e nano-focus

Nell'applicazione che verrà successivamente presentata, l'obiettivo principale consiste nell'individuare la correlazione esistente tra le proprietà meccaniche del componente e i difetti e le porosità presenti all'interno dello stesso, di conseguenza è sufficiente un tomografo di tipo microfocus. Un esempio di applicazione tipica del microCT ad alta potenza è l'ispezione delle pale delle turbine. Le sorgenti nanofocus permettono di arrivare a risoluzioni inferiori al micron e sono più adatte nel caso in cui occorra elevata risoluzione e vengano applicate su campioni a basso assorbimento in quanto l'utilizzo di elevate potenze del fascio di radiazioni porta ad un aumento dello spot focale, quindi per mantenere un corretto controllo su di esso è necessario sfruttare basse potenze che hanno capacità di attraversamento del materiale minore rispetto alle alte [14, 15].

Qualunque sia la configurazione scelta, l'obiettivo è quello di acquisire delle radiografie sfruttando i concetti di ingrandimento geometrico. Più l'oggetto è vicino alla sorgente, maggiore sarà l'ingrandimento. Quest'ultimo viene indicato con M (Magnification) ed è il rapporto della distanza tra la sorgente e il detector (FDD) e la distanza tra la sorgente e l'oggetto ispezionato (FOD). A sua volta, M è legato alla risoluzione delle scansioni ottenute col sistema CT. Infatti, all'aumentare dell'ingrandimento, la dimensione dei voxel di cui il volume del CT è composto diminuisce:

$$M = \frac{FDD}{FOD} \qquad \text{Dimensione del Voxel} = \frac{p}{M}$$

con p : passo dei pixel che formano il detector [16].

Tuttavia, un elevato valore di M , oltre all'effetto positivo di migliorare la risoluzione delle immagini, ha anche l'effetto negativo di rendere le immagini sfocate a causa della dimensione finita dello spot focale. [12, 14]

Il valore massimo di ingrandimento che può essere utilizzato è determinato dalle dimensioni dell'oggetto in esame e da quelle del detector.

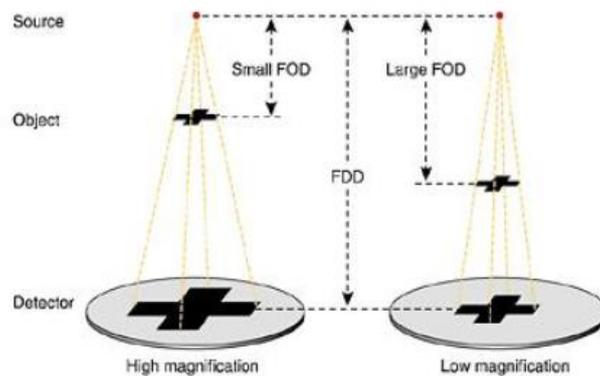


Figura 11. Ingrandimento (M) come rapporto tra FDD e FOD

Stabilito il valore di M , è necessario selezionare accuratamente il voltaggio e la corrente tra i valori possibili all'interno dei range che caratterizzano la specifica macchina tomografica in uso. La scelta di questi valori deve tener conto del materiale di cui il pezzo è costituito, delle sue dimensioni e geometria e dell'accuratezza richiesta. La potenza dei raggi X, pari al prodotto tra la corrente e il voltaggio, deve essere sufficiente a penetrare il pezzo altrimenti il modello 3D finale potrebbe risultare artefatto. Tuttavia, conviene cercare di sfruttare bassi valori di potenza di scansione. Infatti, come precedentemente accennato, alte potenze rendono più difficile il controllo dello spot focale aumentandone le dimensioni e quindi rendendo le immagini ottenute più offuscate. Spesso allora vengono utilizzati dei filtri fisici per "indurire" il fascio riducendo i raggi X a bassa energia. Ciò inoltre diminuisce l'effetto del *beam hardening* che verrà trattato successivamente al paragrafo 1.2.2.2 [14, 17].

Oltre al voltaggio e alla corrente, è compito dell'operatore scegliere il numero di scansioni da acquisire (tra le centinaia e le migliaia) e ciò determina il numero di step angolari in corrispondenza dei quali viene acquisita ogni proiezione. Maggiore è il numero di acquisizioni, maggiore sarà il tempo di scansione necessario.

Alla fine di questa fase, si otterrà un set di immagini radiografiche ognuna caratterizzata da diversi livelli di grigio che rappresentano il grado di attenuazione dei raggi X nell'attraversamento del pezzo in corrispondenza di ogni angolazione.

1.2.1 HARDWARE

1.2.1.1 Sorgente di raggi X

I raggi X consistono in onde elettromagnetiche con una lunghezza d'onda compresa tra 0,01 e 10 nm. I parametri che caratterizzano un fascio di raggi X sono l'*intensità* che descrive il flusso di radiazione che scorre nell'unità di tempo (in A) e la *qualità*, ovvero la distribuzione energetica dei raggi X (in keV). Il valore più alto di energia presente nello spettro di radiazione determina il potere di penetrazione del fascio di raggi X nella materia.

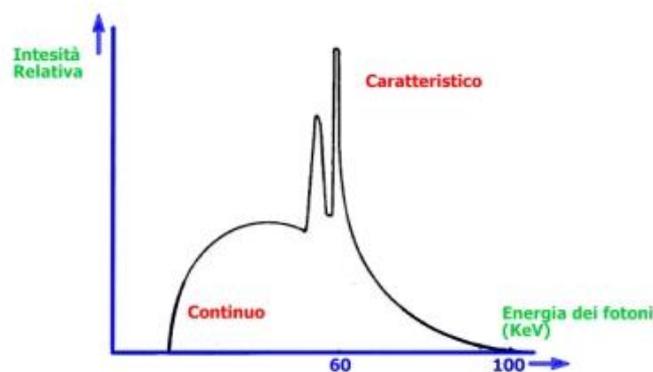


Figura 12. Spettro energetico dei raggi X

Il fascio di raggi X viene prodotto in un tubo di vetro caratterizzato da un alto livello di vuoto. Al suo interno vi sono due elettrodi: sulla parte inferiore del tubo si trova il *catodo termoionico* costituito da un filo di tungsteno a forma di “v” e sulla parte superiore vi è l'*anodo*, ovvero un cilindro con una delle due facce inclinata realizzato con un metallo refrattario che conduce bene il calore.

Il polo positivo di una sorgente ad alto voltaggio è collegato all'anodo, quello negativo al catodo termoionico.

Una corrente elettrica viene fatta scorrere attraverso il filo di tungsteno così che alcuni elettroni all'interno di esso si distaccano dalla sua superficie (fenomeno definito come “emissione termoionica”).

Attivando la sorgente ad alto voltaggio, si crea un campo elettrico tra anodo e catodo che accelera gli elettroni emessi dal tungsteno verso l'anodo formando un fascio. Quest'ultimo colpisce ad altissima velocità l'anodo che rallenta gli elettroni all'interno di una piccola distanza. Ciò provoca la formazione dei raggi X (1%) ma anche al contempo di una gran quantità di calore (99%) generata dalla conversione dell'alta energia cinetica degli elettroni che deve essere dissipata tramite un sistema di raffreddamento [19].

Precisamente, quando gli elettroni colpiscono l'anodo, i raggi X prodotti consistono in due tipi di radiazione: la “*radiazione di Bremsstrahlung*” (o “*radiazione continua*”) e la “*radiazione caratteristica*”.

La *radiazione di Bremsstrahlung* (ovvero “di frenamento”) è quella predominante nel processo di produzione dei raggi X. La sua generazione è dovuta al fatto che gli elettroni sono fortemente attratti dai nuclei atomici positivi del materiale metallico di cui è costituito l'anodo, per cui subiscono un'improvvisa decelerazione. L'energia perduta viene emessa sotto forma di fotoni o raggi X che quindi saranno caratterizzati da quello stesso livello di energia. Maggiori sono il numero atomico della superficie metallica e l'energia cinetica degli elettroni, maggiore è la probabilità che avvenga questa interazione. Questo tipo di radiazione produce uno spettro continuo a partire da basse energie fino alla piena energia del fascio elettronico come si può notare dalla figura Fig. 14.

Si ha una *radiazione caratteristica* quando un elettrone ad alta energia collide ed eccita un elettrone interno ad un atomo appartenente all'anodo (Fig. 13). Entrambi gli elettroni vengono espulsi fuori dall'atomo a seguito di questa interazione lasciando una “lacuna” nell'orbitale dell'atomo stesso che viene colmata da uno degli elettroni più esterni con un maggiore livello di energia. Ciò comporta il rilascio dell'energia dell'elettrone espulso e di un fotone della *radiazione caratteristica*. Infatti, è durante quest'ultima fase che l'atomo emette radiazione X con un'energia che individua esattamente il materiale di cui è composto l'anodo ed è per questo definita “caratteristica”. La radiazione caratteristica è rappresentata da picchi specifici visibili sullo spettro energetico in Fig. 14 [14, 18].

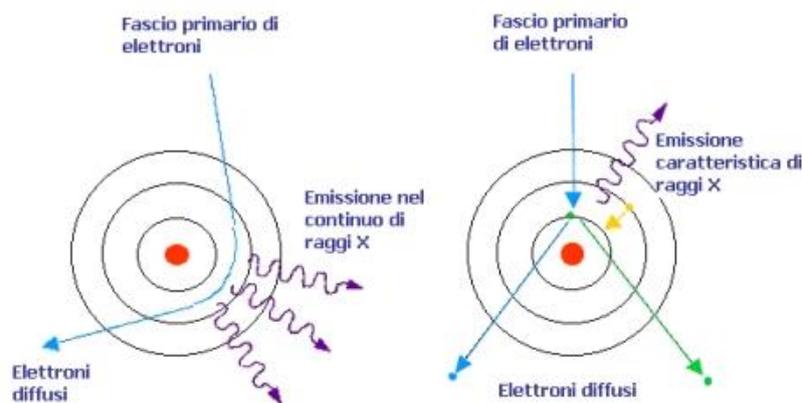


Figura 13. Produzione della radiazione di Bremsstrahlung (a sinistra) e della radiazione caratteristica (a destra)

In base al materiale di cui è composto l'anodo si possono ottenere spettri di radiazione X differenti. Esso può essere trasmittente (dallo spessore sottile) o riflettente (con grandi dimensioni). La prima tipologia di anodo si utilizza per CT scanner a bassa energia non potendo resistere alle alte temperature.

Lo spettro d'energia dei raggi X è influenzato dalla corrente e dal voltaggio. La corrente del circuito è legata al numero di elettroni che scorrono dal catodo all'anodo mentre il contenuto energetico dello spettro è determinato dal potenziale elettrico tra il catodo e l'anodo (indicato in kV, da distinguere

rispetto ai keV con cui ci si riferisce all'energia degli elettroni che colpiscono l'anodo [20]). Ma mentre la corrente influenza solo l'intensità senza modificare la qualità e quindi il potere di penetrazione dei raggi, il voltaggio agisce sia sulla qualità che sull'intensità del fascio. Infatti, se viene aumentato il voltaggio del tubo a raggi X, lo spettro si sposta a livelli maggiori di energia così come a livelli maggiori di intensità di radiazione [14].

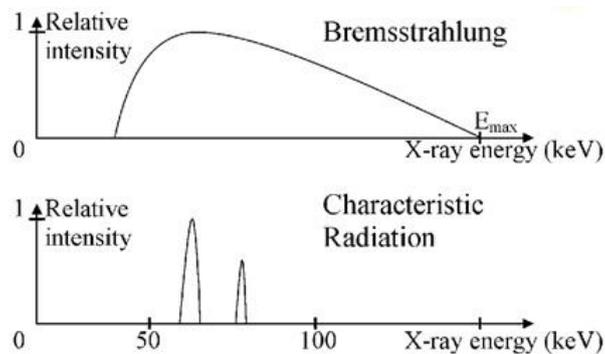


Figura 14. Spettro della radiazione di Bremsstrahlung e della radiazione caratteristica

Grazie al fatto che la superficie contro cui incide il fascio di elettroni è inclinata, i raggi X vengono deviati verso una determinata direzione, ma una certa quantità si propaga anche verso direzioni diverse. Per questo motivo, il tubo è circondato da una struttura protettiva che scherma i raggi uscenti verso le direzioni non volute e permette l'uscita delle radiazioni attraverso una piccola finestra trasparente nella posizione da cui si desidera emettere il fascio.

A causa della larghezza della superficie dell'anodo, però, si ottiene una radiazione troppo diffusa che si traduce in scansioni poco nitide e dal basso contrasto. La soluzione risiede nell'utilizzo di lenti elettromagnetiche per focalizzare il fascio di elettroni proveniente dal catodo termoionico in un piccolo spot sulla superficie dell'anodo. Più piccolo è lo spot focale, maggiore è il contrasto delle immagini ottenute.

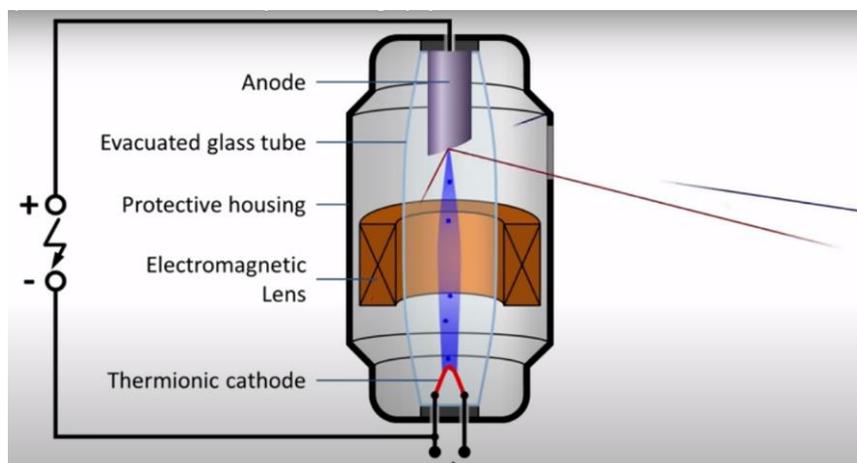


Figura 15. Rappresentazione schematica di una sorgente tomografica

1.2.1.2 Tipologie di detector

Definire le caratteristiche di un detector è importante poiché esse influenzano i risultati del CT scanner. Ad esempio: le sue dimensioni pongono dei limiti a quelle dell'oggetto che può essere scansionato; le dimensioni dei pixel influenzano la risoluzione delle scansioni; la qualità delle immagini scansionate può dipendere dalle proprietà manifatturiere del detector come l'uniformità dei pixel e la sua efficienza.

Come già accennato all'inizio del paragrafo 1.2, esistono principalmente due possibili tipi di detector nei sistemi CT: detector lineari 1D e pannelli 2D.

I detector lineari possono avere forma curvilinea o rettilinea e sono costituiti da un'unica fila di pixel. Ciò si traduce in una buona efficienza grazie alla riduzione del fenomeno dello scattering e ad una maggiore resistenza ai raggi X, caratteristica che permette di rilevare le immagini di oggetti anche molto spessi. Inoltre, l'elevata accuratezza che lo caratterizza deriva dal fatto che abbinato ad esso si utilizza un tipo di fascio a raggi X dalla forma sottile, "a ventaglio", quindi più preciso durante la scansione, eliminando invece il problema dei *cone-beam artifacts*. Infine, il fatto che possano anche essere curvilinei permette la riduzione di deformazione dell'immagine all'allontanarsi dal pixel presente al centro della linea. Lo svantaggio maggiore, tuttavia, consiste nell'elevata durata di processo che richiede l'utilizzo di questo tipo di detector in quanto è necessario traslare o l'oggetto o il sensore stesso per acquisire tutte le sezioni, ciascuna delle quali è ottenuta ad ogni rotazione dell'oggetto. I detector 1D supportano potenze che vanno dagli 80 keV ai 10 MeV e possono essere costituiti da più di 3000 pixel di 250 μm .

I pannelli 2D sono costituiti da righe e colonne di pixel idealmente uniformi e, come visto precedentemente, sono usati in combinazione con la forma conica del fascio di raggi X. Questo tipo di configurazione permette di velocizzare il processo di scansione poiché si ottengono per ogni rotazione delle proiezioni bidimensionali necessarie alla fase di ricostruzione del volume 3D. Il problema principale con questo tipo di detector è però la presenza dei *cone-beam artifacts* che si manifestano allontanandosi dal piano centrale del detector. Oggi, i detector 2D in commercio hanno una risoluzione massima di 2048x2048 pixel con un pixel della dimensione di 200 μm .

Il principio di funzionamento è un altro criterio con cui vengono classificati i detector. Ve ne sono tre tipi:

- *detector diretti* o *counting-type detectors*: il loro output è proporzionale al numero totale di fotoni che lo colpiscono;
- *detector indiretti* o *scintillation-type detectors*: il loro output è proporzionale all'energia totale dei fotoni. Chiamati "indiretti" perché i raggi X vengono convertiti in onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda del range del visibile da scintillatori posti davanti alle file di fotodiodi in silicene che trasformano quelle onde in segnali elettrici;

- *ionization detectors*: il loro output è proporzionale all'energia per unità di massa.

Tra questi i più diffusi sono i detector indiretti [14].

1.2.1.3 Sistema cinematico della piattaforma

In un tipico sistema tomografico industriale, a differenza di quanto accade in quello di ambito medico, la sorgente di raggi X e il detector rimangono fissi mentre la piattaforma tra di essi (e l'oggetto al di sopra) ruota intorno al proprio asse.

La cinematica di questo sistema consiste in (osservando la Fig. 9):

- Un movimento rotatorio continuo o per step angolari intorno all'asse y;
- Una traslazione orizzontale lungo l'asse z per posizionare il pezzo alla giusta distanza dal tubo di radiazioni. L'asse z è anche definito come *asse d'ingrandimento* o *magnification axis* poiché in base alla posizione della piattaforma rispetto alla sorgente si ottiene un certo livello di ingrandimento M.
- Una traslazione orizzontale lungo l'asse x per posizionare il pezzo fuori o al centro del fascio di radiazioni, ad esempio se il livello di ingrandimento è elevato o se il pezzo da scansionare ha delle dimensioni lungo l'asse x maggiori del detector dietro di esso (traslazione opzionale);
- Una traslazione verticale lungo l'asse y. Nel caso di un sistema 2D il movimento può essere assegnato o alla piattaforma o alla sorgente e al detector contemporaneamente ed è necessario affinché ogni sezione del pezzo corrispondente ad una certa coordinata y sia scansionata singolarmente in quella determinata posizione. Nel caso di un sistema 3D, invece, tipicamente è la piattaforma a potersi spostare verticalmente nel caso in cui la dimensione del pezzo lungo l'asse y sia maggiore rispetto a quella del pannello 2D [14].

1.2.2 SOFTWARE

1.2.2.1 Ricostruzione volumetrica 3D

Alla base della tomografia vi è la fisica dell'interazione dei raggi X con la materia. L'intensità di un fascio di raggi X che attraversa la materia viene attenuato e il livello di attenuazione dipende dall'assorbività (che a sua volta dipende dal numero e tipo di atomi che incontra lungo la direzione percorsa) e dalla distanza attraversata all'interno del materiale. Misurando il grado di attenuazione dell'intensità man mano che attraversa il pezzo, si crea una mappa bidimensionale conosciuta come proiezione o radiografia.

I dati acquisiti dal sistema tomografico descritto sono proiezioni 2D che devono essere elaborate in modo da ricostruire il modello 3D del pezzo in esame in voxel, la rappresentazione volumetrica del pixel, ognuno dei quali è caratterizzato da un certo valore di grigio che corrisponde all'attenuazione di radiazione in quella specifica posizione. Per ogni proiezione, i livelli di grigio rappresentano la somma dei coefficienti di attenuazione lungo i percorsi seguiti dai raggi X. Tutte le informazioni contenute in ogni proiezione vengono processate da specifici algoritmi così da assegnare ad ogni voxel un determinato valore di grigio [17].

Bisogna però precisare che nelle immagini finali non sono i coefficienti di attenuazione ad essere rappresentati ma la distribuzione di una grandezza proporzionale ad una tonalità di grigio conosciuta come “numero CT”, una quantità adimensionale che segue la scala di Hounsfield utilizzando come valore di riferimento il coefficiente di attenuazione dell'acqua [20]. Esso è definito come:

$$\text{numero CT (HU)} = 1000 \frac{\mu - \mu_{\text{acqua}}}{\mu_{\text{acqua}}}$$

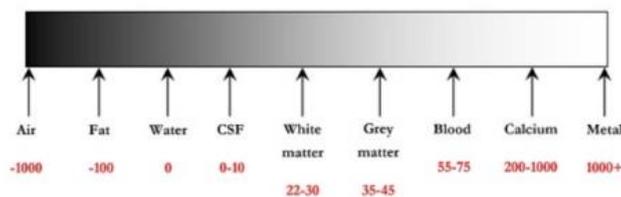


Figura 16. Scala di Hounsfield nell'intervallo da -1000 a + 1000

Il principio su cui si basa la ricostruzione partendo dalle proiezioni è che matematicamente, ogni proiezione può essere descritta da un integrale lineare della distribuzione dei coefficienti di attenuazione lungo una certa direzione percorsa dalla radiazione.

Un possibile metodo di ricostruzione consiste nel “filtered-back projection algorithm” su cui si basa la “Trasformata dell'Integrale Lineare”, un modello matematico sviluppato da J. Radon. Il modello descrive l'assorbimento dei raggi X nel loro passaggio attraverso la materia con un coefficiente di attenuazione variabile μ :

$$I = I_0 e^{-\int \mu(x) dx}$$

che a sua volta deriva dalla legge di Beer-Lambert sull'attenuazione esponenziale dell'intensità di una radiazione elettromagnetica:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

con I_0 l'intensità iniziale, x la distanza attraversata e μ il coefficiente di attenuazione del mezzo [14, 21].

Nel caso in cui il fascio di radiazioni sia di forma conica, la fase di ricostruzione avviene tramite l'algoritmo di Feldkamp, anch'esso basato sul “filtered-back projection algorithm”. Nei sistemi 3D,

infatti, come accennato all'inizio del capitolo, le proiezioni sono bidimensionali quindi bisogna tenere conto del fatto che i voxel non stanno sullo stesso piano orizzontale mentre il pezzo ruota come avviene nei sistemi 2D. Questo tipo di ricostruzione è molto sensibile al disallineamento orizzontale della sorgente, della rotazione dell'asse e del detector, per cui necessita di un'adeguata correzione degli errori trattati nel successivo paragrafo 1.2.2.3 [14, 22].

Il numero di fotoni che viene trasmesso attraverso l'oggetto esaminato dipende dal livello di energia, dallo spessore del materiale e da caratteristiche del materiale come la densità e il numero atomico. Solitamente, materiali con numero atomico basso hanno un coefficiente di attenuazione minore rispetto a quelli con numero atomico più elevato. Infatti, un numero atomico elevato indica un maggior numero di elettroni e quindi un'alta probabilità di interazione con i fotoni che si traduce in una maggiore attenuazione.

L'input per la ricostruzione sono i profili dei valori di grigio (vedi Fig. 9 e Fig. 17 b) che rappresentano l'evoluzione dell'intensità di radiazione lungo i pixel localizzati su una linea del detector, ovvero di un determinato strato dell'oggetto. Infatti, il volume da ricostruire può essere sezionato in corrispondenza di tutte e tre le direzioni principali o lungo un determinato piano di taglio per ottenere una "cross-section" in 2D (Fig. 17 a e Fig. 19 a). La distribuzione dell'intensità di radiazione viene ri-proiettata sulla sezione a cui corrisponde.

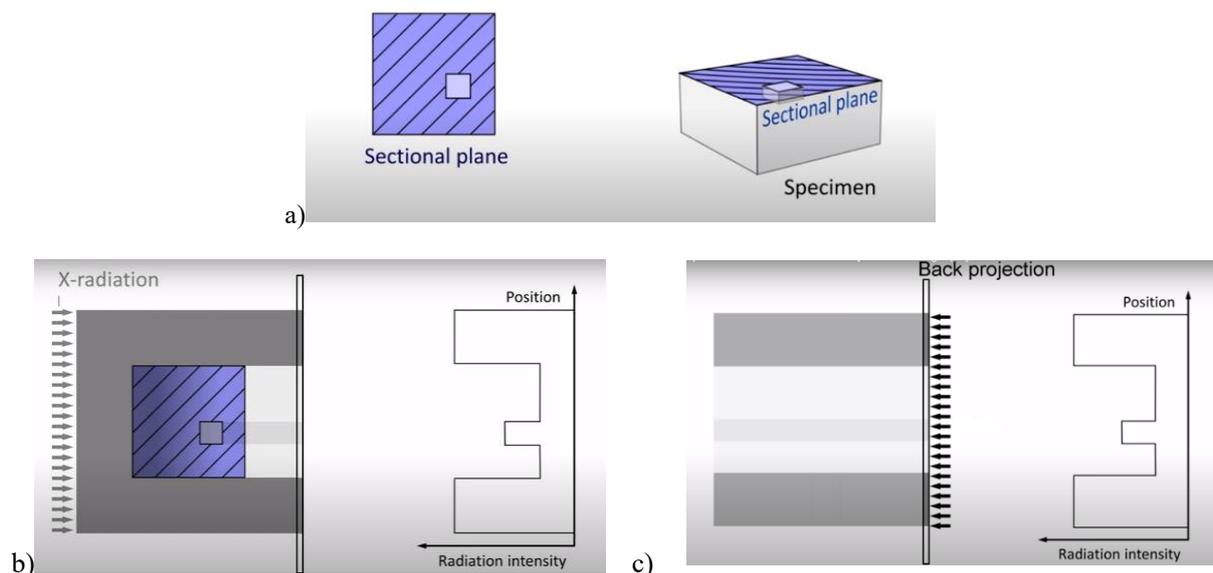


Figura 17. Esempio di applicazione del metodo del "back-projection": a) sezione considerata del componente; b) generazione del profilo dei valori di grigio; c) proiezione del profilo sulla sezione

Il processo descritto viene ripetuto per ciascuna angolazione dello stesso strato per poi sovrapporre tutte le immagini e ottenere la sezione (Fig. 18 a).

Questo procedimento di "back-projection" viene effettuato per ogni sezione fino a che non si ottiene il modello tridimensionale (Fig. 18 b) [19].

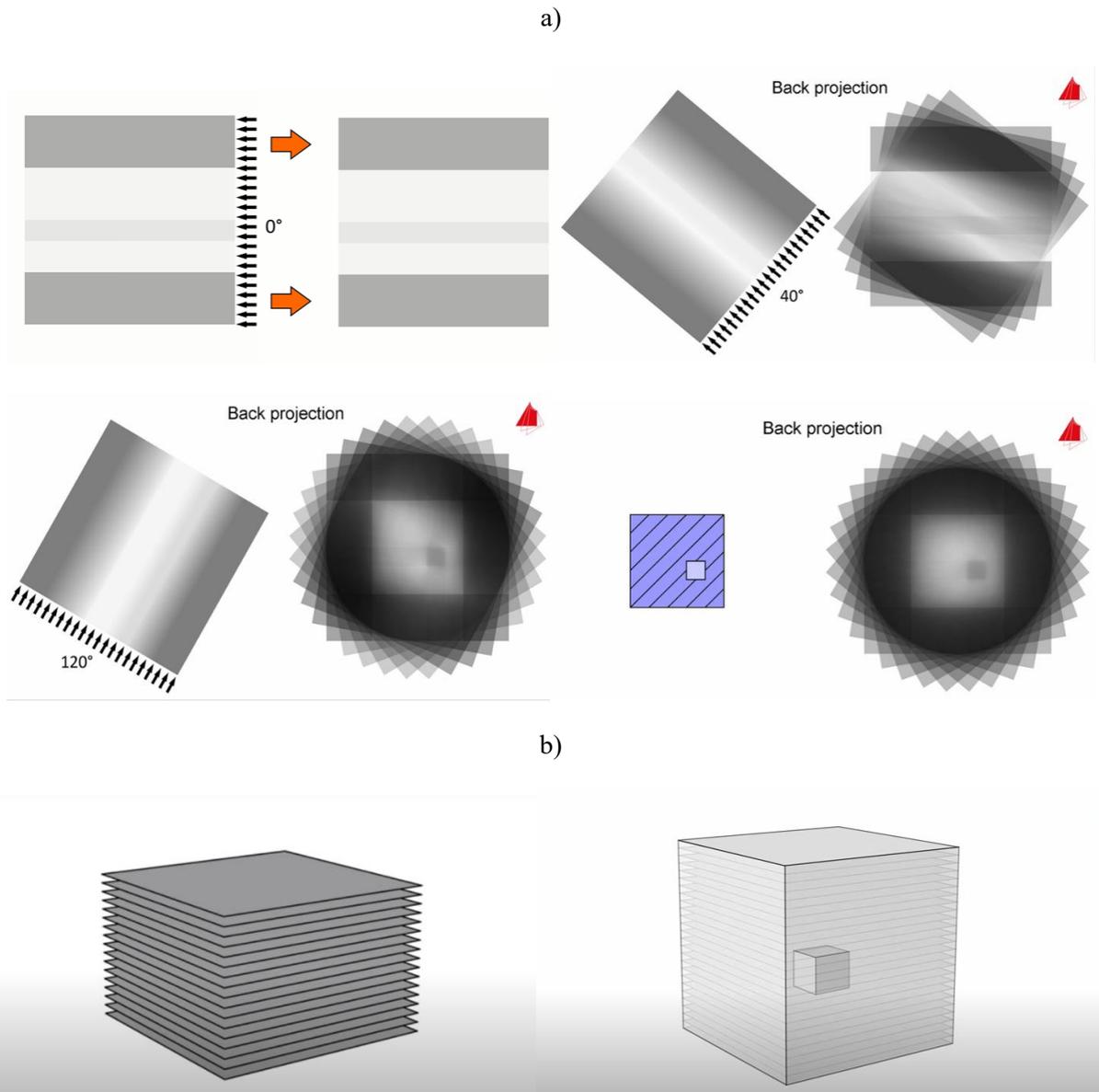


Figura 18. a) “Back-projection” per ogni step angolare e risultato della sovrapposizione; b) “Back-projection” ripetuto per ogni sezione per creare il modello tridimensionale

Un semplice esempio di ricostruzione di tre oggetti in 2D effettuata utilizzando il modello matematico di Radon è riportato nelle Fig. 19b e c. Si può notare che maggiore è il numero di proiezioni da diverse angolazioni, migliore è la ricostruzione. Con le sole proiezioni a 0° e 90° , infatti, ciò che appare è una sorta di griglia, ma aumentando il numero di proiezioni da angolazioni diverse di quello stesso strato l’immagine acquisisce maggiore precisione [17].

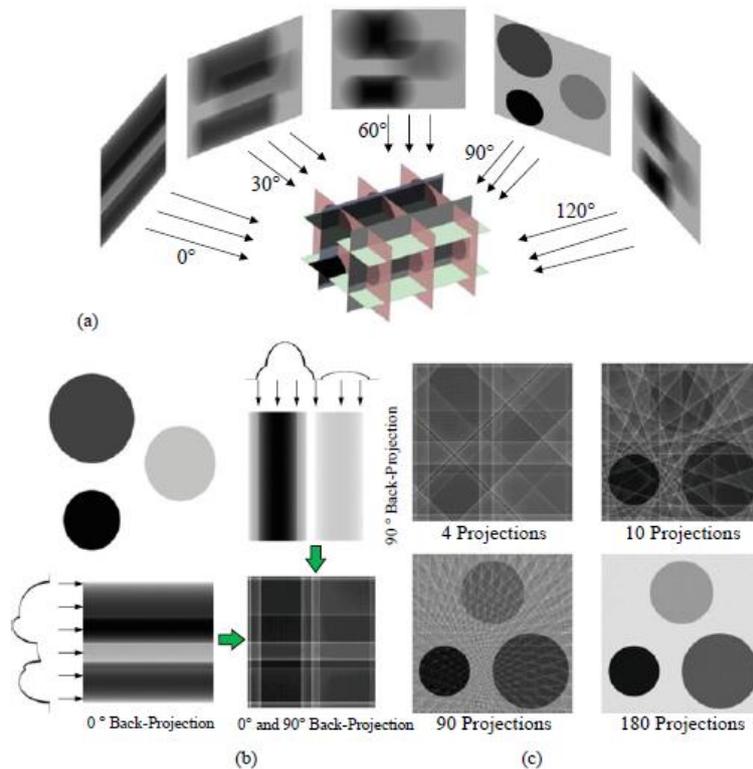


Figura 19. a) rappresentazione 3D del "back projection"; b) rappresentazione 2D del componente con proiezione dei profili di valori di grigio sulle scansioni a 0° e a 90°, ottenendo un'unica back projection dalla loro sovrapposizione; c) back projections ottenute dalla sovrapposizione di 4, 10, 90 e 180 proiezioni della stessa sezione

È chiaro, quindi, che la risoluzione della ricostruzione è influenzata dalla dimensione dei pixel, dal numero di pixel all'interno di ogni profilo di valori di grigio (ad esempio il numero di pixel del detector nella direzione x), il numero di strati o pixel del detector nella direzione y , il numero delle posizioni angolari a cui vengono acquisite le scansioni, il numero di proiezioni acquisito per una determinata posizione angolare (definito come *averaging number*), ecc...

1.2.2.2 Segmentazione o determinazione della superficie

Dopo la ricostruzione, il modello 3D consiste in un elevato numero di voxel contenenti informazioni sul livello di grigio corrispondente ad un certo grado di attenuazione. Per svolgere le successive analisi metrologiche e interne al volume è necessario sfruttare queste informazioni per determinare la superficie del pezzo definendo l'interfaccia tra materiale solido e background (come l'aria) o tra due tipologie di materiali differenti. Ciò avviene convertendo i dati da voxel 3D a superficie 3D.

Questa fase è molto delicata poiché influenza profondamente l'accuratezza del risultato finale.

Esistono varie tecniche di segmentazione, tra cui un processo di *thresholding* che consiste nell'individuazione di un valore soglia (un livello di grigio) da assegnare ai voxel che si trovano a

cavallo tra il materiale e ciò che lo circonda. Questo valore dipende fondamentalmente dall'intensità della radiazione.

Un metodo diffuso per individuare il *threshold* consiste nell'utilizzo dell'"iso-50%". Quest'ultimo è ottenuto plottando su un istogramma il numero di voxel sull'asse verticale e i valori di grigio (o le intensità) dei voxel sull'asse orizzontale (Fig. 20). Sull'istogramma si formano dei picchi ognuno dei quali si riferisce ai materiali presenti (compreso il "background"). Col metodo "iso-50%" si assegna il valore di grigio in mezzo ai due picchi al valore di *threshold*.

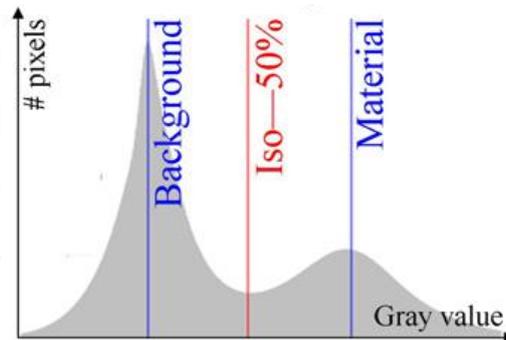


Figura 20. Istogramma per metodo di individuazione del valore di *threshold*, iso-50%

In base al numero di voxel del materiale e dell'aria, i picchi possono essere più o meno simili in dimensioni. Per questo motivo conviene sempre cercare di stabilire un istogramma in cui background e materiale siano presenti in egual misura.

Tuttavia, con l'utilizzo di strumenti di calibrazione, si è notato che in alcuni materiali, utilizzando il metodo descritto, si ottiene un valore di *threshold* shiftato sull'asse orizzontale rispetto a quello reale. In particolare, si è dimostrato il peggioramento dei risultati con l'applicazione di questo metodo nel caso siano presenti più tipologie di materiali.

Inoltre, l'individuazione del valore soglia è spesso ostacolata da alcuni effetti indesiderati dovuti a step precedenti. Fra questi vi è il *beam hardening*. Di tratta del fenomeno per cui mentre il fascio si addentra nel materiale, i fotoni a bassa energia detti raggi X "soft" vengono più rapidamente attenuati rispetto ai fotoni ad alta energia (raggi X "hard"). Quindi, dopo un certo tratto di penetrazione nel materiale, i raggi X soft scompaiono così che solo i raggi X hard attraversano completamente il pezzo fino ad arrivare al detector. Ciò si può osservare dall'andamento dello spettro di radiazione in Fig. 21 che man mano mantiene solo i fotoni ad alta energia.

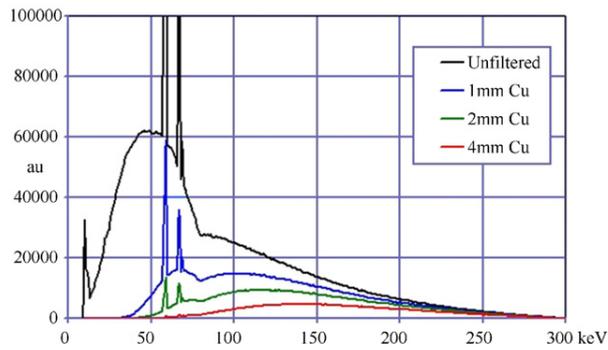


Figura 21. Esempio di spettro di radiazioni a 300 kV ed effetto dell'applicazione di un filtro

È come se i primi mm del componente assorbissero più radiazioni rispetto alla parte interna che attenua solo i raggi X hard e ciò è visibile nelle immagini ricostruite in cui il contorno del componente appare più chiaro rispetto alla parte interna dello stesso e al background. Il *beam hardening*, quindi, influenza l'individuazione del valore di *threshold* in quanto altera il valore di grigio dei voxel alle estremità del pezzo. Un esempio è rappresentato dalla Fig. 22.

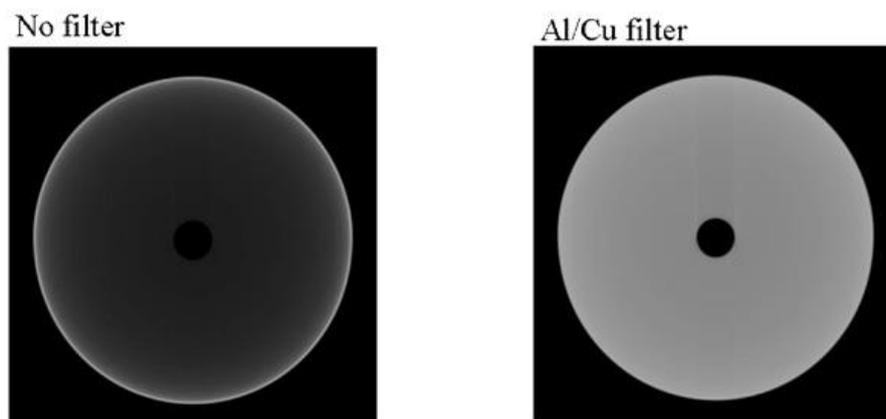


Figura 22. Effetto del fenomeno di beam hardening senza e con l'applicazione di un filtro

Tuttavia, è possibile ridurre il fenomeno descritto applicando dei filtri, ovvero sottili lamine di materiale metallico come il rame o l'alluminio tra la sorgente e il pezzo i cui effetti si possono osservare in Fig. 21 e Fig. 22. In questo modo si eliminano i fotoni a bassa energia e lungo tutto lo spazio percorso si considerano solo quelli ad alta energia. Questo tipo di intervento permette una più corretta determinazione della superficie del pezzo [14].

1.2.2.3 Alcuni possibili effetti indesiderati

Oltre al fenomeno del *beam hardening*, altri effetti che causano imperfezioni e che sono dovuti a fenomeni fisici o agli algoritmi utilizzati per la fase di ricostruzione sono:

- *errori di Feldkamp*: dovuti ad angoli del fascio conico troppo grandi e all'incompletezza delle proiezioni così da causare distorsioni della geometria;
- *errori da identificazione inesatta del centro di rotazione*: all'inizio della fase di ricostruzione, il software cercherà di identificare la posizione dell'asse attorno al quale il componente ruota ma se questa non viene individuata in modo preciso si produrranno errori di ricostruzione;
- *filtraggio*: il possibile rimedio o attenuazione del fenomeno del *beam hardening* precedentemente descritto potrebbe a sua volta introdurre altri errori come lo *scattering*;
- *scattering*: fenomeno che causa una sorta di alone sulle immagini riducendo il rapporto *Signal to Noise ratio* localmente. È dovuto alla deflessione dei raggi all'interno del materiale o del detector;
- *rumore (noise)*: causato principalmente dalla quantizzazione dei fotoni ma anche da altre fonti come il detector o l'amplificazione dei segnali;
- *ring artifacts*: difetti che si manifestano sotto forma di anelli concentrici al centro di rotazione della piattaforma e sono dovuti ad una correzione errata di pixel difettosi [14].

1.3 Fused Deposition Modeling

La stampa 3D a filo nasce negli anni 80 col nome di FDM (Fused Deposition Modeling), invenzione e brevetto dell'azienda Stratasys scaduto nel 2009, rendendo il processo disponibile al libero mercato. Nonostante "FFF" (Fused Filament Fabrication) sia il nuovo termine adottato per riferirsi a questa tecnica, ancora oggi l'appellativo "FDM" risulta maggiormente diffuso e utilizzato.

1.3.1 CICLO DI PRODUZIONE

Come ogni tecnica appartenente alla tecnologia innovativa della Fabbricazione Additiva, l'FDM rende possibile la produzione in poche ore di componenti dalla geometria complessa a partire dal modello matematico dell'oggetto realizzato su un sistema CAD 3D. Quest'ultimo viene convertito in formato STL (Standard Triangulation Language) che trasforma il modello CAD di tipo solido in un modello di tipo "Shell", caratterizzato da una superficie esterna approssimata attraverso triangoli di varia dimensione. Tuttavia, l'utilizzo di questo formato causa numerosi problemi di inaccuratezza considerando ad esempio il fatto che superfici curve vengono approssimate con triangoli che, diversamente, sono piani (*errore di faceting*). Ma grazie all'esistenza di software correttivi, continua ad essere il formato più diffuso e affidabile in quest'ambito.

Successivamente, il modello nel nuovo formato viene caricato su uno o più software collegati direttamente alla stampante. Su queste interfacce le operazioni principali che vengono compiute sono:

- lo *slicing*: processo che consiste nell'intersezione del modello .stl con piani paralleli al piano di lavoro e distanti l'uno dall'altro di una quantità Δz (con z l'asse normale al piano) così da definire gli strati di costruzione. In particolare, nei polimeri Δz è compreso tra 0,05 e 0,3 mm. Il problema principale dello slicing è che maggiore è Δz , maggiore è il materiale in eccesso, provocando un effetto "a scalino" che rende le superfici irregolari e rugose;
- l'*orientamento del pezzo*: in base a come viene orientato il pezzo sul piano, lo slicing varia, quindi è fondamentale scegliere l'orientamento che riduca i tempi di costruzione e renda meno marcato l'effetto a scalino;
- la *generazione dei supporti*: i supporti hanno la funzione di supportare le parti sporgenti del componente e ancorarlo all'area di lavoro. La tecnologia a filo richiede questo tipo di struttura. Sono solitamente realizzati con un materiale differente rispetto a quello di costruzione e devono essere realizzati in modo da essere facilmente rimovibili. Vengono automaticamente generati e aggiunti dal software al componente in base alla sua geometria e al suo orientamento. La presenza dei supporti incrementa il tempo necessario per il processo di produzione e rende necessaria e a volte difficoltosa la rimozione delle loro tracce sulla superficie del pezzo.

Settati i parametri di processo, il job può essere avviato e l'intera fase di costruzione avviene in maniera automatica.

Infine, il pezzo realizzato viene rimosso dal piano di lavoro per essere oggetto di operazioni manuali quali la rimozione dei supporti, la pulizia e la finitura.

Il ciclo della Fabbricazione Additiva descritto è rappresentato schematicamente in Fig. 23.

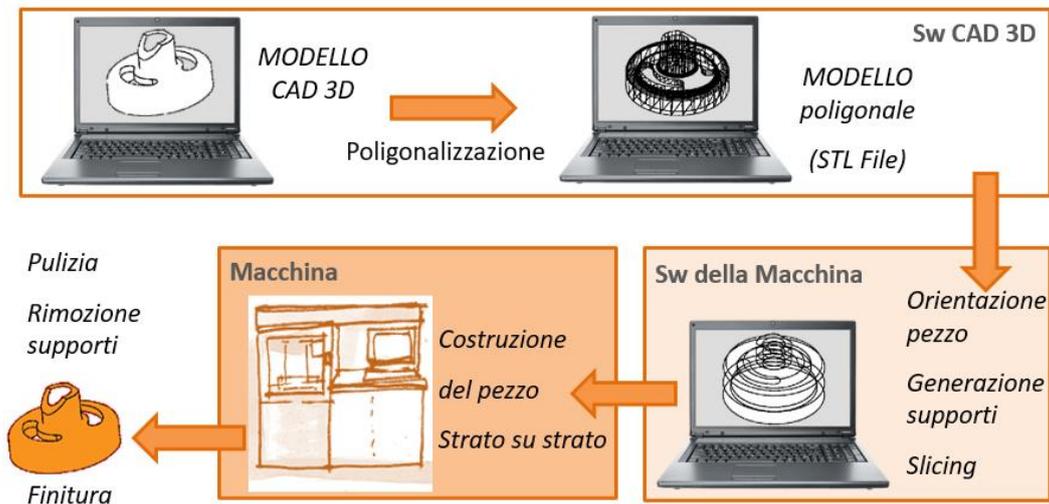


Figura 23. Ciclo della FA

1.3.2 MECCANISMO E CARATTERISTICHE DEL PROCESSO

L'FDM o FFF è un processo selettivo di deposizione mediante riscaldamento ed estrusione di un filamento di materiale termoplastico. Il componente viene realizzato strato dopo strato su una piattaforma di lavoro riscaldata per permettere una corretta adesione del primo strato e che trasla lungo l'asse z spostandosi verso il basso ad ogni layer depositato. Gli estrusori, invece, si muovono unicamente sul piano x-y (Fig. 24). Normalmente sono presenti almeno due ugelli, uno dedicato all'estrusione del materiale dell'oggetto da realizzare e l'altro col compito di deporre il materiale di cui sono composti i supporti, il quale spesso consiste in un materiale termoplastico solubile in acqua, così da rimuoverlo facilmente e in maniera pulita.

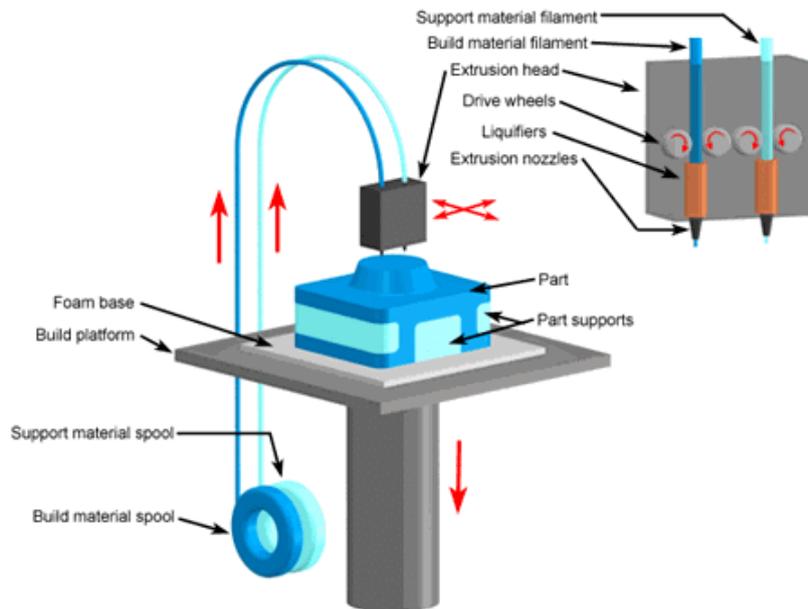


Figura 24. Schema di funzionamento del processo FDM

Gli estrusori sono costituiti da un orifizio e da una camera riscaldata che fonde il filo in modo che il materiale estruso abbia una consistenza pastosa. Il calore è tipicamente fornito da bobine avvolte sulla camera e dovrebbe essere tale da mantenere costante la temperatura del fuso. Ogni tipo di materiale utilizzato in questa tecnica è caratterizzato da una determinata temperatura a cui è necessario si trovi all'uscita dell'estrusore poiché è fondamentale per un corretto funzionamento che essa non sia né troppo elevata (causando il degrado del polimero) né troppo ridotta (non raggiungendo la fluidità corretta per l'adesione fra i layer). La temperatura deve essere tale da far sì che la traccia sia realizzata correttamente e in maniera uniforme per garantire la giunzione del materiale con lo strato inferiore.

Anche la geometria dell'ugello è importante in quanto determina la forma e la dimensione del filamento estruso. Infatti, ugelli grandi permettono una realizzazione più veloce del componente ma al contempo meno precisa. Al contrario, ugelli dalle dimensioni inferiori sono più precisi ma depositano minor materiale rendendo più lungo il processo di estrusione.

Il materiale, generalmente presente sotto forma di filamento continuo avvolto in bobine, viene introdotto nella camera di estrusione tramite un sistema di avanzamento che con dei rulli spinge il materiale generando una pressione sufficiente per estruderlo. Il filo in ingresso ha solitamente un diametro di circa 3 mm ma all'uscita dell'ugello il materiale avrà una dimensione definita dal suo orifizio (ovvero dell'ordine di alcune decine di μm). In realtà, il filamento depositato varia in forma e dimensione a causa della gravità e dalla pressione sul materiale dovuta alla posizione dell'ugello rispetto ad esso, aumentando l'effetto di ovalizzazione. Infatti, controllando il posizionamento dell'ugello rispetto allo strato depositato è possibile determinare lo spessore del layer. In definitiva, lo spessore del layer sarà inferiore al diametro dell'ugello.

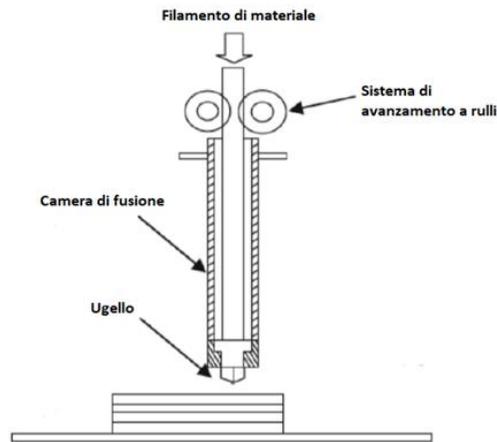


Figura 25. Configurazione dell'estrusore

Il materiale pastoso, una volta depositato, si contrae durante il raffreddamento generando tensioni sul componente e distorsioni. Infatti, a causa dello scambio termico col substrato, il filamento si raffredda solidificandosi. Ma contraendosi, essendo già collegato allo strato sottostante, quest'ultimo si oppone alla variazione dimensionale dando vita ad uno stato tensionale. Per evitare di compromettere la costruzione del pezzo, una possibile soluzione, oltre a ridurre i gradienti termici (mantenendo sotto controllo le temperature della camera di riscaldamento e della piattaforma di lavoro), consiste nell'applicazione di strategie di deposizione e riempimento delle sezioni. Si definisce la realizzazione di ogni strato suddividendola in due fasi: la prima di deposizione del contorno, la seconda del riempimento seguendo diverse possibili geometrie di deposizione. Infatti, un riempimento del 100% può essere critico se la sezione è molto ampia, per cui, se non è un requisito funzionale, si preferisce effettuare il riempimento tramite creazione di reticoli.

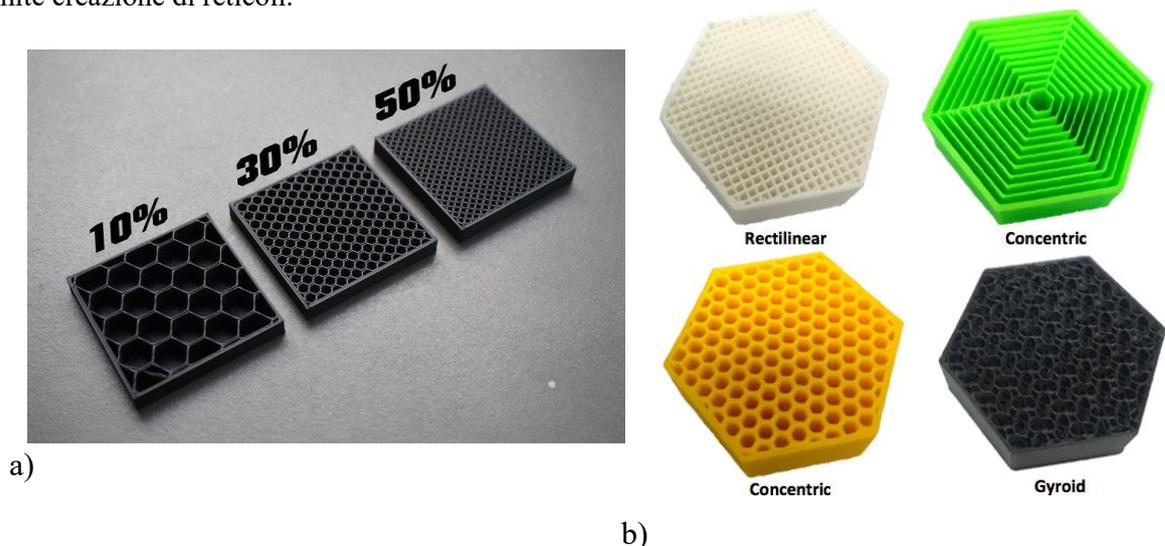


Figura 26. a) stessa strategia e differente infill del 10%, 30% e 50%; b) esempi di possibili strategie di riempimento

In conclusione, il processo di estrusione a filo dipende da numerosi parametri, tra cui:

- la pressione d'ingresso dovuta ai rulli di avanzamento;

- la temperatura della camera di riscaldamento e della piattaforma di lavoro per garantire la qualità del componente;
- il diametro dell'ugello che definisce lo spessore del layer e il minimo spessore di parete;
- le caratteristiche del materiale;
- la gravità;
- i gradienti di temperatura nel componente.

1.3.3 MATERIALI E APPLICAZIONI

Con la tecnologia FDM si possono realizzare modelli concettuali, prototipi funzionali, parti di *rapid tooling* e parti definitive sia con termoplastiche standard che con materiali tecnici e ad elevate prestazioni. I materiali termoplastici utilizzati offrono buone proprietà meccaniche, biocompatibilità e resistenza ai raggi UV. Tra questi vi sono: ABS, PC-ISO, ABS-M30, PC, ABS-M30i, FDM Nylon 12, ABS-ESD7, ULTEM 9085 resin, PC-ABS, PPSF, ULTEM 1010 resin, ASA e PEEK. L'ABS è il polimero più comune ma con l'aggiunta di additivi si possono ottenere materiali specifici per la manipolazione di parti elettroniche sensibili (ABS-ESD) o per la stampa 3D medica ad alta velocità. Inoltre, unito ad altri polimeri con prestazioni superiori come il policarbonato, si ottiene una migliore resistenza termica, chimica e agli urti rispetto al semplice ABS (PC-ABS). Infine, il PEEK e l'ULTEM sono materiali tecnici e ad alte prestazioni. L'ULTEM è un polimero autoestinguente utilizzato nell'ambito aerospaziale e navale, il PEEK, invece, resiste ad elevate temperature ed è biocompatibile, per questo applicato in campo medicale.



Figura 27. Bobine di filamento polimerico

Grazie alle caratteristiche del processo e dei materiali termoplastici descritti, l'estrusione a filo è maggiormente sfruttata in campo ortopedico per la realizzazione di modelli di ossa o per la creazione di tutori personalizzati. Nel campo dell'automotive è sviluppata soprattutto la prototipazione di parti di carrozzeria. Anche gli stampi di preserie vengono prodotti con questa tecnica in quanto caratterizzati da una vita utile migliore di quella ottenibile tramite tecnologie convenzionali.



Figura 28. Esempi applicativi dell'FDM

1.3.4 VANTAGGI E LIMITI

Il processo FDM assicura buone prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali se la realizzazione viene seguita da una lavorazione di finitura manuale come la carteggiatura. È inoltre possibile lavorare meccanicamente i particolari realizzati attraverso la tornitura, la fresatura e la filettatura. Il range dei materiali utilizzabili è ampio e consiste in termoplastici definitivi. È possibile realizzare anche particolari ripetibili di grandi dimensioni e con materiale colorato. I supporti possono essere creati con materiali solubili in modo da non lasciare alcuna traccia sul pezzo rimuovendoli facilmente. Inoltre, a parte la rimozione dei supporti, non sono necessari altri post-trattamenti. Infine, il processo è esente da polveri, quindi non sussistono problemi di sicurezza per gli operatori e non vi sono vincoli per l'installazione.

Tra gli svantaggi vi sono: l'impossibilità di sfruttare l'intero volume di lavoro (specialmente nella direzione z); la necessità dei supporti che, se non realizzati con materiale solubile, rischiano di danneggiare il pezzo durante la rimozione; la non impermeabilità dei componenti realizzati salvo trattamenti post-produzione come l'impregnazione [1, 2].

1.4 Caratterizzazione meccanica

1.4.1 PROVA DI TRAZIONE

La prova di trazione è una prova di caratterizzazione del materiale di grande importanza poiché consente di esaminare il comportamento dei materiali e valutarne la struttura.

Nella prova di trazione si sottopone un provino di dimensioni standard (definite da una determinata normativa) ad un carico F monoassiale gradualmente crescente fino a provocarne la rottura e andando a misurare man mano la forza applicata e la deformazione. Si tratta infatti di una prova distruttiva in quanto provoca la rottura del provino sul quale si effettua.

La prova viene eseguita per individuare diverse caratteristiche meccaniche, tra cui la resistenza meccanica, la deformabilità o allungamento percentuale, il carico unitario di snervamento "yield strength", la strizione percentuale "necking", il modulo di elasticità del materiale (modulo di Young). Tali elementi sono individuabili tramite l'utilizzo del diagramma sforzo-deformazione. Al suo interno si distinguono i campi che costituiscono le fasi principali della prova di trazione: zona elastica, zona elasto-plastica e zona plastica.

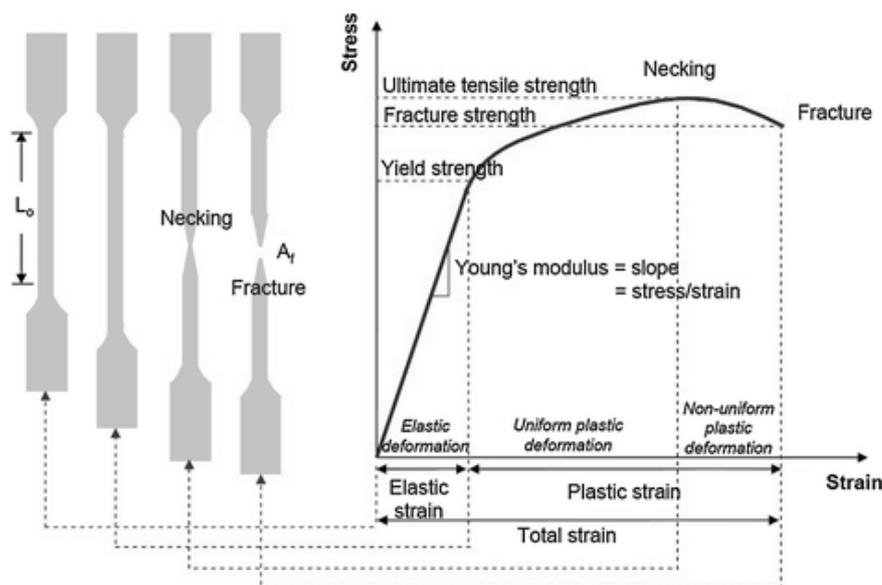


Figura 29. Curva di trazione e caratteristiche meccaniche individuabili

In particolare, il comportamento del materiale è definito:

- *lineare* se la deformazione è direttamente proporzionale alla tensione applicata;
- *elastico* se le deformazioni si annullano al cessare dell'applicazione delle tensioni;
- *plastico* se permangono deformazioni anche in assenza dell'applicazione delle tensioni.

Per effettuare la prova di trazione, il provino viene posizionato verticalmente e collegato ad una macchina di prova attraverso degli afferraggi, di cui uno fisso e l'altro solidale ad una traversa mobile della macchina il cui spostamento permette l'applicazione del carico (Fig. 30). Le prove possono essere condotte: o *in controllo di spostamento*, ovvero imponendo che la traversa della macchina si muova con velocità costante; o *in controllo di deformazione*, cioè in modo che la deformazione applicata cresca con velocità $d\varepsilon/dt$ costante; o *in controllo di carico* imponendo che il carico cresca con velocità dF/dt costante. Il primo tipo di prova è quello maggiormente utilizzato e in questo caso la velocità di spostamento della traversa potrebbe essere determinata in base alle indicazioni delle normative e viene impostata con l'utilizzo di un computer. Si impone lo stop della macchina non appena avviene la rottura del provino o quando la traversa si è spostata di una distanza predefinita.

Durante la prova si misurano istante per istante: la forza applicata al provino tramite una cella di carico; lo spostamento a velocità costante dell'elemento mobile con un encoder o un trasformatore differenziale di variabili lineari; l'allungamento ottenuto, o grazie all'applicazione sul provino stesso di un estensimetro elettrico a resistenza oppure semplicemente dalla misura della variazione della distanza tra le traverse, in base al grado di precisione dei risultati richiesto.

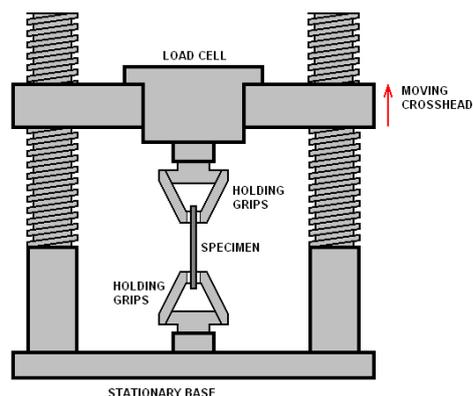


Figura 30. Schema della macchina di trazione

In questo modo si ottengono valori di sforzo e deformazione a intervalli regolari e i dati misurati sono riportati sul diagramma tensione nominale-deformazione nominale $\sigma - \varepsilon$ ottenendo così una *curva di trazione* fornita da un computer che elabora i dati acquisiti dalla macchina. Tensione e deformazione “nominali” (anche dette “ingegneristiche”) sono date le prime dal rapporto tra il carico applicato e l'area iniziale del provino (in MPa), le seconde dal rapporto tra l'allungamento totale e la lunghezza iniziale (adimensionali):

$$\sigma = F_i/A_0$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Osservando Fig. 29, si possono distinguere: un primo tratto rettilineo detto “elastico” che segue la legge di Hook per cui $\sigma = E\varepsilon$ e in cui le deformazioni subite sono reversibili; l'inizio del tratto plastico in cui

il materiale entra in snervamento cominciando a formarsi micro-cricche; subito dopo lo snervamento si ha il comportamento plastico vero e proprio già descritto precedentemente; la decrescita della curva che caratterizza il fenomeno di strizione (diminuzione della sezione del provino); il punto di rottura.

Inoltre, dall'osservazione del diagramma sperimentale è possibile distinguere due categorie di materiali: i *duttile* che giungono a rottura con elevati valori di deformazione (ciò avviene per gli acciai e per alcuni polimeri); i *fragili* come ghise, ceramici e altri polimeri in cui la rottura avviene con valori di deformazione limitati [23, 24].

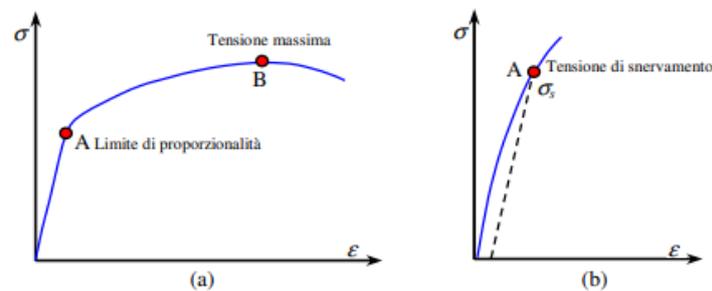


Figura 31. Diagramma σ - ϵ per: a) materiale *duttile*; b) materiale *fragile*.

1.4.2 CURVA DI ELASTICITÀ DEL MATERIALE

In realtà, la tensione nominale non coincide con quella realmente agente poiché la sezione del provino scarico A_0 è maggiore di quella che si ottiene durante l'applicazione del carico a causa del fenomeno di *strizione*. Ma questa differenza è trascurabile fin quando il materiale si mantiene in campo elastico.

La tensione reale si definisce come il rapporto tra la forza applicata e l'area della sezione corrente del provino:

$$\sigma_R = F/A$$

Quindi la tensione reale risulta maggiore di quella nominale poiché $A_0 > A$. Sperimentalmente, la tensione reale cresce sempre durante la prova, quindi la *curva di elasticità* del materiale, a differenza della *curva di trazione* sperimentale, è una funzione monotona crescente.

Come visto nel paragrafo precedente, la deformazione nominale è un valore medio rispetto alla lunghezza di riferimento e si valuta come l'allungamento complessivo ΔL riferito alla lunghezza iniziale L_0 .

Nella deformazione reale, ΔL può essere definito come la somma di incrementi istantanei di lunghezza dL_i , dove ognuno è ottenuto quando il provino ha lunghezza istantanea L_i (con $L_i > L_0$). La deformazione reale totale è data dall'integrale della deformazione istantanea dL_i/L_i tra la configurazione iniziale e l'istante considerato:

$$\varepsilon_R = \int_{L_0}^L \frac{dL_i}{L_i} = \ln \frac{L}{L_0}$$

In questo caso, le deformazioni reali in campo plastico risultano inferiori a quelle nominali, mentre in campo elastico sono praticamente coincidenti.

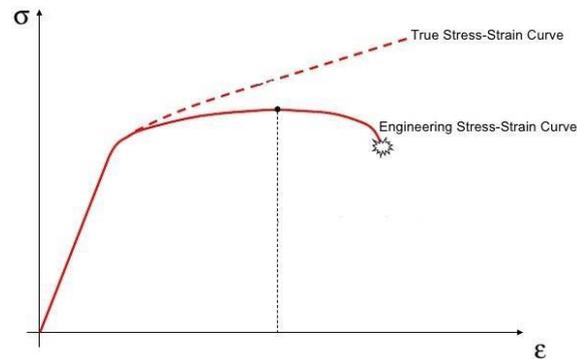


Figura 32. Curva elastica e curva ingegneristica

Per ricavare la deformazione reale in funzione di quella nominale, si può introdurre la relazione $L = L_0 + \Delta L$ nell'espressione soprariportata e ottenere:

$$\varepsilon_R = \ln (\varepsilon + 1)$$

Invece, per calcolare la tensione reale a partire dall'espressione ingegneristica, si considera tramite la relazione $A_0 L_0 = A L$ la costanza del volume del provino, trascurando le piccole variazioni di volume dovute alla deformazione elastica. In questo modo si ottiene:

$$\sigma_R = \sigma (\varepsilon + 1)$$

dalla quale si ricava anche un altro modo per esprimere la deformazione reale:

$$\varepsilon_R = \ln \frac{A_0}{A}$$

[23, 24]

1.4.3 IL PROVINO

L'andamento della *curva di trazione* descritta precedentemente, al contrario della *curva di elasticità* che varia solo col materiale, dipende dalla forma del provino. Quindi, per limitare gli errori di approssimazione nella transizione da una curva all'altra, sono stati regolamentati dei provini dalla forma standard. Vi sono due tipologie principali di provini: quelli a sezione circolare utilizzati per i materiali metallici e quelli a sezione rettangolare indicati soprattutto per i materiali polimerici. La forma è detta "ad osso di cane" e le dimensioni sono standardizzate per ogni tipo di materiale.

In un provino si distinguono:

- la lunghezza L_c , “parte centrale calibrata” ($L_0 + d_0/2 < L_c < L_0 + 2d_0$);
- la lunghezza iniziale L_0 stabilita con i riferimenti indicati con “2” nella Fig. 33, minore rispetto a L_c ;
- il diametro d_0 della parte calibrata nel caso in cui il provino sia a sezione circolare, larghezza a e altezza b della sezione se questa è rettangolare;
- le teste di serraggio (“1” in Fig. 33), con dimensioni e forma adatte ad essere afferrate tra le morse della macchina di trazione. Esse possono essere quadre, filettate o a spillo;
- i raccordi ad archi di cerchio tra le teste e la parte calibrata, utili ad evitare concentrazione di tensione che influirebbe sui risultati della prova;
- la lunghezza totale L_t .

Sperimentalmente, si è osservato che la forma e la dimensione dei provini influenzano notevolmente le deformazioni. Per questo è stato scelto una lunghezza L_0 che garantisca su quel tratto una distribuzione dello sforzo uniforme.

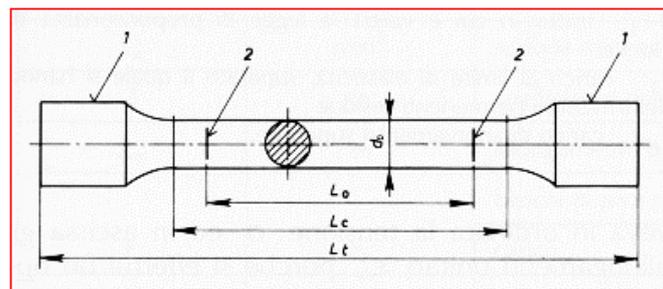


Figura 33. Grandezze di riferimento nel caso di un provino cilindrico

La geometria del provino è stata ideata in modo tale che si abbia rottura nella zona centrale dato che vicino alle ganasce che lo afferrano vi sono anche le forze applicate dalle ganasce stesse.

Dopo la rottura, si misura la distanza tra i riferimenti (anche detta lunghezza ultima) facendo combaciare i due tratti spezzati e si ricava ΔL come la differenza tra la lunghezza ultima e la lunghezza iniziale [25].

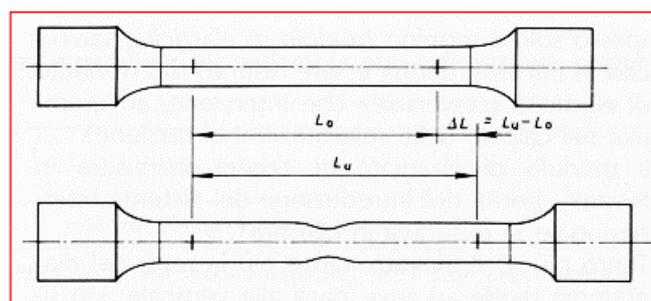


Figura 34. Allungamento $\Delta L = L_u - L_0$

1.4.4 DIC (DIGITAL IMAGE CORRELATION)

Come accennato precedentemente, per misurare le deformazioni subite dal provino durante la prova di trazione la scelta più comune ricade nell'utilizzo degli estensimetri. Poiché, però, l'interesse di questo studio non risiede tanto nell'ottenimento di valori esatti di allungamento, ma quanto nell'evoluzione della deformazione durante le prove di trazione in specifici punti sul provino stesso, ci si accinge ad approfondire un altro metodo di monitoraggio delle deformazioni. Grazie ai progressi della tecnologia legata ai sensori d'immagine e alla loro capacità di acquisire un maggior numero di frame al secondo con alta risoluzione, un'alternativa che permette di studiare le deformazioni subite da un campione consiste nell'applicazione di un software di correlazione digitale delle immagini, sulla base di una tecnologia nota come DIC. La DIC 2D è una tecnica di misurazione ottica bidimensionale che consente di determinare gli spostamenti e le deformazioni grazie all'individuazione di vari riferimenti superficiali in due immagini consecutive rappresentanti la superficie dell'oggetto in due istanti differenti della deformazione attraverso l'utilizzo di algoritmi di correlazione. Il primo frame rappresenta la superficie indeformata ed è definita come "immagine di riferimento", la successiva presenterà una deformazione e spostamento dei riferimenti nella direzione di applicazione del carico. Per sfruttare correttamente tale tecnica è necessario seguire tre fasi fondamentali:

1. Creazione di un pattern stocastico sulla superficie dell'oggetto in esame al fine di generare una distribuzione casuale di punti riferimento e quindi garantire il funzionamento dell'algoritmo di correlazione digitale. Per fare ciò si applica uno strato di vernice di colore nero che si posa sulla superficie sottoforma di goccioline o "speckles" in contrasto con lo sfondo per essere maggiormente identificabili;
2. Registrazione della prova di trazione con l'utilizzo di una telecamera digitale (nota come "videoestensimetro");
3. Estrapolazione di una certa quantità di frame, immagini digitali a vari stadi di deformazione.
4. Applicazione del software DIC-2D dotato di algoritmi di correlazione in grado di individuare i "subset" o "facet" presenti nelle due immagini consecutive a confronto e collegare quelli che si ripresentano in entrambe creando una corrispondenza biunivoca.

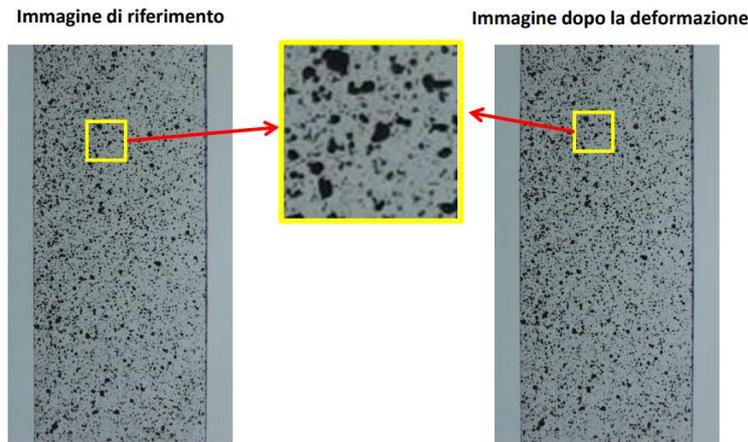


Figura 35. Pattern a speckles e stesso subset individuato prima e dopo deformazione

I subset sono gruppi di pixel che compongono l'immagine digitalizzata. Ogni pixel contiene un numero intero che indica il livello di luminosità, o meglio l'intensità del suo valore di grigio dove il numero totale di gradazioni dipende dal numero di bit dell'immagine digitale (2^N). La fase 1 elencata precedentemente permette di rendere diverse le intensità dei vari pixel in maniera casuale. Questi gruppi di pixel si ripetono sulla superficie sottoforma di sottomatrici quadrate e questa suddivisione virtuale dell'immagine viene introdotta poiché la tecnica DIC si basa sulla ricerca del massimo della correlazione tra le intensità dei pixel all'interno di esse. Identificando la correlazione massima tra i subset dell'immagine di riferimento e quelli dell'immagine deformata, si può ricavare lo spostamento subito dal punto centrale di quel subset [26]. Se la necessità di far corrispondere stessi punti tra le immagini di riferimento e quelle dopo deformazione si basasse unicamente sul confronto fra i singoli pixel e non su quello tra i subset non si assicurerebbe questa condizione poiché lo stesso livello di grigio di un pixel nella prima immagine potrebbe essere individuato più volte nella seconda o nelle successive immagini. I subset, al contrario, contenendo più pixel e quindi più informazioni assicurano una corrispondenza biunivoca poiché è impossibile che due o più subset di una stessa immagine abbiano la stessa distribuzione di intensità luminose [27].

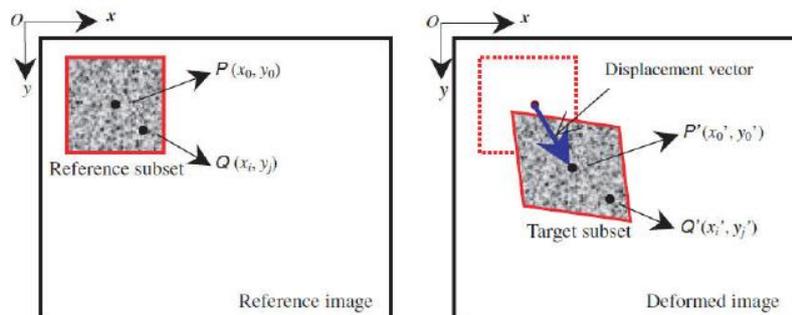


Figura 36. Stesso subset rintracciato nell'immagine di riferimento e in quella deformata definendo il vettore di spostamento del suo punto centrale

Nota lo spostamento di un subset e l'attuale posizione è possibile ricavare le deformazioni ϵ_x , ϵ_y e ϵ_{xy} .

CAPITOLO 2: STRUMENTAZIONE PER L'INDAGINE SPERIMENTALE

2.1 Caratteristiche e specifiche tecniche della strumentazione tomografica

2.1.1 HARDWARE: V|TOME|X S

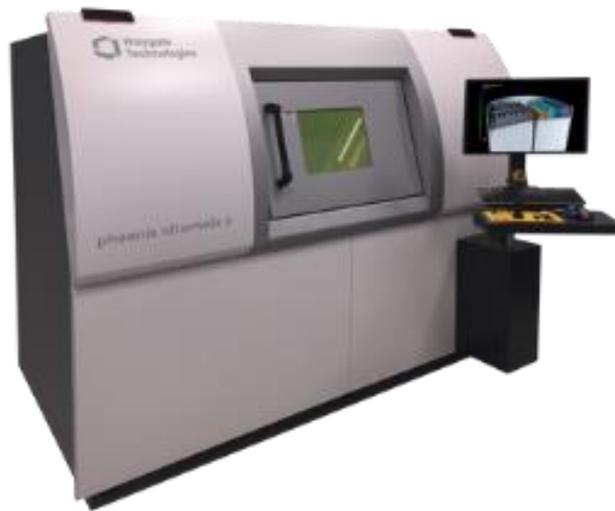


Figura 37. Phoenix v|tome|x S

Il tomografo computerizzato installato al laboratorio IAM del Politecnico di Torino è il **Phoenix v|tome|x S** della General Electric. Lanciato sul mercato per la prima volta nel 2003, è il primo microCT scanner da laboratorio ad alta prestazione. La nuova generazione di questa linea beneficia di migliori caratteristiche come versatilità e flessibilità combinando alta risoluzione, facilità di utilizzo e buon rapporto qualità-prezzo.

Tra i vantaggi in particolare vi sono: la grande affidabilità grazie a una durata di vita del filamento dieci volte maggiore, assicurando stabilità a lungo termine; maggiore velocità senza compromettere la qualità delle immagini; maggiore flessibilità dello scanner con possibilità di scegliere tra *offset scan* e *helix scan*. Viene utilizzato in diversi ambiti industriali e istituti di ricerca in tutto il mondo [28].

È di tipo microfocussato, quindi ha uno spot dell'ordine del micron. È costituito da un tubo radiogeno montato su struttura aperta, a microfoco di tipo direzionale a elevata potenza. Il tubo emette un segnale riflesso da un filo di tungsteno. Questa tipologia di tubo viene impiegata soprattutto per campioni con

un'elevata capacità di attenuazione dei raggi x. Infatti, grazie al buon rendimento dei raggi x generato da un segnale riflesso invece che trasmesso (utilizzato nei nanofocus), l'elevata energia del segnale riflesso permette di fornire la radiazione necessaria a penetrare il materiale. Di solito si utilizza un tubo microfocus quando un voxel di dimensioni maggiori di 15 micron è sufficiente per quel campione [29].

Il detector (o detettore) è una matrice digitale DXR in silicone amorfo e stabilizzata in temperatura. Possiede dimensioni pari a 1000x1000 pixel ovvero 200x200 mm (1 pixel=200 µm). Ha un elevatissimo range dinamico (superiore a 1000:1) e un ingrandimento 2x. Il range di tempo di esposizione (chiamato *detector timing* in fase di set-up) è compreso tra 33 ms e 5 s e ha una capacità di rilevamento di 14 bit che permette di migliorare la qualità delle immagini ai raggi x grazie a circa 65000 gradazioni di grigio [29].

Presenta un circuito chiuso di raffreddamento ad acqua. Utilizza una tensione massima di 240 kV a cui corrisponde una potenza di 320 W. È caratterizzato da un ingrandimento geometrico compreso tra 1,46x e 100x con grandezze rilevabili inferiori al micron e dimensione minima dei voxel di 2 micron.

Su un manipolatore metallico di precisione a 6 assi viene posto il campione a una distanza dal detector di 800 mm (FDD) e dal tubo a micro-fuoco che può essere compresa tra i 7 e i 545 mm (FOD).

Il campione da esaminare può avere una dimensione massima di 260 mm x 420 mm e pesare fino a un massimo di 10 kg.

Per l'acquisizione e ricostruzione delle immagini si utilizza il software *Phoenix datos|x* attraverso l'implementazione di una GPU (Graphics Processing Unit).

Per la fase successiva di post-processing e analisi dei dati, viene utilizzato *Volume Graphics VG Studio Max 3.4*.

Si riportano di seguito ulteriori informazioni tecniche e viste del sistema sopra descritto [30].



Top view and required space

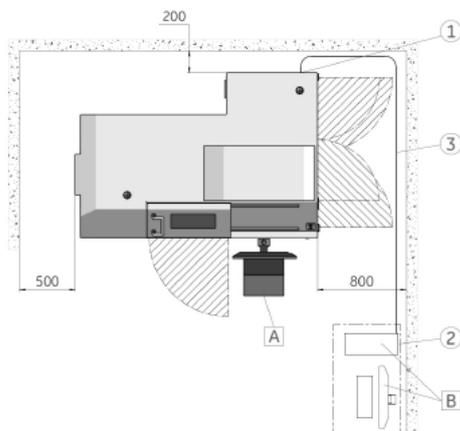


Fig. 12: Top view and required space

Item	Description
A	Control unit
B	Image reconstruction computer with monitor, keyboard and mouse (separate workstation required)
1	Power and compressed air connections (to be installed licensed owner side)
2	Network connection
3	Network connection from system to image reconstruction computer (10 m max), Network cable is included



Floor loading

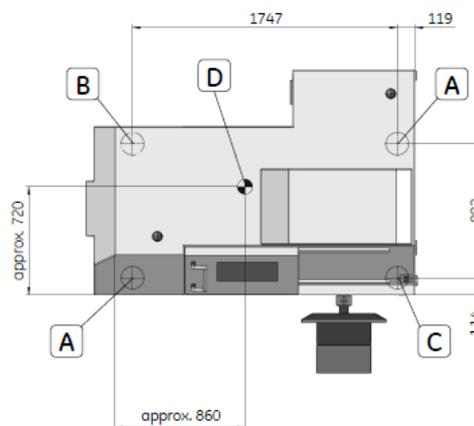


Fig. 13: Floor loading

Item	Description
A	Machine foot Ø 120 mm, max. 1500 kg each
B	Machine foot Ø 120 mm, max. 1600 kg each
C	Machine foot Ø 120 mm, max. 1300 kg each
D	Center of gravity of system (total weight about 2900 kg)

- Max. pressure due to machine feet approx. 140 N/cm²
- Max. level difference between the 4 supporting points is 8 mm
- Max. inclination of individual supporting points is 2 mm / 100 mm



3.2 General information

Description	Value	Unit
Total weight	approx. 2900	kg
Width	2170	mm
Height	1690	mm
Depth (excluding control console)	1500	mm

3.3 Connection ratings

Electrical

Description	Value	Unit
Voltage	230	V
Frequency	50/60	Hz
Max. power consumption	2000	VA
Fuse in supply line	10	A
Max. current during normal operation	8.7	A
Breaking capacity of circuit breaker in mains input	10	kA

2.1.2 SOFTWARE

2.1.2.1 Phoenix datos|x

Phoenix datos|x è il software dato in dotazione alla macchina tomografica descritta al paragrafo precedente ed è l'interfaccia che permette sia il suo controllo e settaggio (tramite la sezione “datos|x 2 acquisition”) sia la ricostruzione delle immagini acquisite (con “datos|x 2 reconstruction”).

2.1.2.1.1 Datos|x 2 acquisition

Installato sul computer a bordo macchina per la fase iniziale di settaggio delle impostazioni di scansione e per l'avvio della stessa, è l'interfaccia per il controllo integrato del sistema che comprende la sorgente a raggi x, il pannello e il manipolatore del pezzo da analizzare.

Tramite questa parte del software si effettua la “preparazione” del CT scan, una fase preliminare da compiere solo successivamente ad un'accensione avvenuta dopo un certo tempo di inutilizzo, ovvero calibrazione del detector, condizionamento del tubo, ecc. [31].

La fase di acquisizione vera e propria avviene in modo automatico così da minimizzare il tempo di lavoro dell'operatore e allo stesso tempo aumentare la ripetibilità e riproducibilità dei risultati.

Prima di avviare la scansione, l'operatore deve però posizionare il campione da analizzare e stabilire alcune impostazioni di scansione.

Durante l'acquisizione delle immagini possono essere utilizzati dei filtri per ridurre il livello di rumore e migliorare il contrasto delle scansioni. Nella tomografia industriale, consistono in sottili lamine di materiale dall'alto numero atomico come rame, piombo, ottone e altri metalli pesanti. Lo spessore dei filtri dipende dal numero atomico, dalle impostazioni di potenza dei raggi x e dal livello di filtrazione desiderato. La lamina viene interposta sul fascio di raggi uscente dalla sorgente per ridurre l'intensità di alcune particolari lunghezze d'onda del suo spettro e alterarne selettivamente la distribuzione. I filtri assorbono fotoni a bassa energia emessi dal tubo prima che questi raggiungano il pezzo ed essendo questa tipologia di fotoni quella maggiormente tendente alla dispersione, le immagini che si riescono ad acquisire risultano più pulite [17].

Una volta posizionato e fissato l'oggetto all'interno della struttura ed eventualmente aver posto un filtro nella sorgente, è necessario premere il pulsante di accensione dei raggi x sullo schermo. Non appena il fascio di raggi x si sarà stabilizzato, verrà visualizzata un'immagine del detector. Premendo su di essa, comparirà sullo schermo l'oggetto posto sul supporto.

Tramite un joystick è possibile manovrare la base su cui è fissato il pezzo verso destra, sinistra, avanti e indietro rispetto alla sorgente. Premendo sullo schermo il pulsante *Live* è possibile vedere in tempo reale gli spostamenti comandati. Stabilendo la distanza dell'oggetto dalla sorgente, viene definita la risoluzione. La risoluzione "spaziale", infatti, dipende da quest'ultima e dalla risoluzione del detector. Spesso, una risoluzione elevata è ottenuta a discapito di una riduzione dell'area di scansione. Quindi, è necessario cercare un compromesso tra le dimensioni del pezzo da scansionare e la risoluzione da utilizzare [17]. La risoluzione delle immagini ottenute, infatti, determinerà la dimensione finale del voxel del modello ricostruito in 3D, oggetto delle successive analisi.

In questi casi però una possibile soluzione consiste nell'utilizzo dell'opzione *multi|scan*. Così facendo, l'oggetto in esame viene suddiviso in due o più settori da scansionare, avvicinandolo alla sorgente e al contempo ottenendo una migliore risoluzione. Tramite dei pulsanti sullo schermo, si digita la coordinata *y* corrispondente alla prima posizione e si seleziona *Add position* sulla finestra dedicata al *multi|scan*. Allo stesso modo si procede con l'ultima posizione in *y*, opposta rispetto a quella scelta precedentemente, trasladando il pezzo lungo l'asse. Si clicca infine su *Complete* con cui il software della macchina calcola in automatico quante ulteriori sezioni/scansioni sono necessarie e suddivide le distanze in maniera identica.

Sempre sullo schermo, è possibile immettere voltaggio e corrente della sorgente desiderate durante la fase di acquisizione delle immagini. Per ottenere delle immagini pulite e con un buon contrasto, è importante utilizzare dei valori opportuni. Nel caso si immettessero valori errati, le caselle corrispondenti a voltaggio, corrente e potenza si colorerebbero di giallo, indicando così automaticamente l'errore.

Oltre ad inserire voltaggio e corrente efficaci, è possibile definire un corretto contrasto delle immagini, riducendo il rumore il più possibile, attraverso diverse impostazioni tra cui:

- *images*: numero di immagini da acquisire. Affinché si ottenga una buona qualità del risultato finale è importante che il numero minimo corrisponda alla larghezza dell'immagine in pixel;
- *skip*: immagini da scartare essendo le prime ad essere acquisite appena dopo una rotazione, quindi probabilmente imprecise a causa di eventuali oscillazioni nel caso in cui il pezzo non sia ben fissato;
- *timing*: definito come "integration time" (tempo di integrazione), è il tempo di acquisizione dedicato ad ogni immagine;
- *average*: definito come "number of integrations" (numero di integrazioni), è il numero di immagini tra cui fare una media per ottenere l'immagine finale in una determinata angolazione. Maggiore è il numero di integrazioni per immagine finale, minore è il rumore visibile e maggiore è il tempo necessario all'acquisizione globale.

Come si può notare, l'obiettivo è quello di ottenere un buon contrasto delle immagini e ciò può essere verificato tramite l'analisi dell'istogramma (già descritto al paragrafo 1.2.2.2) che viene visualizzato in anteprima sullo schermo premendo il pulsante *Histogram*. L'istogramma mostra i valori di grigio che caratterizzano un determinato numero di voxel dei dati acquisiti ed è caratterizzato tipicamente dalla presenza di un picco per ogni materiale presente nel componente analizzato e un picco per l'aria. Un istogramma ideale deve essere il più ampio possibile in modo che i picchi corrispondenti all'aria e ai materiali presenti siano ben distanziati e quindi maggiormente distinguibili. Successivamente, infatti, sul software di analisi dei dati acquisiti, è possibile manovrare più cursori sullo stesso istogramma per regolare il contrasto e l'opacità desiderate.

In particolare, osservando la Fig. 38, sulla finestra di dialogo di *Histogram* si notano tre sezioni differenti contenenti:

1. una panoramica generale che mostra la distribuzione dei valori di grigio nell'intera area disponibile in base al numero di bit utilizzato per rappresentare ogni pixel in un'immagine ("bit depth image");
2. i cursori indicanti i *threshold* per una regione d'interesse in particolare (ROI);
3. informazioni statistiche per l'analisi delle immagini, ovvero **Min**, **Max** (i cui valori di grigio determinano il **Range** dei valori di grigio), **Mean** (che insieme a Range determinano il valore di **Contrast**) e **Sigma** che è la deviazione standard. Ogni parametro è caratterizzato da due valori, il primo di riferisce all'immagine per intero, la seconda si riferisce alla sola regione d'interesse (ROI) [32].

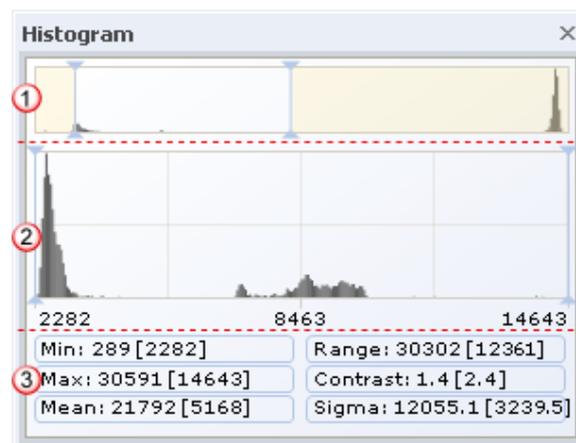


Figura 38. Finestra Histogram

Settando le opzioni precedentemente elencate è possibile modificare l'istogramma. Ad esempio, selezionando un tempo di acquisizione delle immagini elevato si otterrà maggiore ampiezza, ovvero maggiore contrasto, poiché il fascio di elettroni viene emesso per un tempo relativamente lungo che permette un suo progressivo assorbimento da parte del materiale che quindi impedisce il loro attraversamento e arrivo sul pannello retrostante. In tal caso, però, i tempi di scansione sarebbero

eccessivi anche per materiali come i polimeri che non necessitano livelli di penetrazione particolarmente elevati. Al contrario, selezionando un tempo di acquisizione troppo ridotto o altre impostazioni che rendono “stretto” l’istogramma, si ottiene bassa nitidezza poiché il fascio è troppo debole così da rendere difficile distinguere il detector dal pezzo stesso.

Ottenuto un istogramma soddisfacente, si seleziona il pulsante di avvio scansione. Il tempo necessario a completare l’intera operazione viene calcolato approssimativamente sulla base delle impostazioni scelte, alcune delle quali precedentemente descritte.

Man mano le immagini acquisite vengono raccolte dal software e trasmesse su un computer dedicato alla fase di ricostruzione di cui si occupa la parte del software denominata “datos|x 2 reconstruction”.

2.1.2.1.2 Datos|x 2 reconstruction

Le radiografie acquisite sono semplicemente proiezioni che vanno convertite in un volume 3D del pezzo in esame tramite una strategia di ricostruzione basata sul già citato “filtered-back projection algorithm” [21]. Infatti, l’insieme delle immagini ottenute durante la fase di scansione e salvate sottoforma di files all’interno del PC collegato al tomografo, sono definite come “raw data sets” le quali permettono la ricostruzione di ogni “cross section” con cui a loro volta viene creato il modello tridimensionale (procedimento descritto al paragrafo 1.2.2.1) [19].

Questa piattaforma di ricostruzione include una serie di opzioni per ottimizzare i risultati e ottenere maggiore qualità. Tra questi vi sono:

- *scan|optimiser*: per calcolare il centro geometrico di calibrazione e controbilanciare qualsiasi movimento del pezzo avvenuto durante la scansione;
- *Beam Hardening Correction (BHC)*: per rimuovere parti che subiscono errori causati dal fenomeno del *beam hardening* che può a sua volta provocare il *cone-beam artifact*, ovvero un fattore di influenza inerente alle scansioni con traiettoria circolare a fascio conico già discusso al paragrafo 1.2.2.3;
- *Multi|scan*: per eseguire l’eventuale ricostruzione dei due o più settori con cui si è stabilito nel precedente step di suddividere il pezzo per migliorare la risoluzione;
- *Image number/orientation*: per visualizzare l’oggetto con orientamento 0°, 90°, 180° e 270° e conseguentemente eliminare parti delle viste che non contengono il pezzo [33].

Il risultato finale avrà un formato tale da poter essere esportato successivamente su altri software di analisi 3D come VGStudioMax.

2.1.2.2 Volume Graphics VG Studio Max 3.4

Successivamente alla fase di scansione e ricostruzione volumetrica, è stato utilizzato il software **VG Studio Max 3.4** per eseguire la determinazione della superficie e le analisi relative ad un'indagine interna al volume del modello 3D.

VG Studio Max è un programma di analisi e visualizzazione di dati voxel dall'elevata precisione e rapidità di calcolo. Permette ispezioni visive interne al componente e offre strumenti di misura innovativi. Gli algoritmi metrologici di cui dispone sono stati testati dagli istituti nazionali PTB e NIST.

Oltre alle analisi metrologiche soddisfa i requisiti relativi al rilevamento e alla valutazione dei difetti, alle simulazioni meccaniche e alle proprietà dei materiali. I risultati forniti comprendono grafici approfonditi e report completi [34].

È in grado di determinare le superfici dei componenti scansionati dal CT scanner con una precisione del subvoxel (Fig.). Si possono selezionare varie opzioni per quanto riguarda l'assegnazione del valore di *threshold* che può avvenire sia manualmente che automaticamente. In particolare, il software dà la possibilità di creare parti individuali "Regions of Interest" o "ROIs" utilizzando funzioni di *clipping* in modo da restringere le analisi solo su di esse [35].

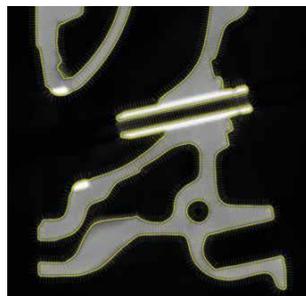


Figura 39. Surface Determination

a)



b)

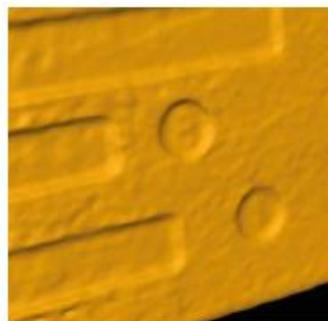


Figura 40. a) Difetti di determinazione della superficie dovuti ad una segmentazione basata sui voxel. b) Nessun difetto grazie alla segmentazione basata sui sub-voxel

Si possono selezionare varie opzioni per quanto riguarda l'assegnazione del valore di *threshold* che può avvenire sia manualmente che automaticamente.

Nel dettaglio, alcune tra le più importanti funzioni che si trovano nel pacchetto base sono i seguenti:

- Moduli per l'analisi metrologica:
 - *Coordinate Measurement Module* per misurazioni di superfici di un componente anche molto complesse da raggiungere;
 - *Nominal/Actual Comparison Module* per confrontare parti fabbricate con i loro modelli CAD, le loro mesh o altri dati voxel;
 - *Wall Thickness Analysis Module* per individuare spessore insufficiente o eccessivo delle pareti;
 - *Reverse Engineering Module* per la conversione delle scansioni ottenute con il CT scanner in modelli 3D da poter aprire su sistemi CAD.

- Moduli per la Simulazione:
 - *Volume Meshing Module* per convertire i dati forniti dal CT in mesh così da poterle utilizzare nelle simulazioni;
 - *Transport Phenomena Simulation Module* per la simulazione di flussi elettrici, termici o di fluidi;
 - *Structural Mechanics Simulation Module* per la simulazione delle tensioni meccaniche direttamente sui dati forniti dal CT.

- Ricostruzione volumetrica CT:
 - *CT Reconstruction Module* per la ricostruzione volumetrica tramite l'utilizzo delle immagini ottenute dalle scansioni del tomografo.

- Moduli per l'analisi dei materiali:
 - *Fiber Composite Materiale Analysis Module* per calcolare l'orientamento delle fibre e altri parametri rilevanti nei materiali compositi;
 - *Foam/Powder Analysis Module* per determinare la struttura a cella tipiche delle "foam";
 - *Digital Volume Correlation Module* per quantificare lo spostamento tra il volume prima e dopo deformazione;
 - *Porosity/Inclusion Analysis Module* per identificare difetti senza distruggere il pezzo [34].

Nel caso in esame, il *Porosity/Inclusion Analysis Module* è il modulo d'interesse che è stato utilizzato per raggiungere l'obiettivo proposto.

Questa funzione ispeziona i dati forniti sottoforma di voxel e localizza porosità, fori e inclusioni all'interno del componente. Fornisce informazioni dettagliate su ogni difetto individuato calcolandone

la posizione, le dimensioni, la geometria, la distanza rispetto ad una superficie di riferimento, la distanza rispetto al difetto più vicino, generando un vero e proprio report di analisi contenente informazioni e statistiche.

La procedura di analisi del difetto consiste in due step:

1. ogni voxel viene controllato per determinare se faccia parte di un difetto e così si creano gruppi di possibili difetti connessi fra di loro;
2. vengono controllati i parametri caratterizzanti ogni gruppo per confrontarli e vedere se coincidono con i parametri di ricerca dei difetti immessi dall'utente.

Inoltre, può mostrare come i pori verrebbero tagliati durante una lavorazione virtuale prima che questa venga effettivamente compiuta sul pezzo reale così da prevedere i punti critici ed evitare di creare tensioni al suo interno.

Esistono diversi algoritmi di analisi:

- *VGEasyPore* per una ricerca dei difetti più facile e veloce, basato sulla definizione relativa o assoluta del contrasto minimo locale dei pori: identifica i voxel come difetti basati sul valore locale di grigio reale del materiale in relazione ad un valore locale di threshold;
- *VGDefX*, il più sofisticato tra gli algoritmi per un calcolo ottimizzato, offre diversi criteri di probabilità attraverso cui individuare i difetti;
- *Only threshold* con cui ogni gruppo di difetti candidato è considerato difetto se il valore di grigio è al di sotto del *threshold* specificato;
- *From defect ROI*: l'analisi si concentra su una regione di interesse (ROI) che può essere definita manualmente e che si suppone contenga i possibili difetti, applicando i parametri di analisi ad ogni gruppo di voxel del ROI [36].

Selezionata la tipologia di algoritmo da utilizzare in base agli obiettivi richiesti dallo studio, è possibile modificare diversi parametri o lasciare quelli presenti di default e avviare il calcolo.

Conclusa l'identificazione dei difetti e delle loro caratteristiche, questi verranno evidenziati sul pezzo con i colori mostrati su una colonna a lato. Di default i difetti in rosso sono caratterizzati da volumi maggiori mentre quelli in blu da volumi minori (Fig. 41).

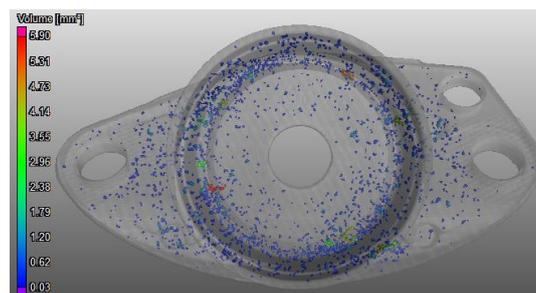


Figura 41. Esempio di risultato dell'analisi di porosità

Cliccando due volte sulla legenda si visualizza il report ottenuto dal calcolo effettuato. Su *Defects* i difetti possono essere ordinati in base al volume, al diametro, ai voxel, ecc ed è possibile cambiare il parametro in base al quale mappare i difetti.

Sempre dalla stessa finestra (“Properties of Porosity/inclusion analysis”) si accede a *Statistics* che mostra il volume del materiale, il volume complessivo dei difetti e la percentuale del volume dei difetti rispetto al volume di materiale presente.

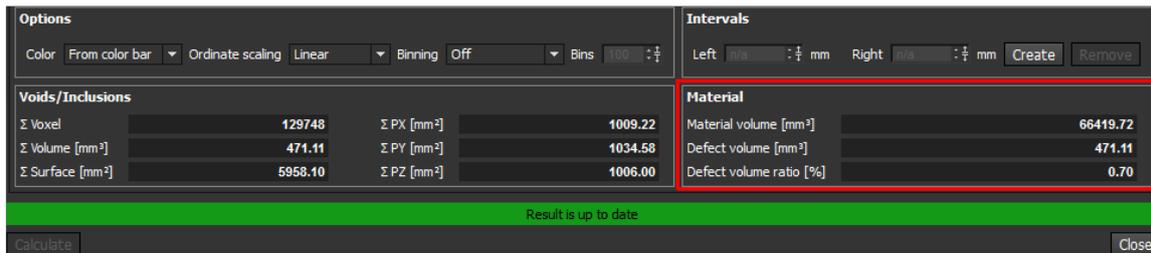


Figura 42. Finestra delle statistiche di difettosità

Inoltre, si possono creare etichette che indichino specifici difetti, ad esempio i primi tre dal volume maggiore o dal diametro maggiore e così via.

2.2 Attrezzatura per la stampa 3D dei provini di trazione

2.2.1 HARDWARE

2.2.1.1 3ntr A4v3

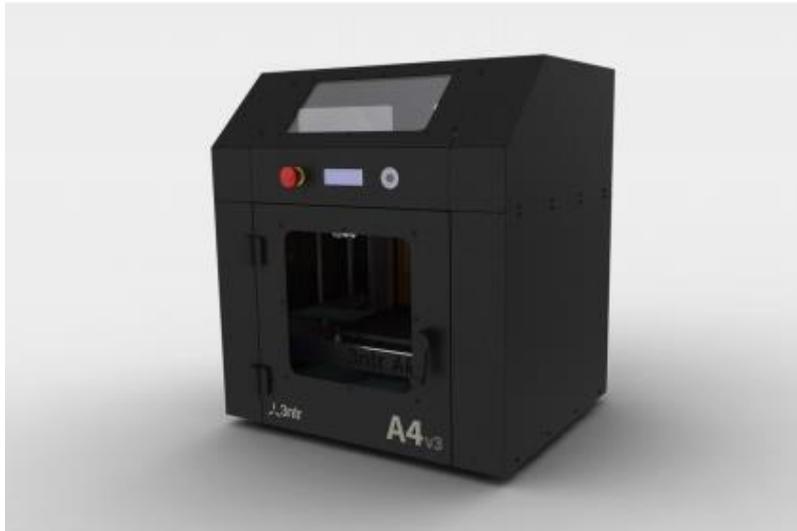


Figura 43. Stampante 3ntr A4V3

La stampante 3D utilizzata per realizzare i provini tramite la tecnica FDM o FFF è il modello A4V3 del marchio **3ntr**.

Tra quelle proposte dall'azienda, è la versione potente e compatta sviluppata per la ricerca e la produzione ed è ideale per stampe di precisione in velocità. Si tratta di una macchina costruita con lamiera inossidabile e costituita da componenti ad alta resistenza e con prestazioni sicure.

La camera è caratterizzata da un volume di lavoro pari a 300x200x200 mm e grazie al riscaldamento attivo e ai suoi 3 estrusori può stampare diversi polimeri, tra cui ABS, ABS ESD+, ABS HD, ABS FAST, PC ABS, PETG, ASA, ELASTO 85, ELASTO 95, zWAX, IGLIDUR, NYLON+, GLASS+, CARBON+, nPOWER. In particolare, l'ABS è il polimero più comune nella stampa 3D. Ha una buona qualità superficiale e può essere rifinito (sabbato, verniciato, incollato) oppure co-stampato con molti altri polimeri per ottenere parti funzionali. È possibile stampare più polimeri contemporaneamente. Il materiale da fondere all'interno degli ugelli si presenta sottoforma di filamento avvolto in bobine poste sulla parte posteriore della stampante come si vede in Fig. 44 [37].



Figura 44. Bobina posta nella parte posteriore della stampante

La temperatura degli estrusori viene mantenuta costante grazie ad un sistema di raffreddamento a liquido (con 410°C di temperatura massima).

Il piano di stampa mostrato in Fig. 45 è costituito da due parti: una base metallica e una piattaforma in carbonio removibile con aggancio magnetico, quindi, una volta raggiunta la temperatura ambiente, è semplice distaccare le stampe dal piatto [38].

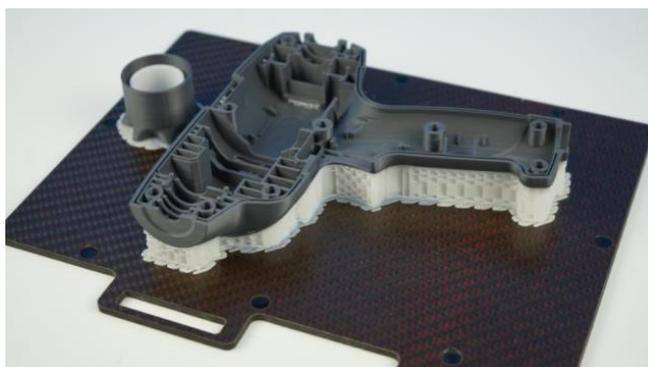


Figura 45. Piano di lavoro in carbonio

Sulla parte anteriore si trova un pannello LCD di controllo con cui intervenire in maniera comoda e veloce sui parametri della macchina. La schermata principale presenta dati effettivi come la temperatura degli estrusori, la temperatura del piano di stampa e la sua quota attuale (ovvero la distanza tra il piano e le punte degli estrusori), la regolazione attuale di velocità di stampa in percentuale rispetto a quella impostata, il tempo di stampa e una riga di stato in cui vengono visualizzate comunicazioni ed errori.

Premendo il bottone sulla rotellina accanto al pannello si accede al menu principale dal quale è possibile cambiare i parametri di funzionamento, muovere gli assi, dare il comando di preriscaldamento dei materiali presenti negli estrusori e del piatto, regolare la velocità di stampa, ecc [39].

Menu' principale

```
Guarda  
Prepara (Adatta)  
Controllo  
SD Card Menu (No SD card)  
Cambia SD Card (Iniz SD card)
```

Menu PREPARA

```
Menù principale  
Auto Home  
Muovi Asse  
Disabilita motori  
Preriscalda PIA  
Preriscalda ABS  
Preriscalda GOMMA  
Raffredda
```

Figura 46. Schermate pannello LCD di controllo

Altre caratteristiche tecniche di questo modello sono:

- Risoluzione massima: 0,05 mm
- Area di stampa massima: 300 x 200 x 190 mm
- Risoluzione assi: 0,015 mm
- Diametro ugello standard: 3 x 0,3 mm
- Velocità massima: 200 mm/sec
- T_{\max} ugello: 410°C
- T_{\max} piatto: 135°C
- T_{\max} camera calda: 70°C
- Peso: 32 kg

2.2.1.2 Filamento di ABS

L'ABS (Acrilonitrile, Butadiene, Stirene) è un polimero termoplastico ampiamente utilizzato nel settore industriale poiché presenta buone proprietà costruttive, alta resistenza meccanica ed elevata resilienza.

I monomeri che lo compongono sono:

- l'**acrilonitrile**: ha una buona resistenza termica e chimica e conferisce durezza;
- il **butadiene**: è resiliente e determina la resistenza e la duttilità della gomma;
- lo **stirene**: ha una buona rigidità, conferisce brillantezza ed è facilmente lavorabile.

È una plastica particolarmente robusta e con una resistenza agli urti che può variare tra i 105 J/m e i 640 J/m. Ciò consente il suo utilizzo per la stampa di parti di ricambio durevoli e resistenti a utilizzo e usura [40, 41].

La sua applicazione nel campo dell'Additive Manufacturing lo rende versatile, leggermente flessibile, molto leggero e durevole, con un'ottima rigidità e resistenza alle basse temperature. Inoltre, può essere facilmente post-lavorato, ad esempio grazie all'utilizzo di solventi per ottenere ottime finiture superficiali.

La bobina di filamento in ABS utilizzata è stata fornita dalla FILOALFA (Fig. 47). L'azienda produce il filamento con un diametro pari a 2,85 mm in 17 possibili colorazioni. Inoltre, fornisce una scheda tecnica contenente i valori dei parametri di processo consigliati per un corretto utilizzo e migliori risultati. In particolare, si suggerisce un preriscaldamento del piatto ad una temperatura nell'intorno dei 110°C, con ventilazione sospesa, una temperatura di estrusione compresa nell'intervallo 250°-290°C e una velocità di stampa nel range di 30÷60 mm/s [42].



Figura 47. Bobina di filamento in ABS

2.2.2 SOFTWARE

2.2.2.1 KISSlicer PRO

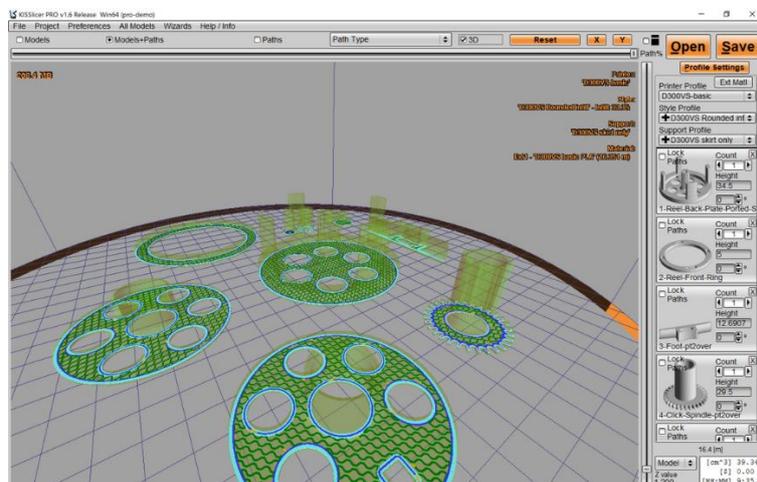


Figura 48. Schermata principale di KisSlicer

Per la fase di *slicing* del pezzo è stato utilizzato il programma **KISSlicer PRO**. Si tratta di una piattaforma in cui viene “affettato” il file in *.stl* d’interesse per poi essere salvato come file *.gcode*, estensione richiesta dall’interfaccia di stampa collegata alla macchina descritta nel paragrafo precedente [43].

Dopo aver caricato il modello 3D che verrà visualizzato sulla schermata principale, in basso è possibile modificare numerose impostazioni per ottenere lo *slicing* desiderato. Tra queste, quelle fondamentali si trovano nel tab “Style” in Fig. 49 e sono:

- *Layer Thickness*: spessore del layer in mm;
- *Extrusion Width*: larghezza di estrusione in mm (coincidente col diametro dell’estrusore);
- *Skin Thickness*: spessore delle pareti in mm;
- *Num Loops*: numero di perimetri esterni che vengono estrusi prima della fase di riempimento;
- *Infill*: densità di riempimento in %;
- *Infill Style*: strategia di riempimento da scegliere tra **Rectangular**, **Octagonal** e **Straight**;
- *Infill Extrusion Width*: larghezza di estrusione durante la fase di riempimento.

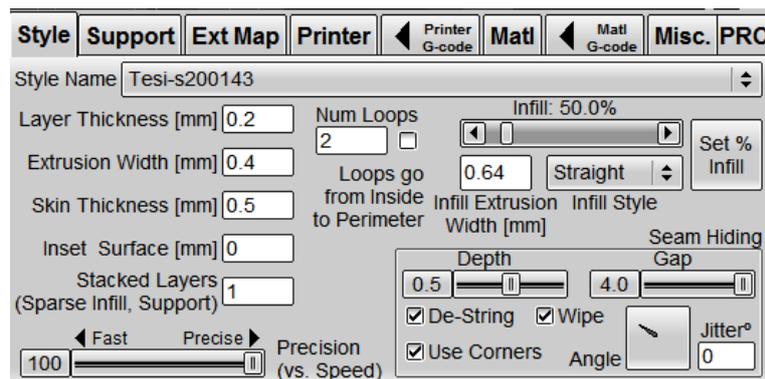


Figura 49. Tab "Style"

Vi sono anche altri generi di impostazioni, come quelli contenuti nel tab “Printer” dove vengono inserite le informazioni della stampante che verrà successivamente utilizzata (numero di estrusori, dimensione e posizione del centro del piano di stampa, punto sul piano da cui avrà inizio l’estrusione, ecc...).

Il tab “Matl” contiene le informazioni legate ai materiali inseriti nei diversi estrusori come il diametro del filamento, la temperatura di stampa, del piano e del primo layer (che dovrebbe avere una temperatura superiore ai successivi strati per una migliore adesione) e molte altre.

È inoltre possibile settare le impostazioni riguardanti i supporti del pezzo nel caso questi siano necessari. Si possono impostare parametri come la densità, la strategia di riempimento e la distanza tra il supporto e l’oggetto (*X/Y Gap*) [44].

Conclusa la fase di settaggio, si seleziona *Slice*. Il file *.stl* viene mostrato sulla schermata principale al di sopra di un piano di lavoro virtuale che in base alle informazioni fornite rappresenta quello reale della

stampante che verrà successivamente utilizzata. Cliccando su *Models+Paths* (modelli e percorsi) è possibile visualizzare il modello 3D strato per strato con le caratteristiche scelte tramite le impostazioni in precedenza descritte.

2.2.2.2 Repetier Host

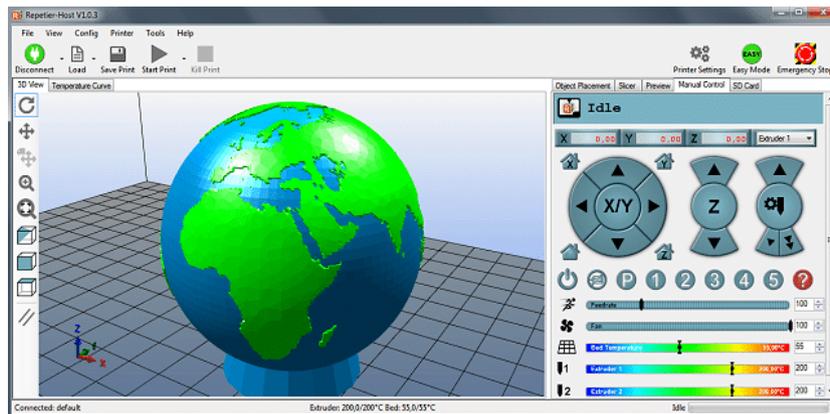


Figura 50. Schermata principale di Repetier-Host

Repetier Host è un programma per la gestione della macchina e preparazione della fase di stampa. Infatti, collegando la stampante al computer in cui è installato il software tramite cavo USB, è possibile dare dei comandi alla stampante **3ntr** direttamente da PC.

Al primo utilizzo, è necessario inserire le varie informazioni della stampante (come le caratteristiche degli estrusori e del piatto di stampa) e delle opzioni di funzionamento (come la disattivazione degli estrusori del piatto e dei motori dopo la stampa) tramite “Impostazioni stampante” [45].

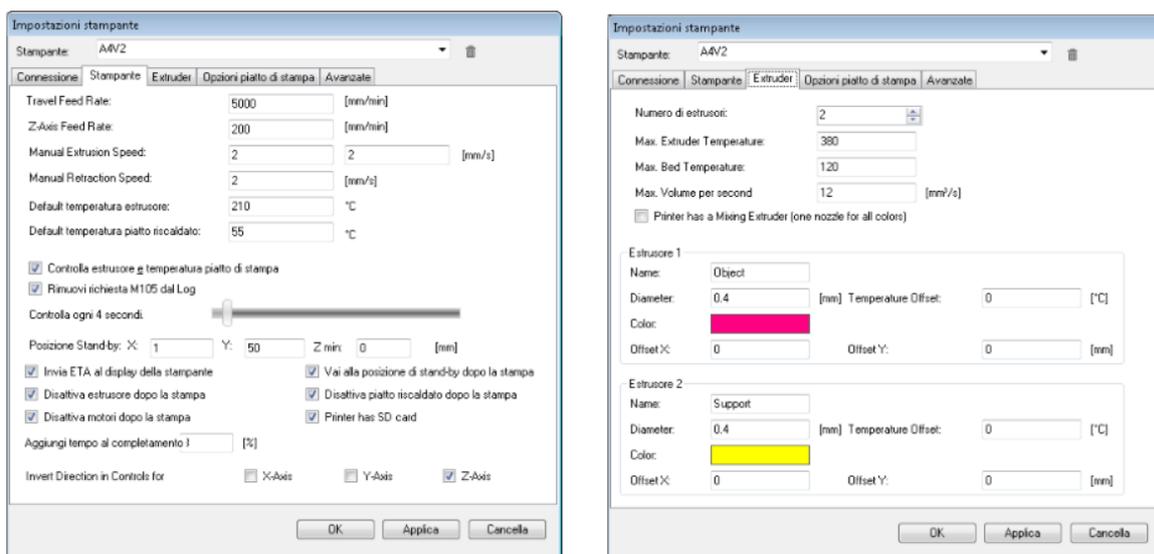


Figura 51. Finestra "Impostazioni stampante"

Dopo aver caricato il file *.gcode*, il quale viene visualizzato sulla piattaforma “virtuale” del software nella posizione stabilita durante la fase precedente, come prima cosa bisogna cliccare su *Connetti* in modo da collegare la stampante al programma.

I tasti di comando e quelli relativi ad altre impostazioni si trovano sulla destra della schermata. Tra questi vi sono: “Print preview”, “Editor G-Code” e “Controllo manuale”.

In “Print preview”, oltre al pulsante *Print* da cui avviare il job, vi sono le statistiche di stampa (il tempo stimato di stampa, il numero di layers, le linee totali e il filamento necessario) e delle opzioni per visualizzare i layer singolarmente.

Con “Editor G-Code” si può intervenire sullo script che caratterizza il file caricato, ad esempio modificando le coordinate nel sistema x-y-z della posizione di partenza dalla quale ha inizio l’estrusione del materiale.

Da “Controllo manuale” è possibile manovrare il piano di lavoro e gli estrusori tramite i pulsanti presenti. Sempre nello stesso tab vi sono informazioni riferite alla temperatura attuale dei vari componenti rispetto a quella a regime da raggiungere [46].

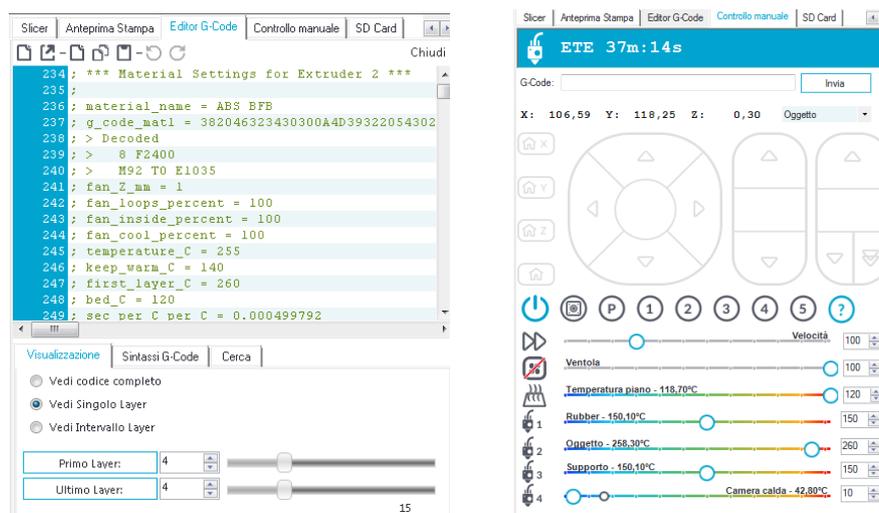


Figura 52. Schermata laterale di "G-Code Editor" e "Manual Control"

Per iniziare il processo di stampa, si seleziona il pulsante *Print*.

Una volta avviato lo stampaggio del pezzo, vengono visualizzati in tempo reale sia gli strati stampati sulla schermata centrale sia i grafici di temperatura a destra nel tab “Controllo manuale” (Fig. 52). Infatti, nel caso in cui l’estrusore o il piatto o entrambi non abbiano ancora raggiunto la temperatura di lavoro prefissata, il job non verrà avviato ma sarà possibile monitorare il loro andamento in tempo reale sullo schermo. Solo una volta raggiunta/e la/e temperatura/e desiderata/e il piano verrà traslato automaticamente alla quota 0 dell’asse z (verificato con una livella presente nella stampante che viene attivata automaticamente in questa fase) e l’estrusore si posizionerà secondo le coordinate di inizio stampaggio preimpostate.

2.3 Strumenti per la caratterizzazione meccanica

2.3.1 MACCHINA DI MISURA PER PROVE DI TRAZIONE



Figura 53. Macchina per prova di trazione EASYDUR AURA 10T

EASYDUR AURA 10T è la macchina di misura utilizzata per effettuare le prove di trazione e serve a determinare la resistenza a sollecitazioni statiche dei materiali sottoposti ad essa con acquisizione ed elaborazione dei dati tramite computer. Si tratta di un macchinario il cui funzionamento può essere di tipo manuale, semiautomatico o automatico e l'attuazione è di tipo servo-elettrica. La struttura è autoportante ed è composta da due colonne di sostegno con viti a ricircolo di sfere ma nonostante la movimentazione avvenga tramite queste ultime, l'elettronica consente cicli di stress a profilo sinusoidale per preservare la macchina e raggiungere notevoli prestazioni. La motorizzazione avviene in corrente continua e vi è un encoder a riga ottica. Utilizzata per prove ad alto carico, è dotata di tre celle di carico montate con i rispettivi tre set di pinze idrauliche automatiche per effettuare le prove di trazione, ciò la rende una macchina versatile e adatta alle varie esigenze dell'operatore. Le portate delle celle di carico sono abbinabili a piacere (fra 100 N e 1000 kN) e sono protette dal sovraccarico anche se non sono in utilizzo. Esse vengono selezionate tramite il software installato sul terminale a bordo macchina dotato di sistema operativo Windows 10 e di touch screen. Grazie al software EASYQS basato su più schede, la frequenza di lettura delle celle di carico è pari a 1000 Hz con una risoluzione minima di 32700 divisioni. Il programma è sviluppato da Easydur e consente una gestione interna di statistiche e certificati in formato Excel modificabili dall'operatore. Anche la velocità della prova è programmabile e inoltre, gli spostamenti hanno una precisione pari a 0,003 mm. La tabella sotto riportata mostra ulteriori caratteristiche tecniche della macchina (Tab. 1) [47].

AURA TENSILE	100 kN
Force kN	100
Number of guide columns	4
Number of ball screw	2
Height (cm)	210
Width (cm)	111
Depth (cm)	87
Weight (kg)	680
Vertical Test space (without Grips) [mm]	1200
Horizontal Test space	512
Testing speed Range min max (mm/min)	0,005 - 484
Position control resolution	± 1 µm
Frame axiale stiffness (kN/mm)	275
Force measurement accuracy Precision class	Class 0.5 from 1% of load cell capacity / Class 1 from 0.2 % of load cell capacity as EN ISO 7500-1
Displacement measurement accuracy	± 5 µm
Testing speed accuracy	(+/-) 0,1%
Calculated resolution (for example in tensile / compression direction)	24 bits
Data acquisition rate, internal	10 kHz
Data Acquisition Rate at the PC	1 kHz
Controller /Cycle Time	1 kHz
Power supply	Single Phase Voltage: 230 VAC +/- 10%; 50 - 60 Hz Three Phase Voltage: 480 VAC +/- 10%; 50 to 60 Hz. Power supply must be free of spikes
Operating Temperature	(+10 to + 38 °C)
Storage Temperature	(-40 + 66 °C)
Humidity Range	(+10 + 90 %)
Interface for PC	Ethernet
Drive System	AC Servo motor Brushless
Noise level at maximum test speed (dBA)	<75

Tabella 1. Informazioni tecniche EASYDUR AURA 10T

2.3.2 STRUMENTAZIONE DIC (DIGITAL IMAGE CORRELATION)

Il sistema di monitoraggio utilizzato durante la prova di trazione per sfruttare la tecnologia DIC comprende una telecamera ad alta risoluzione ed un software DIC-2D su cui viene caricato il filmato registrato al fine di analizzare localmente le deformazioni subite dal provino.

2.3.2.1 Telecamera



Figura 54. Telecamera Svpro, modello SV-USBFHD06H-SFV

Prima di avviare la macchina di prova descritta al paragrafo precedente, è stata utilizzata una telecamera USB di marca Svpro del modello SV-USBFHD06H-SFV. La ragione per cui è stata scelta risiede nel fatto che essa costituisce un compromesso tra la risoluzione e il costo. È dotata di un sensore Sony IMX322 e viene fornita con l'obiettivo varifocale regolabile da 5 a 50 mm di dimensione 1/2.9". Può acquisire immagini con una risoluzione di 2 Megapixel e generare immagini Full HD, ovvero 1920 x 1080 pixel. Il costo della fotocamera è di circa 85 euro e la messa a fuoco è regolabile manualmente [48].

2.3.2.2 Software DIC: GOM Correlate

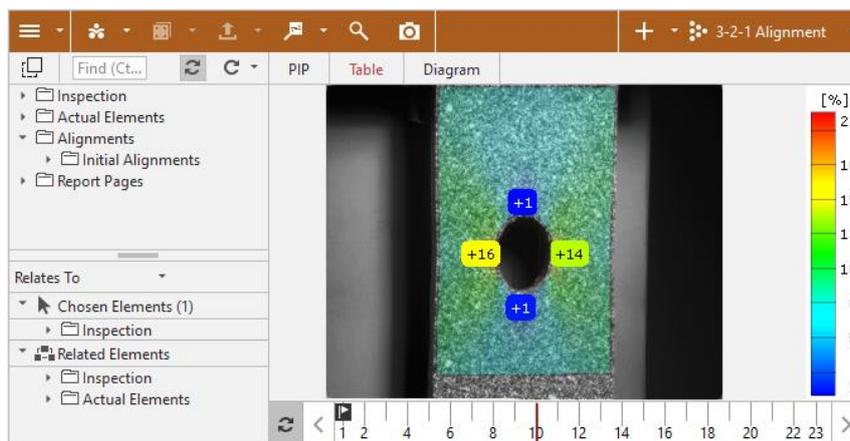


Figura 55. Schermata principale GOM Correlate

GOM Correlate è un software di correlazione digitale delle immagini per la misura delle deformazioni attraverso il riconoscimento dello spostamento dei singoli pixel. Programmi come questo, permettono di eseguire misurazioni senza il contatto di sensori che con le loro caratteristiche fisiche potrebbero influenzare i risultati. Gli algoritmi di correlazione presenti in GOM Correlate analizzano i *facet*, ovvero

gruppi di pixel individuati sulle immagini importate. Per facilitare questo passaggio, è necessario trattare la superficie dell'oggetto in esame con una vernice spray stesa su di essa sottoforma di goccioline in modo da creare un *pattern*, un motivo casuale il cui colore sia in contrasto con quello del materiale del componente. In questo modo gli algoritmi riconoscono l'immagine globale caratterizzata dalla disposizione casuale delle goccioline prima che il componente subisca trazione, e riescono a definire spostamenti e deformazioni in base al cambiamento di posizione delle goccioline analizzando la sequenza delle immagini. Dal video ottenuto tramite la telecamera descritta nel paragrafo precedente, vengono estratte le immagini dei singoli frame semplicemente importandolo nel programma. In questo modo, il programma crea automaticamente una timeline contenente tutti i suoi fotogrammi. Successivamente, si crea tramite una funzione del software la superficie su cui si vogliono eseguire i calcoli. Il software trova i *facet* sulla superficie acquisita attraverso il pattern stocastico creato in precedenza ed è possibile migliorarne la qualità modificando la dimensione dei *facet* e la distanza tra i centri di ognuno di essi. I valori di default corrispondono a 19x19 pixel e 16 pixel rispettivamente per le dimensioni e la distanza tra i *facet*. Aumentando la dimensione dei *facet*, ad esempio, si ottiene una maggiore precisione di misura ma anche un aumento del tempo di calcolo e un rilevamento peggiore degli effetti locali. Diminuendo la distanza, invece, si ricava una maggiore densità di punti ed un rilevamento migliore degli effetti locali ma a discapito anche in questo caso di tempi di calcolo più lunghi. Dopo il calcolo del componente superficie, da ogni *facet* calcolata valida, risulta un punto di misura. Il software combina tutti i punti di misura calcolati sul componente superficie e traccia quest'ultimo in ogni stadio presente nella timeline. In questo modo, attraverso le funzioni "Controllo di tutti gli elementi effettivi visibili", il software può calcolare automaticamente varie grandezze come spostamenti e deformazioni lungo gli assi [49].

CAPITOLO 3: METODOLOGIA D'INDAGINE

3.1 Produzione dei provini

I provini realizzati con tecnica FDM sono stati precedentemente progettati su un software CAD sulla base della normativa ASTM D638 che fornisce le linee guida da seguire per condurre correttamente le prove di trazione su campioni composti da materiale polimerico. Le dimensioni rispecchiano quelle indicate dal provino di tipo I della normativa e sono riportate in Fig. 56. Si tratta di un provino a sezione rettangolare con spessore 3,2 mm [50].

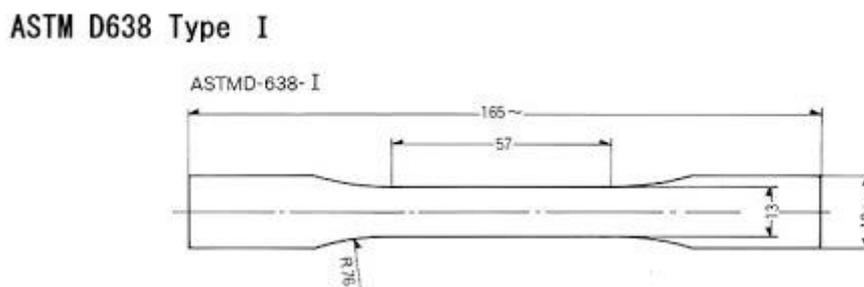


Figura 56. Dimensioni del provino tipo I ASTM D638

Il file in formato *.stl* del provino descritto, già presente nel computer del laboratorio utilizzato per questa fase iniziale, è stato caricato all'interno del software **KisSlicer**, descritto al paragrafo 2.2.2.1 e il cui utilizzo è consigliato dai produttori della stampante 3ntr collegata al computer. Prima di effettuare lo *slicing* necessario al processo di costruzione, sono stati definiti diversi parametri di stampa, tra cui il materiale inserito nell'estrusore nel tab "Matl" (Fig. 58), la strategia e la percentuale di riempimento (entrambi nel tab "Style" in Fig. 58). Altri parametri come lo spessore di ogni layer (pari a 0,2 mm) e le temperature di stampa sono stati impostati di default in quanto già utilizzati in precedenza per lo stesso scopo e adatti alla tipologia di materiale utilizzato. L'ABS, caricato sul secondo dei tre estrusori della stampante, è stato selezionato come materiale di costruzione per tutti i provini prodotti. Per quanto riguarda le caratteristiche di riempimento, invece, sono state determinate 7 differenti tipologie di provino distinti in base alle tre strategie disponibili sul software (Rounded, Octagonal e Straight) e alle percentuali 25%, 50% e 100% dove quest'ultima è realizzabile unicamente in combinazione alla terza strategia precedentemente elencata. Infatti, uno degli obiettivi di tale studio, consiste nel valutare l'influenza di questi ultimi due parametri di processo sulle proprietà meccaniche che caratterizzano ogni provino. Le caratteristiche dei provini sono riportate in Tab. 2.

Considerando che nel caso di un provino il grado di finitura superficiale è da considerarsi un aspetto marginale, si è scelto di non utilizzare supporti. Viene posizionato orizzontalmente sul piano di lavoro

del software, in questo modo una delle due superfici aderisce direttamente al piano di lavoro, rendendola irregolare.

Successivamente, cliccando il pulsante “Slice” è stato effettuato lo *slicing* che è possibile verificare con l’opzione “Modelli e percorsi” che permette di osservare come verrà creato il componente strato per strato (Fig. 57). Il procedimento descritto è stato ripetuto per ogni provino.

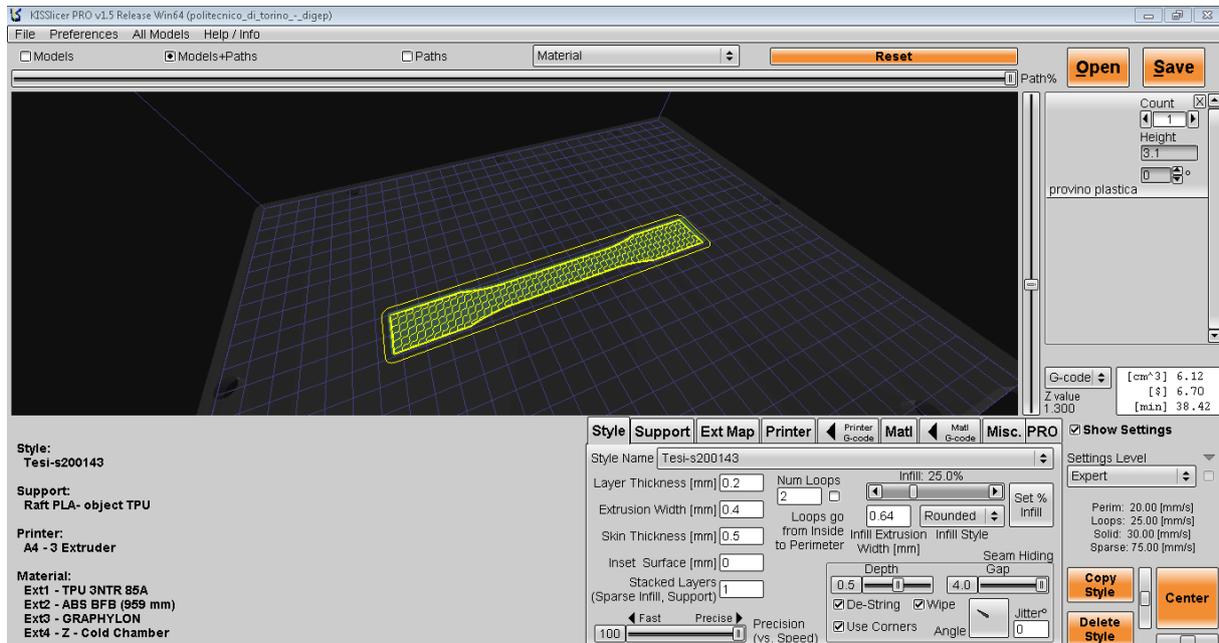


Figura 57. Schermata KisSlicer per provino 25% Rounded

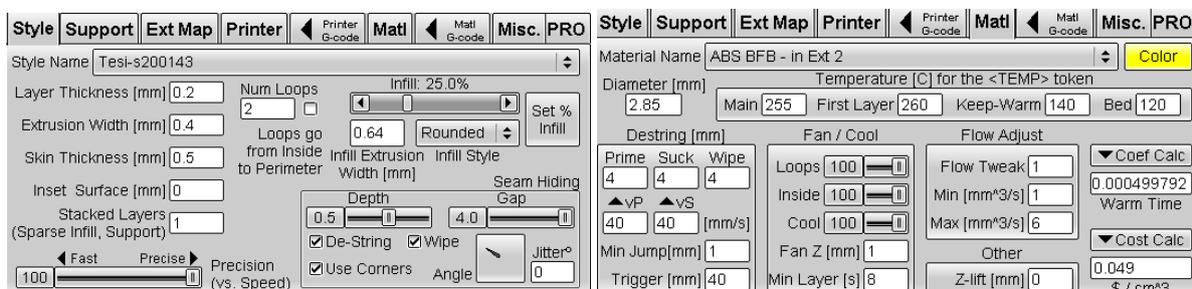


Figura 58. Impostazioni utilizzate nei tab "Style" e "Mati"

I file contenenti i provini a cui sono state assegnate le caratteristiche descritte sono stati salvati nel formato *.gcode* per poter essere visualizzati e interpretati dal secondo software di preparazione di stampa: **Repetier-Host**. Quest’applicazione interfaccia il computer alla stampante in modo tale da poter impartire su quest’ultima comandi e controllare i parametri di processo (sia geometrici che termici), il tempo di realizzazione e altre impostazioni direttamente da PC. Aprendo ogni provino volta per volta in Repetier-Host viene caricato il codice “G-Code” che era stato generato col software precedente effettuando lo *slicing* e in cui sono contenute le istruzioni necessarie alla realizzazione del pezzo. La prima operazione da compiere è quella di connettere la stampante al programma tramite il tasto “Connetti”. Con l’opzione “Vedi Singolo Layer” nella sezione “Anteprima Stampa” è possibile osservare il percorso di stampa di ogni strato, così da verificarne la correttezza ed eventualmente

modificare il percorso (ad esempio la posizione sul piano di inizio estrusione) attraverso il tab “Editor G-Code”. Sempre in “Anteprima Stampa” si notano le statistiche di stampa, tra cui la lunghezza del filamento necessario, il numero degli strati e il tempo di stampa stimato senza tener conto di quello richiesto per il riscaldamento della piattaforma. Tutti i provini sono composti dalla sovrapposizione di 15 strati. Il tempo di realizzazione è dipeso dai parametri di processo scelti ed è riportato per ogni provino nella tabella sottostante (Tab. 2).

Provino	Percentuale di riempimento	Strategia di riempimento	Tempo approssimativo di realizzazione
1	25%	Rounded (R)	33m:39s
2	50%		42m:25s
3	25%	Octagonal (O)	33m:43s
4	50%		43m:6s
5	25%	Straight (S)	33m:8s
6	50%		40m:20s
7	100%		1h:6m:14s

Tabella 2. Caratteristiche dei provini realizzati

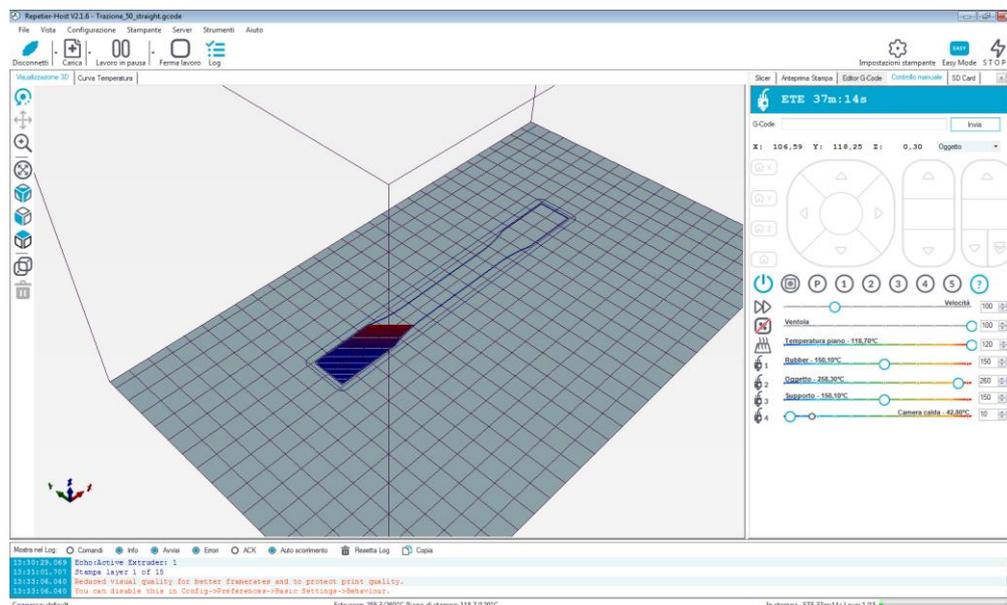


Figura 59. Interfaccia Repetier-Host durante la stampa di un provino

Come si nota dalla Fig. 59, nel G-Code è anche presente l’istruzione di stampa di un solo strato di un contorno rettangolare al di fuori del provino, estruso prima che la costruzione di quest’ultimo venga effettivamente avviata. Questa operazione evita la formazione di gocce o altri eccessi di materiale sul

provino nella fase iniziale di stampa che potrebbero compromettere la corretta realizzazione di ogni strato.

Prima di avviare la stampa, è stata preparata la macchina direttamente con l'uso dei pulsanti a lato del suo schermo LCD affinché venissero raggiunte le temperature corrette del piano di lavoro (120 °C) e dell'estrusore contenente il filamento di ABS (255 °C). Le operazioni sulla macchina, in realtà, sono state effettuate prima di agire sul software in modo da ridurre i tempi morti. In questo modo, dopo aver premuto "Stampa" sul PC, non c'è stato il bisogno di attendere troppo tempo prima che venissero raggiunte le condizioni necessarie per l'avvio del job.

Sono stati realizzati due provini per tipologia ad eccezione dei provini "4" e "6" di cui si dispongono tre copie e "7" con quattro copie.

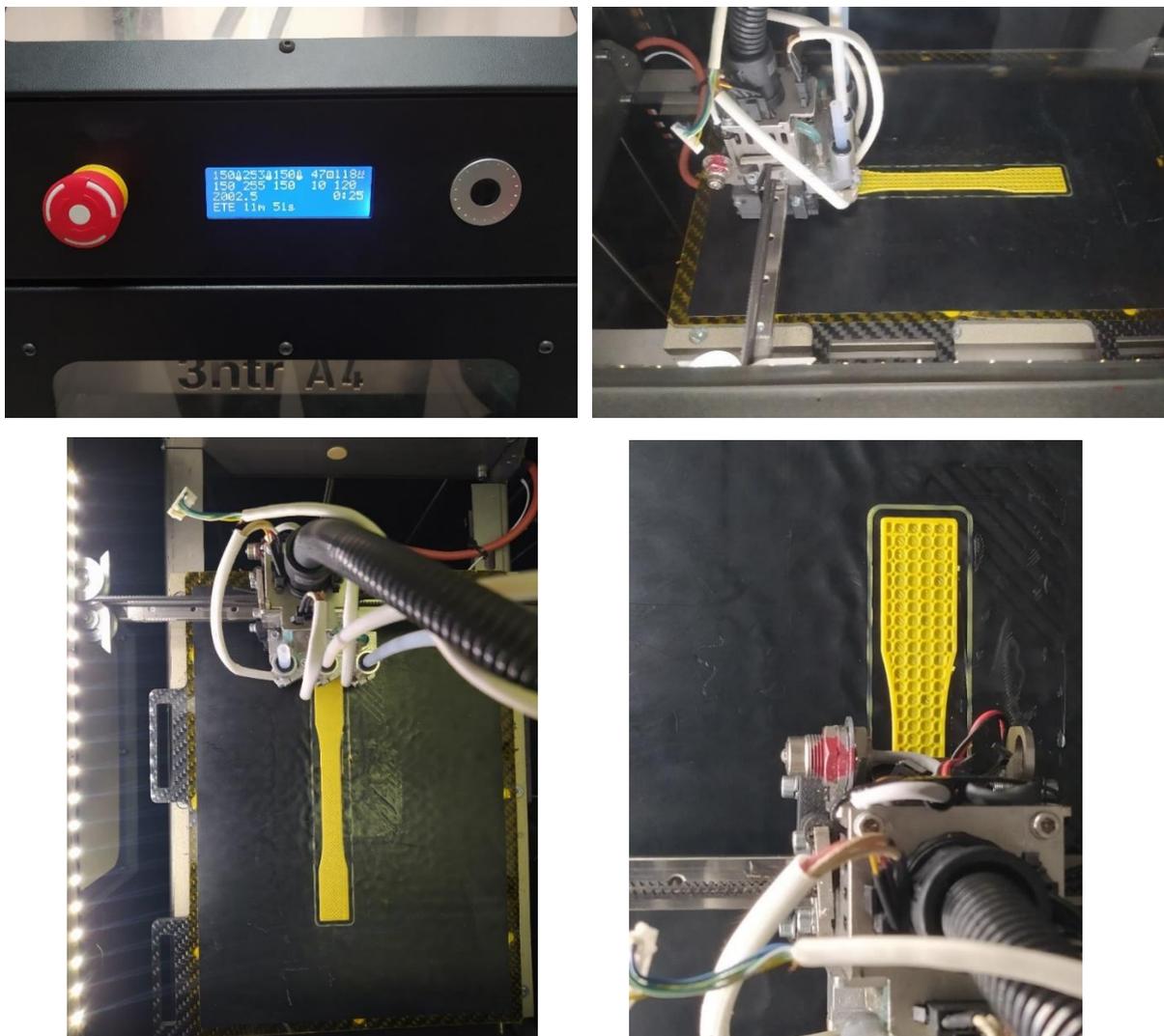


Figura 60. Stampa di un provino

3.2 Acquisizione dei dati tomografici

L'acquisizione dei dati relativi alla composizione interna dei provini è stata ottenuta inserendo ognuno di essi all'interno della macchina tomografica **Phoenix v|tome|x S** descritta al paragrafo 2.1.1. L'impiego della macchina è limitato al solo personale specializzato e autorizzato in quanto basato su un sistema a raggi X potenzialmente pericoloso per i non esperti.

Il provino è stato fissato da una delle due estremità nel mandrino a ganasce montato sul piatto girevole tra la sorgente e il detector (Fig. 61). Infatti, le cosiddette “teste di serraggio” tipiche del provino ad osso di cane non sono soggette alla prova di trazione successiva - che teoricamente ha valenza solo nel caso in cui la rottura del provino avvenga all'interno della parte centrale - ma hanno come unica funzione quella di facilitare l'afferraggio da parte delle pinze idrauliche della macchina di prova. Per questo motivo le teste del provino sono state escluse dall'analisi tomografica.

Prima di attivare il tubo radiogeno, è stato inserito su un apposito alloggiamento di fronte alla sorgente un filtro costituito da una sottile lamina in rame spessa 0,1 mm (0,1Cu) con lo scopo di ridurre il livello di rumore e migliorare il contrasto delle immagini.

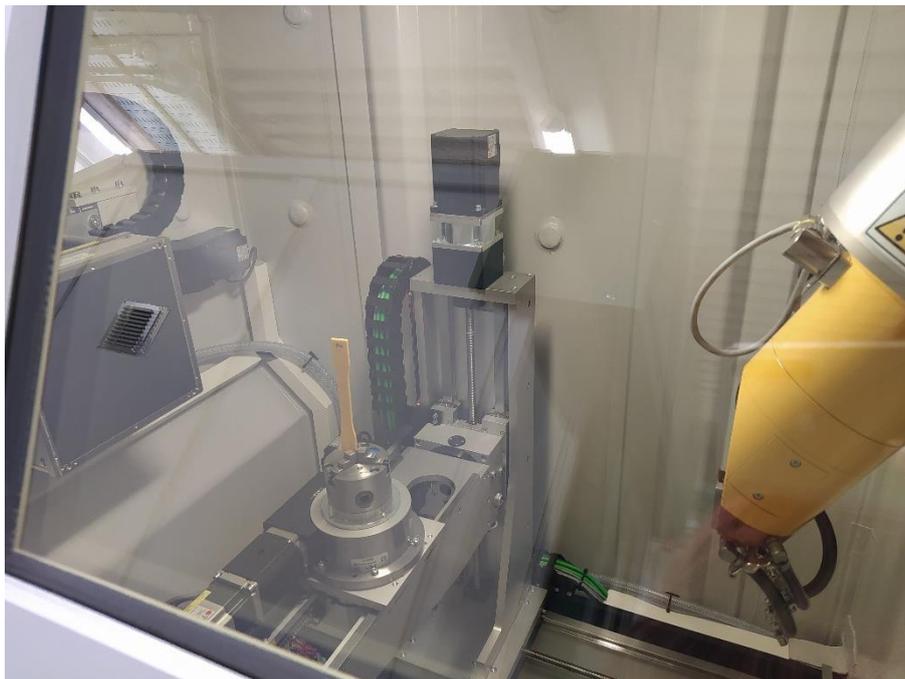


Figura 61. Interno della macchina tomografica

Chiuso ermeticamente lo sportello visibile in Fig. 61 e Fig. 62, è stata attivata la sorgente di raggi X dal pulsante “On” sullo schermo nella sezione “X-ray control” del software **datos|x acquisition** sul terminale a bordo macchina. Cliccando sul pulsante “Live” è stato possibile visualizzare sullo schermo il provino in modo da centrarlo più facilmente rispetto alla direzione del fascio tramite il joystick e i tasti a levetta sul quadro di comando.



Figura 62. Terminale a bordo macchina per l'utilizzo di datos|x acquisition

Prima di determinare la posizione definitiva da assegnare a tutti i provini affinché venissero scansionati, sono state eseguite diverse prove. Come primo tentativo, si è scelto di porre il provino ad una distanza dalla sorgente tale che l'intera parte centrale fosse sottoposto al fascio. In questo modo, si otteneva un ingrandimento geometrico pari a 1,92 e una risoluzione di $104,16 \mu\text{m}$ (corrispondente alla dimensione di un lato del voxel o "voxel size"). Le scansioni ottenute dopo la fase di ricostruzione, come si può osservare da Fig. 63, sono apparse poco definite, quasi sfocate.

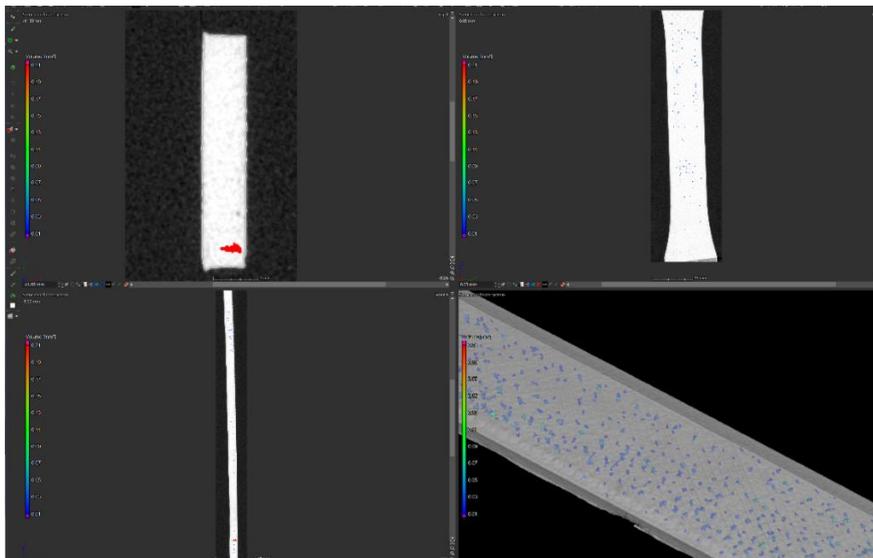


Figura 63. Risultati visualizzati con VG Studio Max del primo tentativo di scansione sul provino 2_1

Tale risultato non permetteva una corretta analisi delle porosità, per questo si è scelto di migliorare la risoluzione di scansione avvicinando il provino alla sorgente. Così facendo, è divenuto necessario

ricorrere alla funzione *multi-scan* del tomografo, usata per acquisire due o più scansioni parziali adiacenti di un oggetto oblunco. Sono stati effettuati altri due tentativi sempre con lo stesso provino:

- a) con ingrandimento 3,426 (FOD=236,518 mm e FDD=810,402 mm) e risoluzione 58,37 μm
- b) con ingrandimento 5,678 (FOD=142,736 mm e FDD=810,402 mm) e risoluzione 35,23 μm .

In entrambi i casi, prima di selezionare l'icona *multi-scan*, è stato traslato verticalmente il provino in quella che sarebbe stata acquisita automaticamente come posizione di partenza, che nel caso in esame corrisponde all'estremità superiore con $y = -70,804 \text{ mm}$ (non corrispondente alla testa di serraggio ma all'arco di raccordo come si può notare da Fig. 65). Acquisita la prima posizione, il provino è stato traslato verso l'alto in modo da posizionarsi sull'altra estremità e cliccando su "Add pos" è stata acquisita la seconda e ultima posizione a $y = -25,041 \text{ mm}$. Infine, selezionando "Complete", viene determinato automaticamente in base alla distanza tra la sorgente e il campione il numero di settori richiesti e quindi le acquisizioni necessarie affinché vengano successivamente unite per creare un'unica scansione del provino per intero. Nel caso a) è stata eseguita una suddivisione del provino in due settori e nel caso b) in quattro.

Il confronto tra i due casi è stato valutato inserendo per entrambi le stesse impostazioni di scansione che saranno descritte successivamente. Naturalmente, il tempo previsto per il completamento dell'operazione di scansione risulta superiore nel caso b) aggirandosi intorno a 1 ora e 30 minuti contro i circa 40 minuti del caso a).

Successivamente alla fase di scansione e ricostruzione dei modelli volumetrici, questi sono stati analizzati sul software VG Studio Max il cui utilizzo sarà descritto nel dettaglio nel paragrafo 3.4. Osservando i provini più attentamente, come si può notare dalle Fig. 64, non si è notata una sostanziale differenza tra i due in termini di risoluzione e precisione dei dettagli.

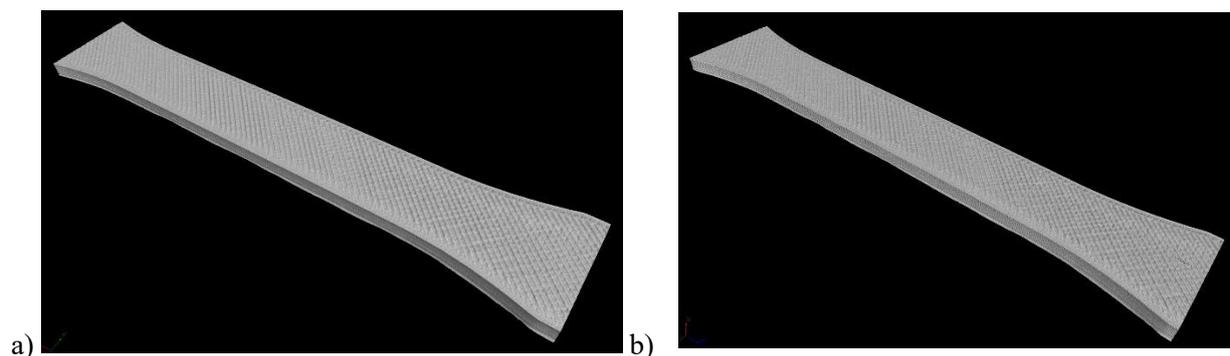


Figura 64. a) Risultato caso a con 2 settori; b) Risultato caso b con 4 settori

Inoltre, lanciando una rapida analisi di porosità, i risultati inerenti all'identificazione dei difetti non hanno riportato differenze significative. Infatti, il rapporto tra il volume dei difetti e il volume totale nel caso b) è solo leggermente superiore a quello del caso a).

Per questi motivi e considerando anche il tempo di scansione come fattore decisionale, si è scelto di applicare su tutti i provini le condizioni espresse per il caso a).

Affinché il procedimento di scansione fosse ripetibile, è stata salvata la posizione iniziale in modo da potervi accedere dall'icona "Move to" e selezionando "Acquire position".

Le impostazioni con cui sono state acquisite le proiezioni sono state settate sulla base della regolazione e aggiustamento dell'istogramma che contiene i valori di grigio contenuti dall'immagine. Come già espresso al paragrafo 2.1.2.1.1, un istogramma ideale deve essere il più ampio possibile in modo che i picchi corrispondenti all'aria e al materiale siano ben distanziati e quindi maggiormente distinguibili. Scegliendo una determinata combinazione di impostazioni di acquisizione, si è cercato di ottenere l'istogramma desiderato con l'obiettivo di regolare il contrasto e l'opacità delle immagini.

Il voltaggio e la corrente sono stati settati rispettivamente a 160 kV e 160 μ A (Fig. 65).

È stato scelto di acquisire 800, 900 o 1000 immagini (*images*) in base all'inclinazione con cui è stato fissato ogni provino sulla piattaforma in quanto il detector in larghezza è costituito da 1000 pixel e ogni provino non ha occupato sempre per intero lo spazio lungo quella dimensione. Scegliendo meno immagini da acquisire è stato ridotto il tempo necessario alla scansione.

Inoltre, per quanto riguarda i parametri legati al detector, è stato definito un tempo di integrazione di 200 ms (*timing*) con il quale acquisire ogni immagine, un numero di integrazioni pari a 3 (*average*) e un numero di *skip* uguale a 4 (vedi Fig. 65).

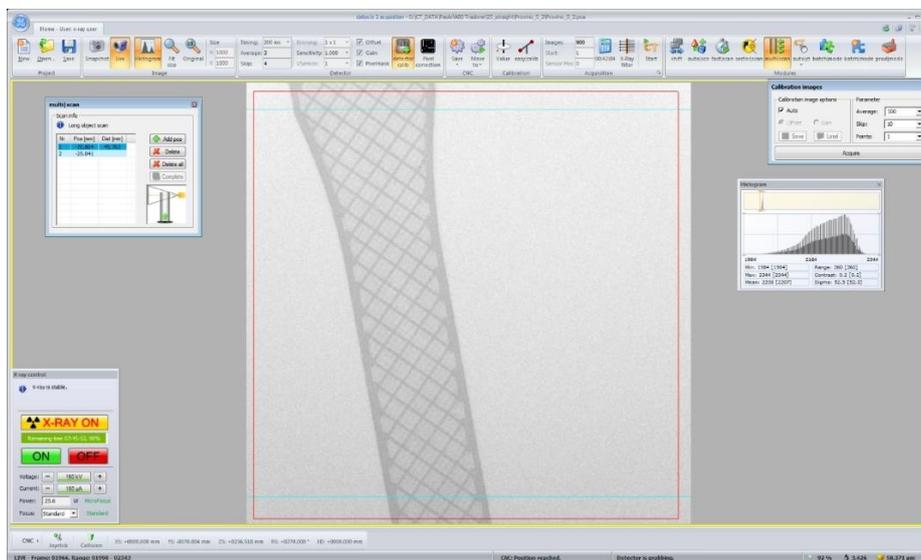


Figura 65. Schermata datos|x acquisition con i parametri impostati (esempio su provino 5_2)

Definiti i suddetti parametri, il tempo di acquisizione necessario stimato approssimativamente dal software è risultato essere pari a 37 minuti. Ogni progetto è stato salvato nel formato *.pca*.

Per la ricostruzione volumetrica è stato utilizzato il software **datos|x reconstruction**. Una volta aperto il file *.pca*, in primo luogo è stata utilizzata la funzione *Image number/orientation* per visualizzare

l'oggetto con orientamento 0° , 90° , 180° e 270° in modo da eliminare parti delle viste che non contenevano il provino (Fig.).

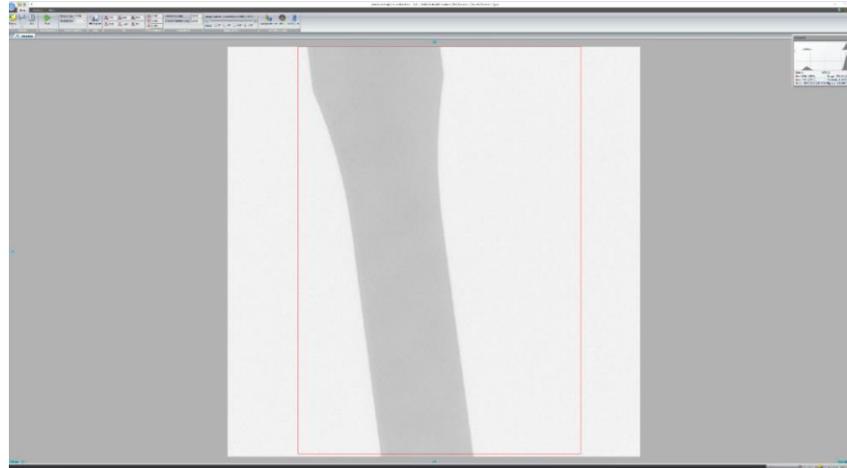


Figura 66. Fase di taglio dell'immagine su provino 7_1

Selezionando l'opzione "multi|scan" sono stati collegati i due settori ed è stato realizzato il modello tridimensionale nel formato .vga (Fig. e Fig.).

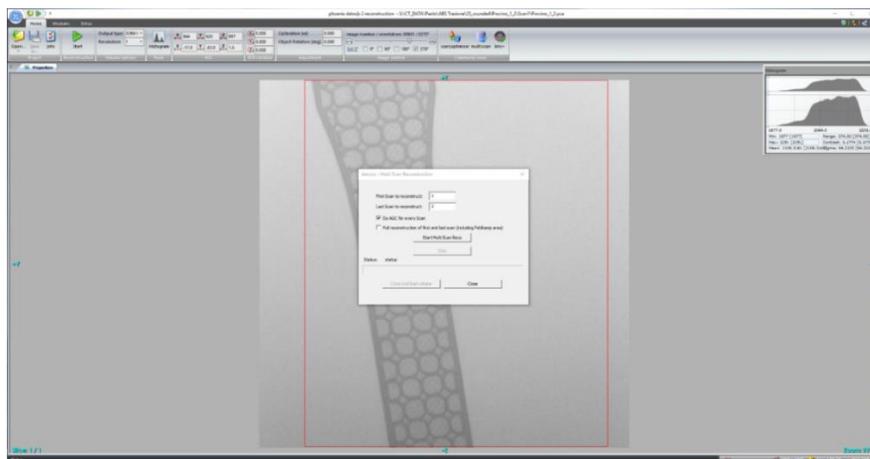


Figura 67. Ricostruzione con multi|scan su provino 1_2

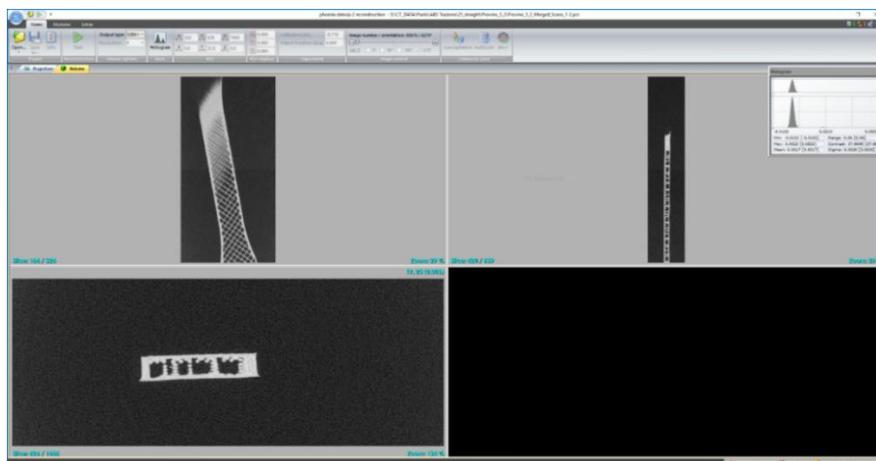


Figura 68. Risultato ricostruzione 5_2

3.3 Analisi di porosità

L'identificazione dei difetti interni ai provini con rispettive caratteristiche (posizione, volume, diametro, forma, ecc...) è stata effettuata grazie al modulo *Porosity/Inclusion Analysis* contenuto all'interno del software di analisi tomografica **VG Studio Max 3.4**. In realtà, prima di poter procedere con questo tipo di analisi, è stato necessario determinare la superficie, ovvero definire il valore di *threshold* dei voxel a cavallo tra la superficie del componente e il background. Tale operazione consiste nella fase della "segmentazione" descritta al paragrafo 1.2.2.2.

Eseguito il caricamento del file *.vga*, creato una volta conclusa la fase di ricostruzione volumetrica di ogni provino, la schermata si presenta divisa in quattro quadranti, tre dei quali contenenti le viste in sezione e uno il modello tridimensionale. Lateralmente si trova l'istogramma definito durante la fase di scansione che mostra i valori di grigio che caratterizzano un determinato numero di voxel dei dati acquisiti. Dopo aver regolato attraverso dei cursori sull'istogramma il contrasto e l'opacità delle immagini, è stata selezionata l'opzione "Surface determination" nella cui finestra sono state inserite le impostazioni consigliate dalla sezione del manuale del software dedicata all'analisi della porosità. In particolare, selezionando "Automatic" come "Material definition" è stato applicato il metodo *iso-50%* con cui si assegna il valore di grigio a metà fra i due picchi al valore di *threshold*. Inoltre, con l'opzione "Remove all voids" sono stati esclusi dalla successiva analisi di porosità i vuoti interni alla struttura poiché tipici dei componenti realizzati con stratificazioni di geometrie reticolari e quindi previsti e non considerati come difetti.

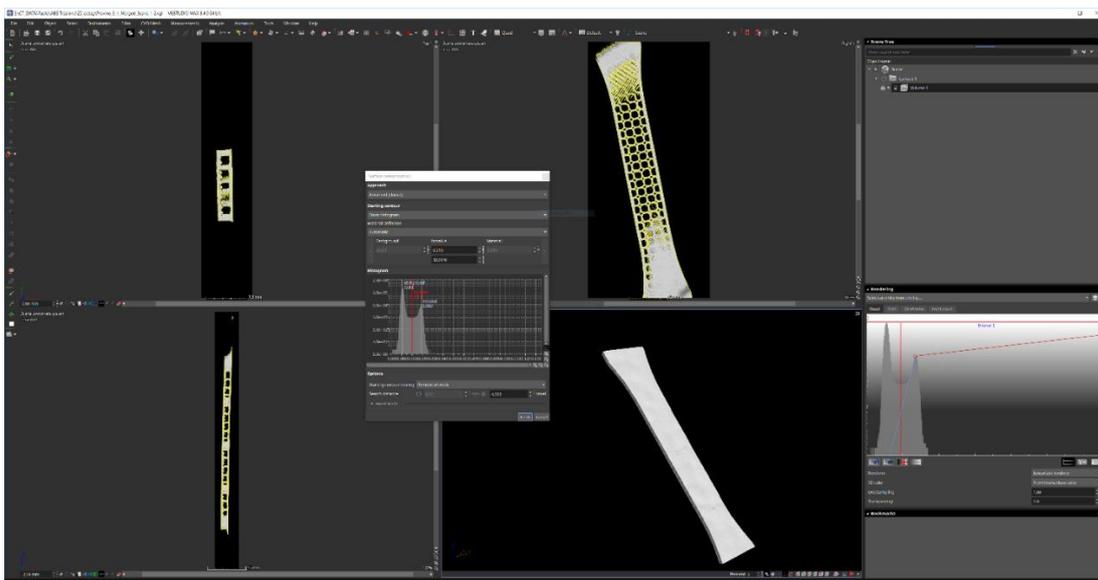


Figura 69. Determinazione della superficie sul provino 3_1

Successivamente, come suggerito dal manuale, è stato utilizzato "VGDefX" come algoritmo di analisi per le porosità essendo il più sofisticato tra quelli presenti nel software. Affinché l'analisi fosse riferita alla superficie precedentemente determinata, è stato selezionato "Use determined surface" nella sezione

“Material definition” e “From surface” nella sezione “Analysis Area”. Infine, è stato avviato il calcolo che ha richiesto non più di qualche decina di secondi grazie alla ridotta quantità di volume da analizzare.

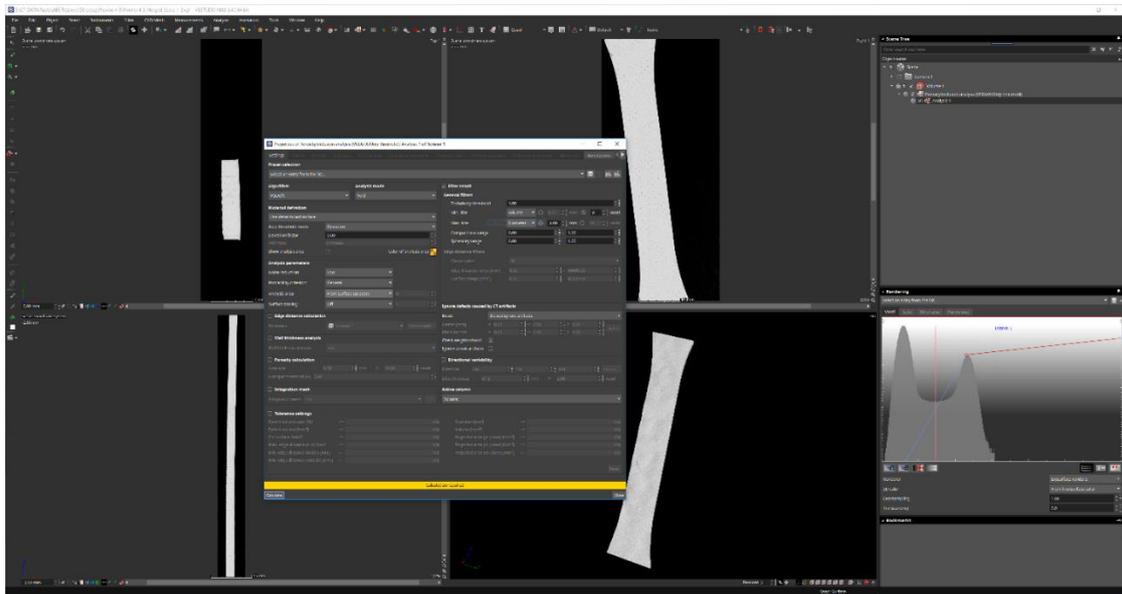


Figura 70. Calcolo delle porosità per il provino 4_3

Per ogni provino si è ottenuto una determinata distribuzione di difetti evidenziati con colori diversi in base al volume, parametro che si è scelto di utilizzare in modo da individuare visivamente i possibili candidati nello studio successivo di correlazione tra essi e i punti maggiormente deformati del provino dopo trazione.

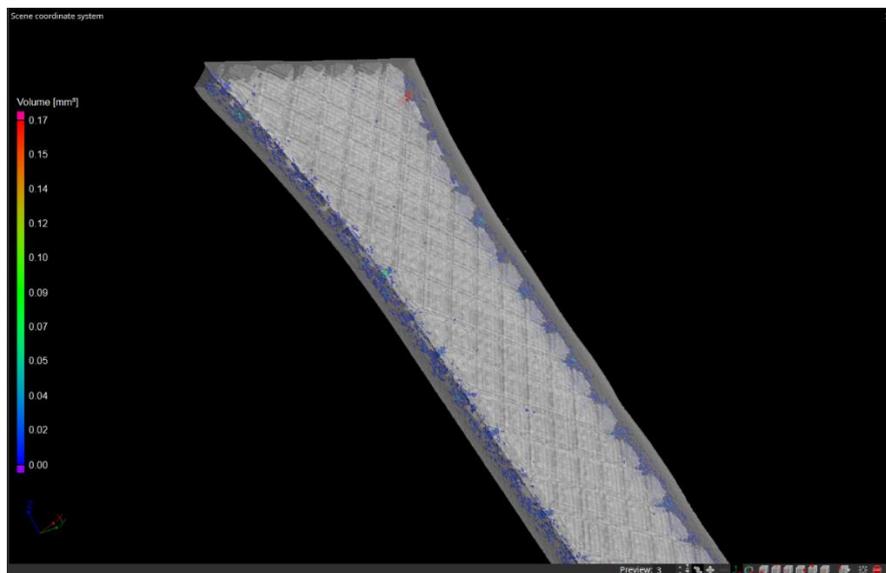


Figura 71. Risultato dell'analisi di porosità per il provino 5_2

Cliccando sulla legenda, oltre al volume, vengono illustrate informazioni più dettagliate inerenti ai difetti ovvero il raggio, il diametro, la posizione nello spazio rispetto al sistema di riferimento, la superficie, il numero di voxel contenuti. Inoltre, è stato possibile creare dalla tabella riportata in Fig. 72 delle etichette o “annotations” che indicassero sul componente i primi 3 difetti in ordine di volume.

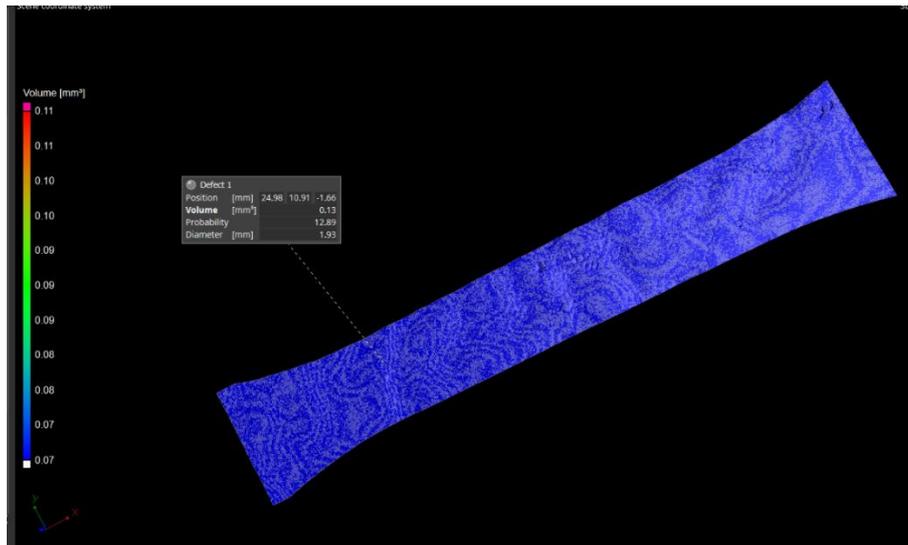


Figura 74. Mesh del provino 2_1

3.4 Prove di trazione con monitoraggio DIC

Prima di eseguire la prova di trazione vera e propria, ogni provino è stato preparato affinché le deformazioni subite potessero essere analizzate successivamente dal software di analisi DIC. In particolare, la superficie è stata trattata con una vernice spray di colore blu scuro in modo da evidenziare un pattern con cui l'applicazione **GOM Correlate** potesse distinguere i *facet* o *subset* di cui si è discusso al paragrafo 1.4.4. Inoltre, per facilitare sia il posizionamento del provino tra le morse della macchina di trazione, sia la fase di definizione della scala di grandezza del provino all'interno del software DIC come si vedrà in seguito, sono stati tracciati quattro piccoli tratti rossi distanti 2 cm gli uni dagli altri sulla parte centrale del provino stesso (Fig. 75).



Figura 75. Trattamento della superficie di un provino prima della prova di trazione

Dopo aver fissato le teste del provino tra le due morse della macchina di trazione, è stata posizionata la telecamera per la registrazione della prova in modo tale che il suo piano di messa a fuoco fosse perfettamente perpendicolare al provino stesso per evitare di generare un errore di misura dello spostamento tra 2D e 3D. La telecamera è stata posta al di sopra di un piccolo treppiede in modo che rimanesse in posizione fissa e stabile davanti al provino ed è stata collegata ad un PC così da ottenere il video e trasferirne i frame direttamente al software di analisi GOM Correlate.



Figura 76. Configurazione della prova di trazione con monitoraggio DIC

Si è quindi proceduto con l'avvio del programma **EASYQS** installato sul terminale a bordo macchina. Prima di effettuare la prova, il software ha richiesto l'inserimento della larghezza e dello spessore della parte centrale del provino così da calcolare automaticamente l'area di sezione e conseguentemente la resistenza a trazione. Con l'utilizzo di un calibro sono state effettuate più misurazioni in diversi punti da cui sono stati calcolati i valori medi riportati in Tabella 3.

Provino	Larghezza (mm)	Spessore (mm)
1_1	13,55	2,87
1_2	13,45	2,86
2_1	13,20	2,95
2_2	13,40	2,86
3_1	13,54	2,85
3_2	13,20	2,91
4_1	13,58	3,04
4_2	13,45	3,10
4_3	13,42	3,00
5_1	13,31	2,87
5_2	13,39	2,84
6_1	13,47	2,93
6_2	13,53	2,93
6_3	13,30	2,88
7_1	13,40	3,16
7_2	13,50	3,10
7_3	13,25	2,99
7_4	13,22	3,04

Tabella 3. Dimensioni effettive dei provini

Come si può notare, le dimensioni ottenute si discostano più o meno largamente da quelle nominali (spessore: 3,2 mm; larghezza: 13 mm). Ciò è la conseguenza di un'imprecisa realizzazione e stratificazione tramite stampante 3D, possibilmente causata da un'eccessiva fusione e ovalizzazione del

materiale una volta deposto. Si notano infatti in tutti i provini una larghezza superiore e uno spessore inferiore a quelli stabiliti in fase di progettazione del modello CAD.

	N.	T. +	T. -
<input checked="" type="checkbox"/> Lu [mm] -> Lung. finale tra i riferimenti			
<input checked="" type="checkbox"/> dLm [mm] -> Allung. a forza max			
<input checked="" type="checkbox"/> Ae [%] -> Allung.% a snervamento			
<input checked="" type="checkbox"/> Agt [%] -> Allung.% a forza max			
<input checked="" type="checkbox"/> At [%] -> Allung.% a rottura			
<input checked="" type="checkbox"/> Fm [N] -> Carico Massimo			
<input checked="" type="checkbox"/> ReH [MPa] -> Car.Unit. a snervamento Sup.			
<input checked="" type="checkbox"/> ReL [MPa] -> Car.Unit. a snervamento Inf.			
<input checked="" type="checkbox"/> Rm [MPa] -> Resistenza a trazione			
<input checked="" type="checkbox"/> Rp [MPa] -> Car. Unit. di scost. dalla prop.	0.2		
<input checked="" type="checkbox"/> Rp [MPa] -> Car. Unit. di scost. dalla prop.	0.5 %		
<input checked="" type="checkbox"/> Rt [MPa] -> Car. Unit. limite di allung. tot.	5 %		
<input checked="" type="checkbox"/> E [MPa] -> Modulo di Elasticità			
<input type="checkbox"/> Man.Ins.: Lo / Lu			
<input type="checkbox"/> r -> Coef. di anisotropia plastica			
<input type="checkbox"/> Controllo Velocità 1	0.005	0.003	0.001
<input type="checkbox"/> Controllo Velocità 2			

Figura 77. Schermata di inserimento dati per la prova di trazione

Sempre all'interno della stessa finestra, trattandosi di una prova in controllo di spostamento, è stata definita la velocità di movimento della traversa mobile a 10 mm/min.

Infine, è stato inserito il dato "Lunghezza base estensimetro". In realtà, come già accennato nel paragrafo 1.4.4, si è scelto di non utilizzare alcun estensimetro per la misura delle deformazioni non essendo estremamente necessario al lavoro sulla correlazione con i difetti individuati nei provini. Al contrario, poiché l'obiettivo della tesi si basa su un tipo di studio puntuale, si è ritenuto opportuno sfruttare la tecnologia DIC per monitorare le deformazioni subite da specifici punti in cui è stata evidenziata la presenza di difetti con l'analisi di porosità. I risultati ottenuti dal software della macchina di trazione, infatti, oltre ad essere imprecisi in assenza di un estensimetro, fanno riferimento ad un tipo di deformazione uniforme che il provino subisce lungo la direzione di trazione. Per misurare quest'ultima, quindi, è stato applicato il metodo "indiretto" che consiste nel determinare l'allungamento del provino misurando la variazione della distanza tra le traverse della macchina di trazione. In questo modo, vengono incluse le deformazioni di tutti gli elementi costitutivi della macchina che ha effettuato il test la cui somma, nonostante possa essere trascurabile, influisce sul risultato finale. Ad ogni prova è stata misurata la distanza tra la traversa fissa e mobile con l'utilizzo di un calibro ed è stata inserita nel software di calcolo della macchina.

Dopo aver azzerato i valori di carico e di spostamento, è stata avviata la prova col tasto "GO" contemporaneamente all'avvio della registrazione della telecamera, la quale è stata stoppata successivamente alla rottura del provino.

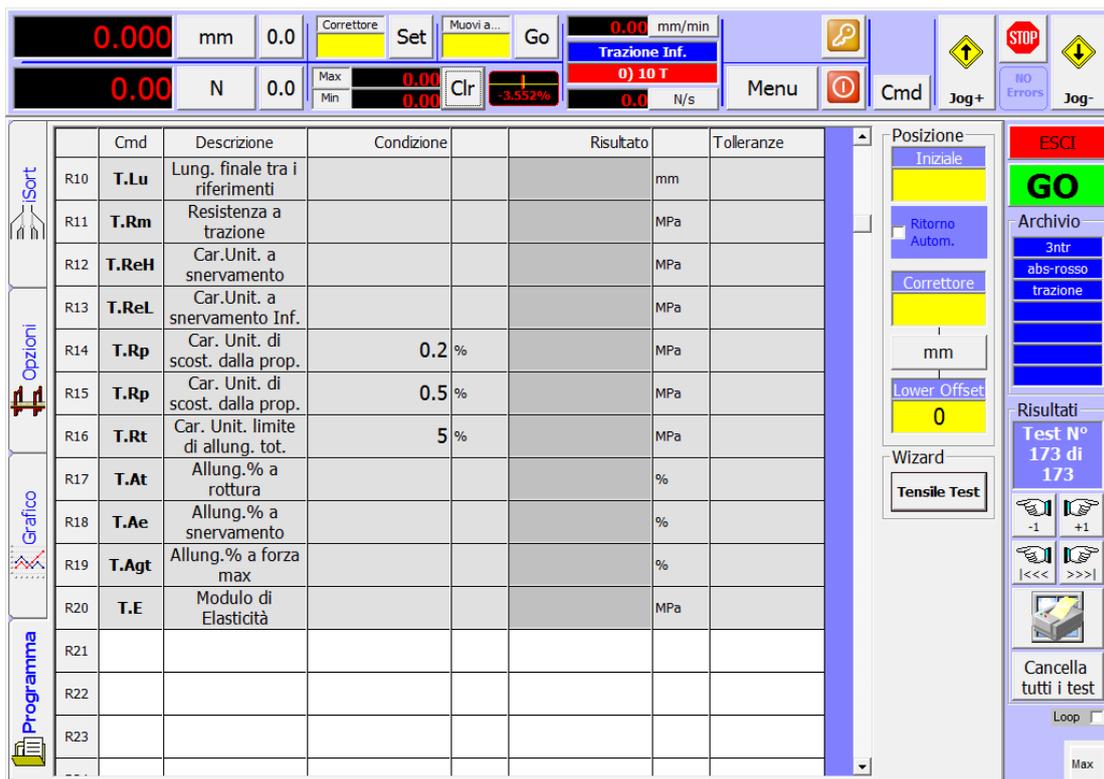


Figura 78. Schermata principale EASYQS di avvio della prova di trazione



Figura 79. Provini dopo essere stati sottoposti a trazione

Premendo il pulsante “STOP”, il software ha fornito i dati di ogni prova sottoforma di file *.txt* e *.xlsx*. Il file di testo contiene tre colonne che riportano il tempo della prova, lo spostamento della traversa mobile e la forza registrate istante per istante. Le ultime due colonne sono riportate nel file Excel sottoforma di grafico caratterizzato in ascissa dai valori di spostamento delle morse della macchina (in mm) e in ordinata da quelli di carico (in N) a cui è sottoposto il provino. La forma del grafico forza-spostamento risulta molto simile in tutte le prove e si riporta quello del provino numero 4_2 a titolo di esempio (Fig. 80). Osservando la figura, si nota sia il tratto elastico della prova (retta per l’origine) sia il tratto curvo di deformazione plastica. Da questo andamento si può riscontrare un comportamento duttile del materiale.

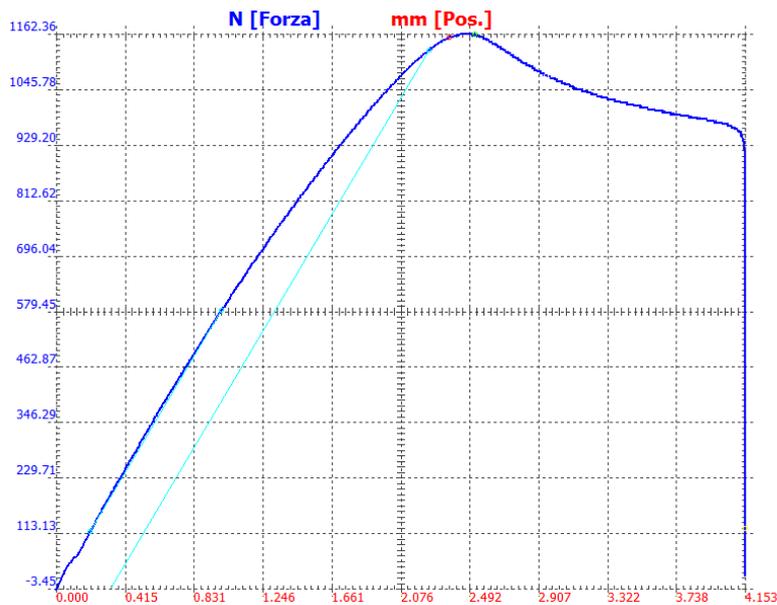


Figura 80. Esempio di grafico forza-spostamento fornito dal software

Successivamente, è stato importato il video di ogni prova sottoforma di numerosi fotogrammi nel software GOM Correlate, basato, come più volte accennato, sulla tecnologia DIC. Il software è in grado di calcolare le coordinate 2D sul pattern presente in ogni immagine così che un pattern deformato rappresenti la deformazione stessa dell'oggetto. Una volta importato il video, il programma crea automaticamente una timeline contenente tutti i suoi frame.

Per calcolare gli spostamenti e le deformazioni è in primo luogo fondamentale definire la scala del componente. Per fare ciò, cliccando col tasto destro su “Misure (Deformazione 1)” e premendo su “Modifica parametri di creazione”, su “Modifica Calibrazione” e infine su “Definisci Scala” si possono selezionare due punti della superficie di cui è nota la distanza da inserire nella casella “Distanza tra i punti”.

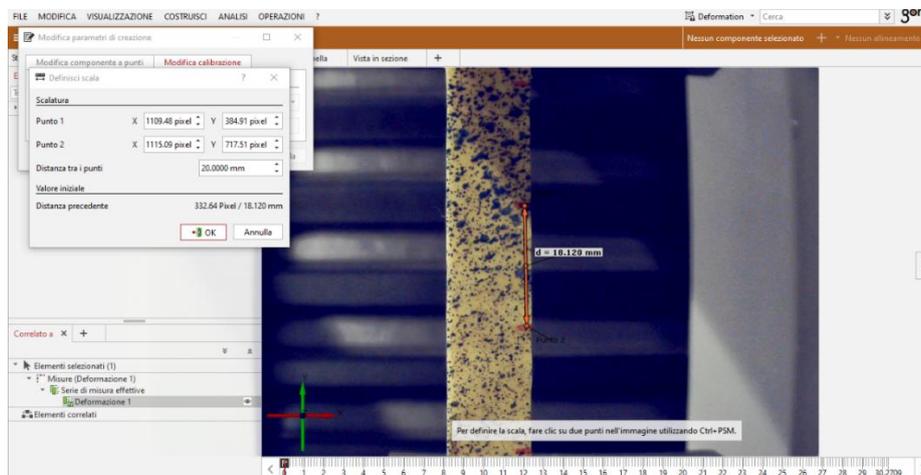


Figura 81. Definizione della scala di misura per il provino 4_1

Successivamente, è stata verificata la qualità del pattern creato sulla superficie del provino definendo il “Componente superficie” attraverso un tasto sulla barra degli strumenti. Durante la sua creazione, il software trova i *facet* sulla superficie acquisita attraverso il pattern stocastico. Selezionando “Qualità modello” appare un istogramma laterale che indica se il pattern ha una buona qualità (tratto verde) o scarsa qualità (tratti giallo, arancione, rosso). Si può migliorare la qualità modificando la dimensione dei *facet* e la distanza tra i centri di ognuno di essi. È stata definita manualmente la superficie da valutare cliccando sull'icona “Seleziona/deseleziona poligono” per evitare contorni irregolari e per eliminare eventuali errori dovuti all'applicazione dell'algoritmo di correlazione anche allo sfondo dietro al provino. Sono stati quindi definiti la dimensione dei *facet* e la distanza tra i punti all'interno di range di valori compresi rispettivamente tra 19 e 45 pixel e 10 e 16 pixel per ogni provino. Rispetto ai valori di default, infatti, si è cercato di definire queste due grandezze per aumentare la precisione o diminuire i tempi di calcolo in base alla necessità di ogni provino di migliorare la qualità del proprio modello. Successivamente, il software ha creato il componente superficie automaticamente per tutti i frame sulla base di questi dati.

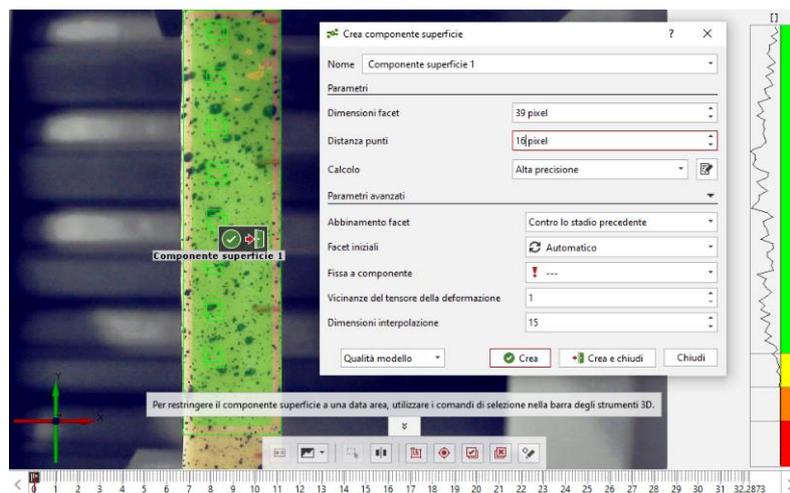


Figura 82. Creazione del componente superficie del provino 6_1

Inoltre, è possibile modificare il sistema di riferimento che viene automaticamente disposto dal software al centro dell'immagine. Cliccando su “Crea allineamento” e su “3-2-1” è stato ridefinito il sistema di riferimento assegnando l'asse *y* lungo la direzione di trazione su cui agisce il carico.

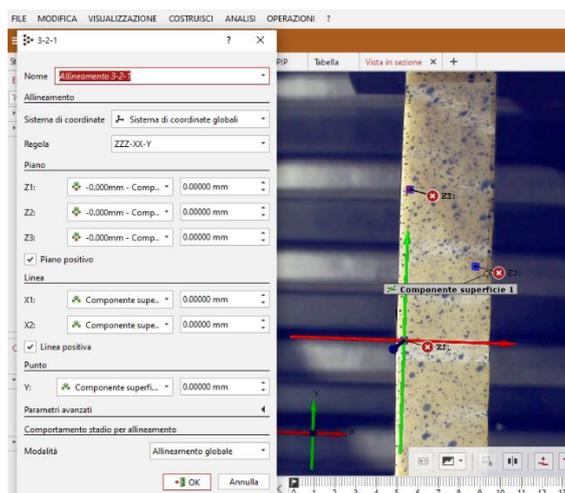


Figura 83. Riposizionamento del sistema di riferimento del provino 4_2

A questo punto, dopo aver selezionato “Controllo Epsilon (Y)” dalla barra degli strumenti, il software ha calcolato automaticamente le deformazioni lungo y, mostrando per ogni frame sulla timeline la distribuzione di deformazione tramite colori facenti riferimento ad una barra laterale contenente un istogramma e la legenda con i valori percentuali di deformazione corrispondenti ai vari colori.

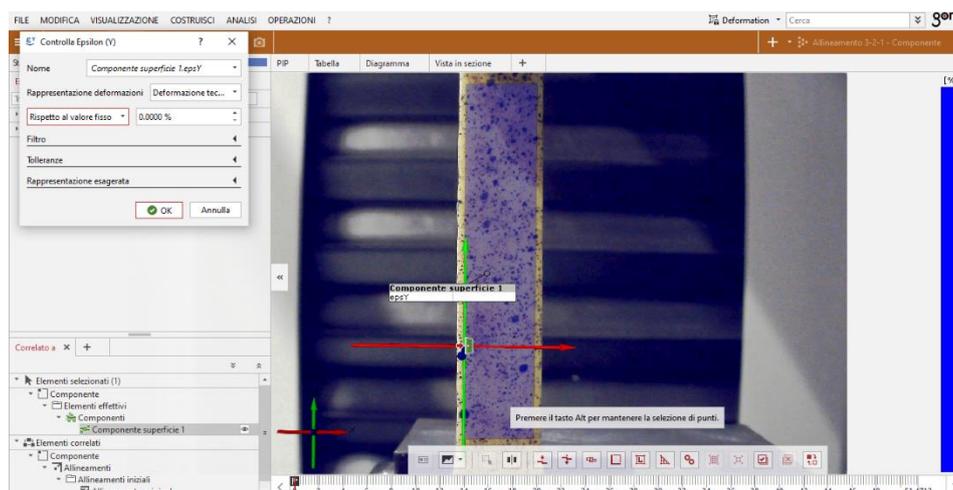


Figura 84. Calcolo delle deformazioni del provino 6_2

Cliccando sulla legenda col tasto destro “Scalatura” e “Tutti gli stadi visibili”, il software ha definito la legenda in riferimento al valore massimo di deformazione ottenuto.

Grazie a questo programma di analisi, è stato possibile monitorare l’evoluzione delle deformazioni in corrispondenza delle zone in cui sono stati individuati i difetti dai volumi maggiori o concentrazioni di difetti con l’analisi di porosità. Si può notare ad esempio in Fig. 85 i valori di deformazione in tre punti evidenziati con la funzione “Annotazioni di deviazione” in due distinti istanti di tempo per il provino 4_1, ovvero a 0 e a circa 26 secondi. Si osserva la natura a banda delle deformazioni e come dal colore azzurro corrispondente allo 0% si passi al 26° secondo al giallo nella zona di rottura con una deformazione di circa il 30%.

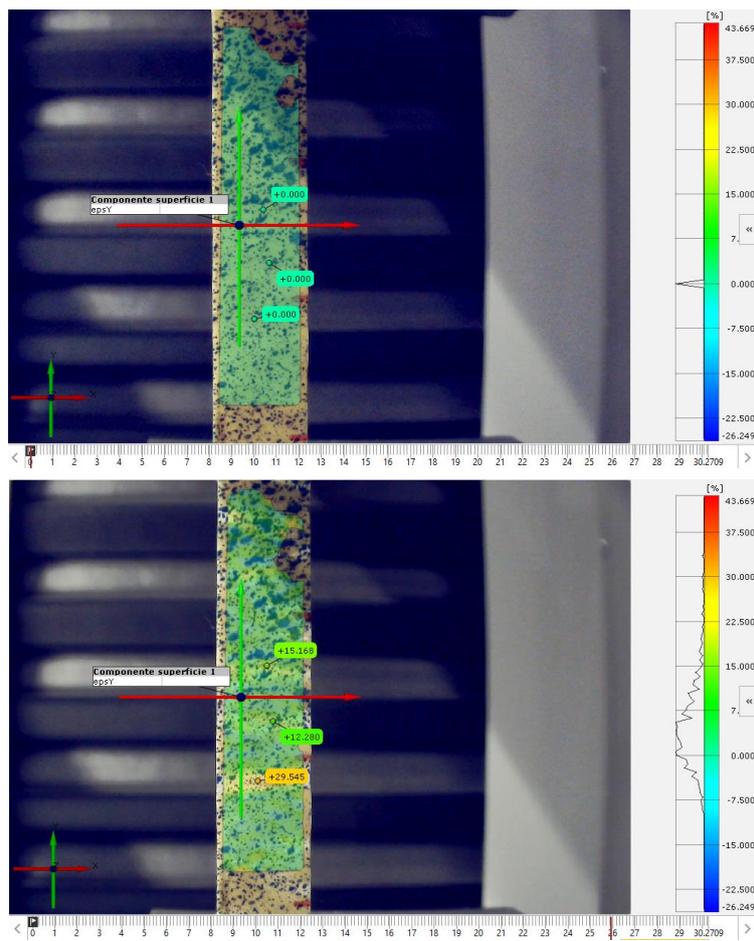


Figura 85. Evoluzione della deformazione locale in tre punti del provino 4_1

Per validare i risultati ottenuti con questa procedura, si è scelto di confrontare il valore medio delle deformazioni rilevate dal software nell'ultimo frame prima della frattura con la deformazione subita dal tratto soggetto all'inquadratura della telecamera. Quest'ultimo è compreso tra i due tratti estremi in rosso tracciati sul provino e distanti, prima della rottura, 60 mm. Il confronto è stato eseguito misurando approssimativamente con un calibro la distanza tra le due tracce dopo deformazione e calcolandone l'allungamento.

Infatti, dopo aver avviato il calcolo delle deformazioni con GOM Correlate, accanto alla legenda dei valori percentuali di deformazione corrispondenti a vari colori mostrati su ogni frame della prova di trazione, è possibile visualizzare un istogramma (Fig. 86) che, man mano che si sposta il cursore della timeline verso il frame immediatamente precedente alla rottura, assume una forma assimilabile a quella gaussiana. Essa mostra in corrispondenza del picco il valore di deformazione percentuale che più di tutti si rileva sul provino, ovvero il valore medio delle deformazioni rilevate sulla superficie in esame.

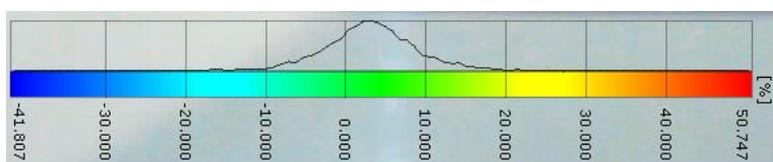


Figura 86. Legenda e istogramma dei valori di deformazione percentuale rilevati sul provino

Per ottenere il valore medio esatto, è stata utilizzata la funzione “Inspect” e visualizzato l’etichetta “Results-Overview”. A titolo di esempio, si mostra il risultato ottenuto per il provino 4_3. Come si nota dalla Fig. 87, il valore medio è pari a 2,96%, paragonabile a quello ottenuto dal rapporto tra lo spostamento di 1,6 mm subito dalla zona d’interesse del provino e la lunghezza iniziale di 60 mm che risulta pari a 2,67%.

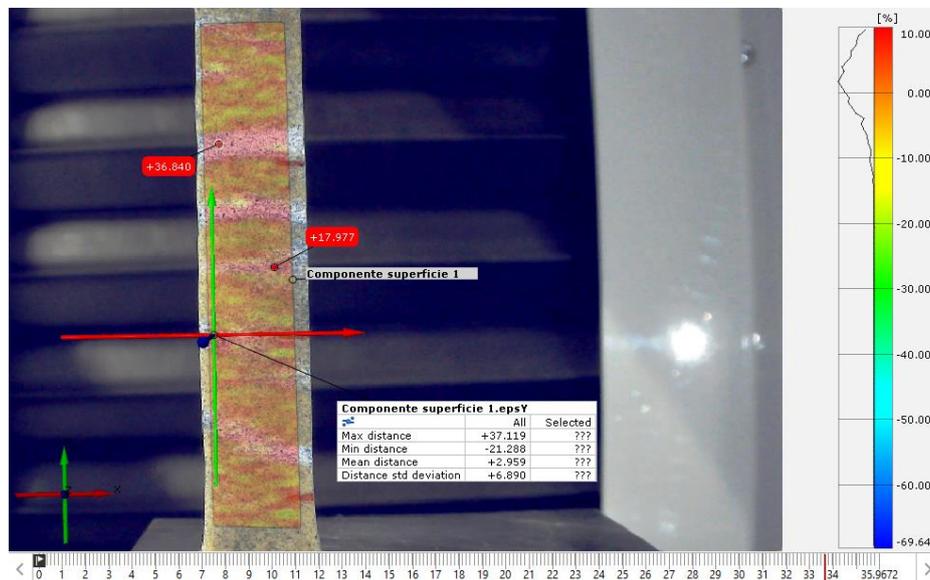


Figura 87. Valore medio delle deformazioni rilevate nell'ultimo frame prima della rottura del provino 4_3

Chiaramente non si è sempre potuto ottenere un risultato esatto da questo tipo di confronto, sia perché sui primi provini sottoposti a trazione non sono stati tracciati i tratti rossi su cui effettuare la misura della distanza dopo rottura, sia per la possibile imprecisione della misura effettuata sul provino, sia per i possibili errori di valutazione del software. Nonostante ciò, in molti casi si è potuto riscontrare una somiglianza tra il valore calcolato dalla misura sul provino e quello rilevato dal software.

3.5 Correlazione tra difetti della stampa 3D e risultati di trazione

La ricerca della correlazione tra i difetti individuati grazie al modulo di analisi della porosità del programma **VG Studio Max** per lo studio tomografico e i punti sul corrispondente provino in cui, in seguito alla prova di trazione, sono stati riscontrati i maggiori valori di deformazione tramite l'analisi a punti del software **GOM Correlate** basato sulla tecnologia DIC, è stata effettuata confrontando in maniera occhiometrica i provini con i rispettivi modelli tomografici elaborati. Questa fase finale è stata eseguita con l'aiuto di un'altra funzione di GOM Correlate che ha permesso di sovrapporre il modello CAD (a partire dal quale sono stati creati tutti i provini) con le Mesh dei modelli tomografici di ogni provino esportate da VG Studio Max. Infatti, la difficoltà della comparazione risiedeva nella geometria incompleta dei volumi tomografici acquisiti avendo escluso le teste di serraggio dei provini in quanto zone non soggette allo studio delle deformazioni. L'operazione che verrà di seguito descritta ha permesso di individuare più facilmente su ogni provino i punti d'interesse evidenziati dall'analisi di porosità per poi cercare sul provino fisico una corrispondenza della loro posizione tracciata sul modello CAD.

In primo luogo, è stato importato il volume tomografico sottoforma di mesh. Successivamente, con la funzione "Costruisci punto" sono stati tracciati al suo interno dei punti rappresentanti i difetti dal volume maggiore, già evidenziati sul software di analisi di porosità, attraverso l'immissione delle coordinate geometriche che ne determinano la posizione nel sistema di riferimento del provino stesso (Fig. 88).

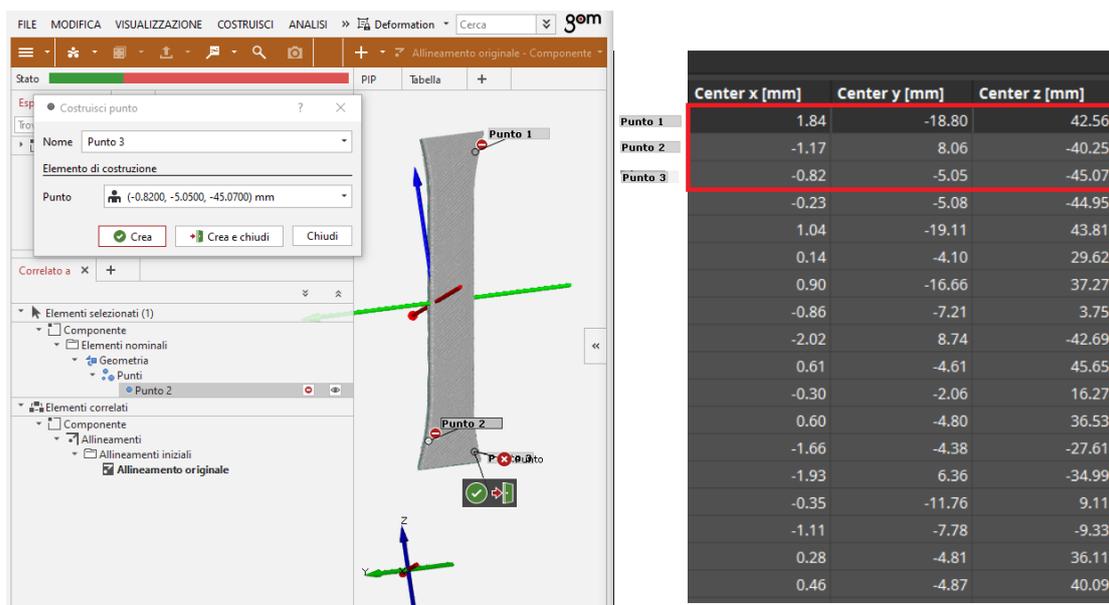


Figura 88. Inserimento dei difetti nella Mesh di un provino

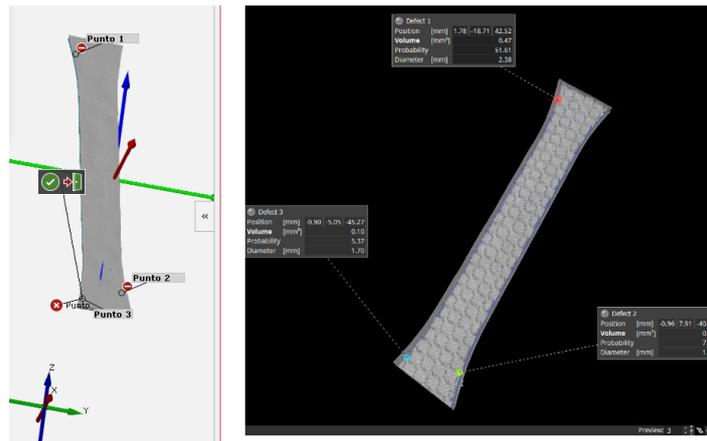


Figura 89. Confronto tra la Mesh coi punti creati e il risultato ottenuto dall'analisi di porosità

Sui punti creati è stata eseguita la funzione “Copia come elemento effettivo” in modo che essi mantenessero la propria posizione rispetto alla Mesh del provino importato, nonostante quest'ultimo cambiasse sistema di riferimento. Infatti, lo step successivo ha riguardato l'allineamento della Mesh con il modello CAD del provino.

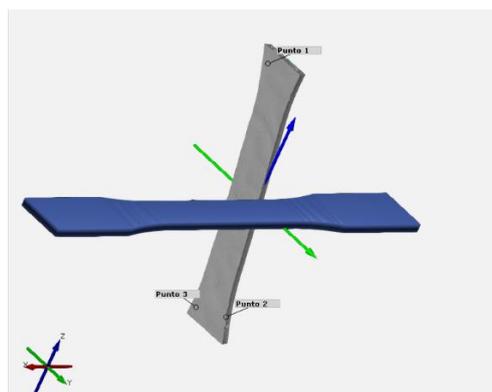


Figura 90. Importazione del modello CAD

Utilizzando la funzione “Preallineamento”, la Mesh, insieme ai punti creati ad essa interni, è stata automaticamente adattata al profilo del componente 3D.

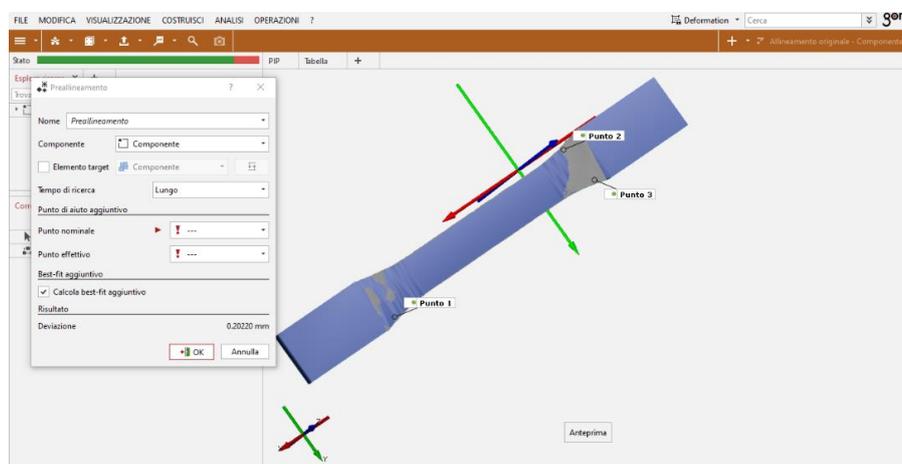


Figura 91. Sovrapposizione tra Mesh e CAD

Infine, con l'opzione "Costruisci piano parallelo" sono stati costruiti due piani in corrispondenza delle superfici delle due estremità parallele lungo l'asse x, identificando il piano in corrispondenza dell'estremità inferiore come "Piano 1" e dell'estremità superiore come "Piano 2" (Fig.).

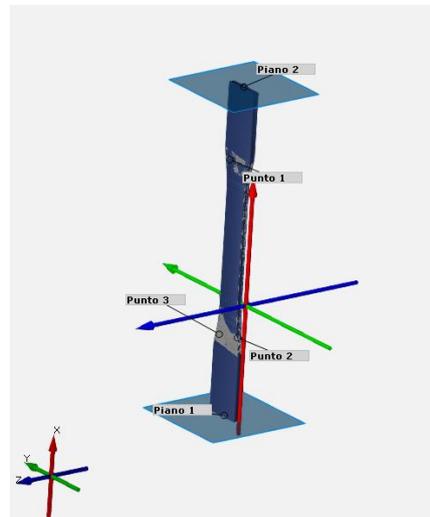


Figura 92. Costruzione dei piani paralleli

Tale aggiunta è stata apportata con lo scopo di facilitare l'identificazione dei difetti calcolandone la distanza rispetto ai due piani per poi agire allo stesso modo sul provino fisico con l'utilizzo di un calibro (Fig. 94). Utilizzando la funzione "Costruisci distanza del punto proiettato" si è potuto scegliere di proiettare i punti sul piano 1 o sul piano 2 o su entrambi, in base alla convenienza, e misurarne la distanza.

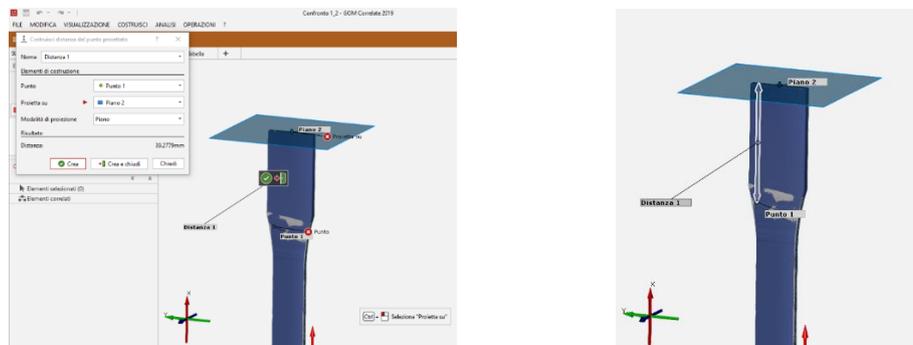


Figura 93. Calcolo della distanza tra un punto e il piano 2



Figura 94. Misura sul provino fisico della distanza tra un'estremità e il punto di rottura con l'utilizzo di un calibro

CAPITOLO 4: ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

4.1 Risultati ottenuti dall'analisi di porosità

4.1.1 VOLUMI DEI DIFETTI

La tabella sottostante (Tab. 4) riassume parzialmente i risultati riguardanti le caratteristiche dei singoli difetti individuati tramite l'analisi di porosità. Infatti, sono stati presi in considerazione solo i primi tre difetti in ordine di volume per ogni provino analizzato poiché si è presunto fossero quelli in grado di influenzare maggiormente la resistenza del provino durante la prova di trazione.

I volumi maggiori si riscontrano nei provini realizzati con un infill del 25% per quanto riguarda quelli realizzati con le strategie Rounded e Octagonal. L'unica eccezione è costituita dal secondo provino di tipo "2" che presenta i difetti dal volume più elevato in assoluto. Infatti, paragonando questi con quelli riscontrati sia nel provino della stessa tipologia sia nei provini sempre con riempimento del 50% ma strategia Octagonal - essendo queste due geometrie molto simili fra loro - si presume che i risultati ottenuti per il provino 2_2 siano anomali. La causa potrebbe ad esempio risiedere in condizioni di processo inadatte alla corretta realizzazione del provino.

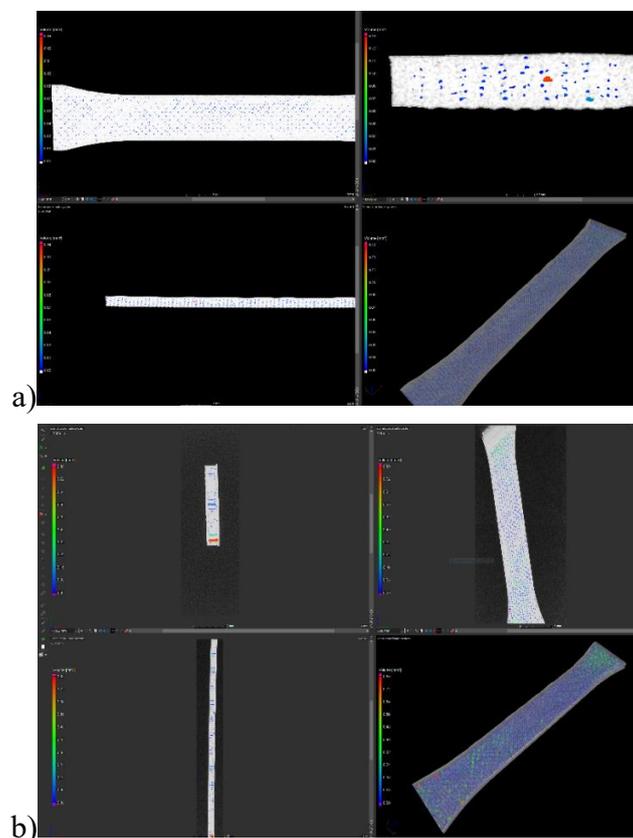


Figura 95. Confronto fra i due provini della stessa tipologia ma porosità differente: a) Provino 2_1 e b) Provino 2_2

Per quanto riguarda la tipologia di provini creati con strategia Straight, al contrario, sono quelli con un infill del 50% ad essere caratterizzati da porosità con volumi in media più elevati rispetto ai provini con riempimento del 25% (anche se la differenza non è spiccata come nel caso delle altre due strategie).

I provini creati con stessa strategia e riempimento mostrano tra loro difetti approssimativamente dallo stesso valore volumetrico fatta eccezione per il 6_3 (con difetti dal volume più ridotto rispetto agli altri “6”), il 7_4 e soprattutto per il già citato 2_2 (entrambi con difetti dai volumi più elevati in confronto rispettivamente agli altri provini “7” e “2”).

Inoltre, 3 su 4 dei provini costituiti da un riempimento del 100% presentano i difetti dal volume più ridotto tra tutti i provini analizzati.

	Percentuale di riempimento	Provino	Volume 1° difetto (mm ³)	Volume 2° difetto (mm ³)	Volume 3° difetto (mm ³)
Rounded (R)	25%	1_1	0,51	0,24	0,04
		1_2	0,47	0,31	0,10
	50%	2_1	0,14	0,13	0,13
		2_2	0,80	0,73	0,64
Octagonal (O)	25%	3_1	0,49	0,38	0,17
		3_2	0,40	0,34	0,13
	50%	4_1	0,10	0,06	0,06
		4_2	0,09	0,08	0,08
		4_3	0,06	0,06	0,05
Straight (S)	25%	5_1	0,12	0,06	0,06
		5_2	0,17	0,07	0,06
	50%	6_1	0,28	0,25	0,21
		6_2	0,27	0,21	0,21
		6_3	0,18	0,17	0,17
	100%	7_1	0,05	0,02	0,01
		7_2	0,02	0,02	0,02
		7_3	0,09	0,07	0,07
7_4		0,12	0,10	0,06	

Tabella 4. I tre volumi più elevati dei difetti contenuti in ogni provino

4.1.2 PERCENTUALI DI POROSITÀ

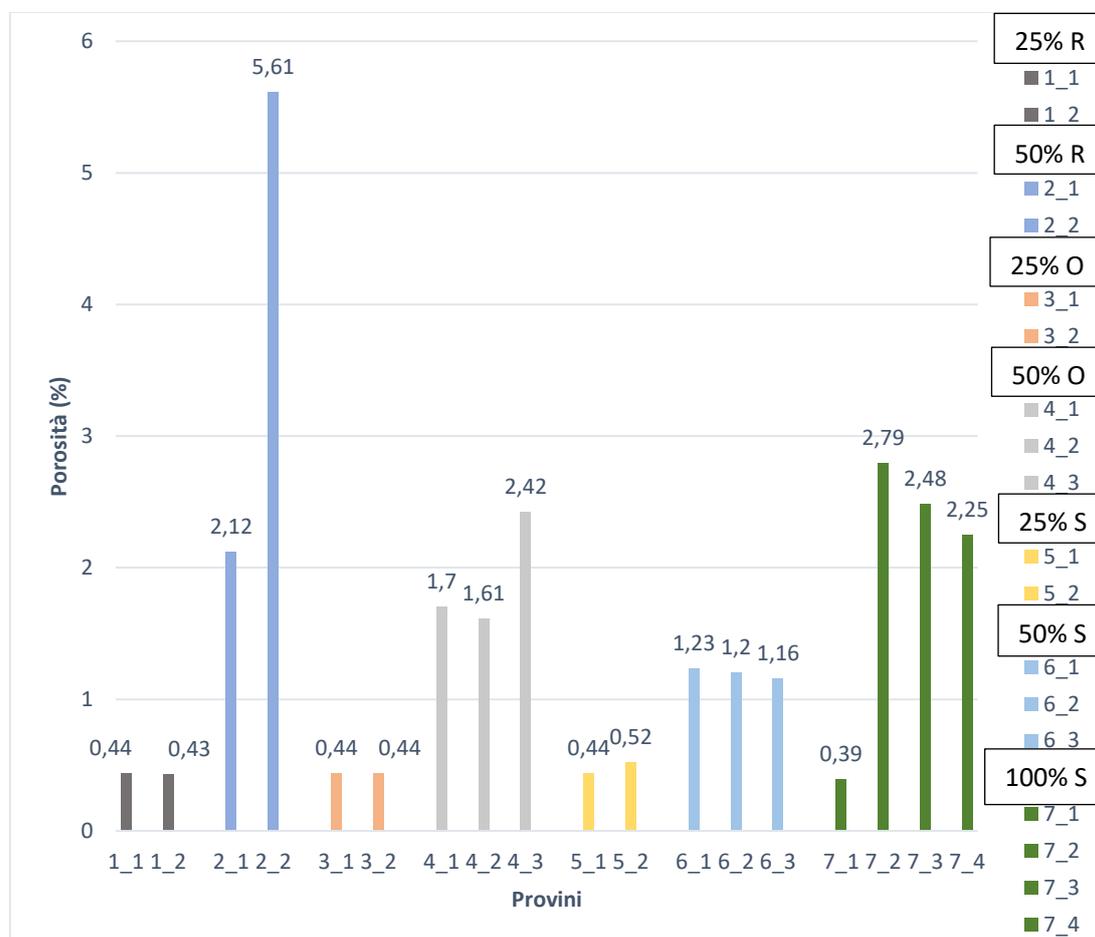


Figura 96. Grafico delle percentuali di porosità

Nel grafico in Fig. 96 si riportano le percentuali di porosità riscontrate sui provini analizzati.

Prima di tutto, si può notare che per ogni tipo di strategia utilizzata, i provini con riempimento del 50% presentano una percentuale di porosità maggiore rispetto ai provini con infill del 25%. Da ciò ne consegue che, nonostante dai risultati precedentemente esposti si evinca che i provini realizzati con strategie Rounded e Octagonal con infill del 25% presentino difetti dalle dimensioni più elevate rispetto a quelli con infill 50%, il volume totale dei difetti presenti in questi ultimi è maggiore rispetto ai primi. Ciò è probabilmente dovuto almeno in parte alla minor presenza di materiale che costituisce tutti i provini con la minima percentuale di riempimento.

In particolare, il secondo provino del tipo “2” presenta la percentuale più elevata non solo rispetto alla tipologia “1” ma rispetto a tutti i provini stampati. Nuovamente, ciò sembra essere un’eccezione considerando le altre percentuali a confronto.

D'altro canto, per quanto riguarda la strategia Straight, la percentuale di difettosità maggiore riscontrata nei provini "6" conferma la tendenza di questi a presentare difetti dal volume maggiore rispetto ai "5" (come osservato nel paragrafo precedente) anche se, in modo analogo ai risultati precedentemente esposti, la differenza rilevata in riferimento a questo aspetto fra i provini con le due diverse percentuali di infill è minore rispetto a quella che si osserva nei provini con strategia Octagonal e Rounded. Infatti, nei provini con strategia Straight e riempimento del 50%, le percentuali di porosità riscontrate risultano minori rispetto a quelle delle altre due tipologie con stesso valore di infill.

Inoltre, si può notare che 3 su 4 dei provini caratterizzati da un riempimento massimo del 100% presentano una percentuale che risulta essere in media la maggiore fra tutte (escludendo il secondo "2") senza però discostarsi in maniera evidente dalle porosità dei provini con le altre due strategie di stampa e 50% di infill. Si osserva quindi che nonostante siano costituiti dalla quantità di materiale massima possibile che la stampante 3D di cui si è usufruito fosse in grado di deporre, la percentuale di difettosità si aggira attorno ai risultati ottenuti per i provini riempiti con una percentuale minore e con strategia Rounded e Octagonal. Infatti, si è notato che la quantità di materiale deposto per realizzare i provini con 100% di infill e strategia Straight si aggira attorno a quella utilizzata per i provini con riempimento del 50% in combinazione con le altre due strategie. L'unica eccezione è costituita dal primo provino di tipo "7" che presenta una percentuale di porosità sorprendentemente ridotta e addirittura minore rispetto a quella dei provini di tipo 1, 3 e 5. Anche in questo caso, il 7_1, se confrontato con gli altri provini appartenenti alla stessa tipologia, può essere ritenuto un'eccezione.

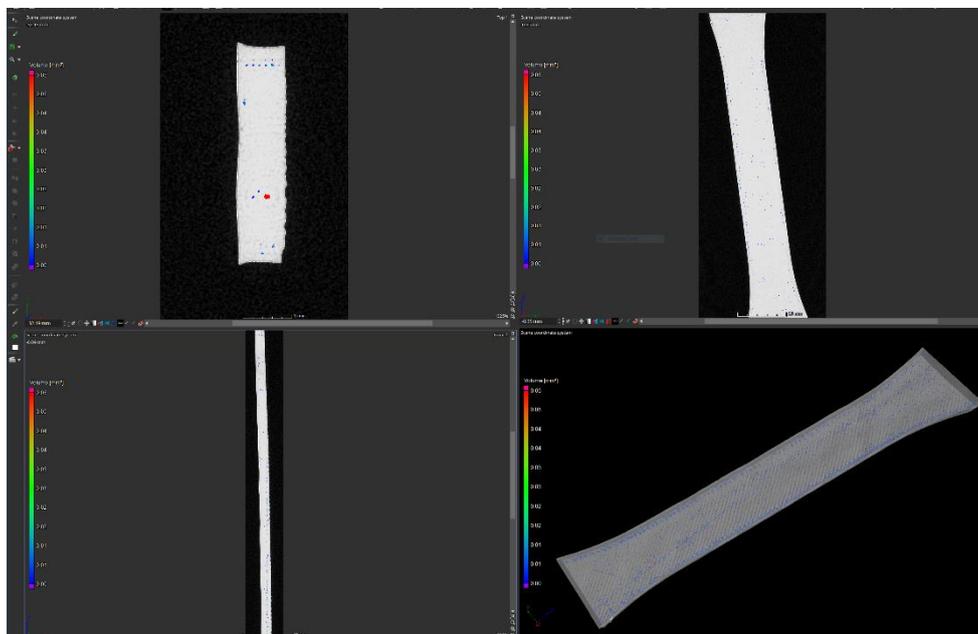


Figura 97. Tomografia del provino 7_1 da cui si nota bassissima presenza di difetti

4.2 Correlazione tra proprietà meccaniche e caratteristiche di difettosità

In questo studio le prove di trazione con la macchina EasyDur Aura 10T sono state eseguite con lo scopo di analizzare il comportamento a trazione dei vari provini e correlarne le caratteristiche di difettosità individuate nel paragrafo precedente.

Si riportano di seguito alcuni risultati contenuti nell'Excel fornito dal software della macchina di prova, tra cui i valori di Resistenza a trazione, Resistenza a snervamento e Allungamento a rottura (Tab. 5).

Provino	R_m (MPa)	R_{p,0.2} (MPa)	ε di rottura (%)
1_1	14,55	12,33	3,60
1_2	15,34	13,22	3,51
2_1	34,90	27,10	4,48
2_2	27,58	23,54	3,07
3_1	15,26	13,38	4,53
3_2	15,26	13,20	4,26
4_1	31,50	25,73	4,80
4_2	27,88	22,17	4,50
4_3	33,93	29,64	4,73
5_1	18,69	16,52	4,52
5_2	13,42	11,70	3,95
6_1	28,49	23,86	4,68
6_2	27,21	22,85	5,50
6_3	21,70	19,90	5,20
7_1	33,40	27,61	4,28
7_2	30,74	24,97	4,63
7_3	33,17	29,86	5,58
7_4	29,78	26,09	3,86

Tabella 5. Risultati delle prove di trazione

Inoltre, si mostrano in un unico grafico forza-spostamento gli andamenti ottenuti dalle prove di trazione di tutti i provini testati, differenziando con linea tratteggiata quelli dei provini 2_2 e 7_1 che, come visibile in Figura 96, avevano presentato percentuali di difettosità anomale (Fig. 98).

La prima osservazione che si riscontra facilmente esaminando il grafico riguarda la differenza tra i livelli di carico massimo sopportati dai provini con riempimento del 25% e del 50-100%. Appare evidente, infatti, che i primi posseggono una minore resistenza a trazione rispetto ai secondi.

In particolare, per quanto riguarda i provini con infill del 25%, in quelli con strategia Rounded e Octagonal si notano dei valori di resistenza a trazione molto simili che si aggirano intorno ai 15 MPa. Osservando i provini con strategia Straight, invece, si nota una differenza di circa 5 MPa fra i due provini "5", di cui uno con R_m minore e l'altro con R_m maggiore rispetto al valore riscontrato per i provini con le altre due strategie di riempimento. È importante mettere in risalto questo aspetto poiché si può già notare una correlazione tra questi risultati e quelli inerenti alla porosità contenuta nei provini con questa percentuale di riempimento. Infatti, il provino 5_1 che ha una porosità minore del provino 5_2, mostra anche una resistenza maggiore rispetto a quest'ultimo. Questa correlazione è applicabile anche ai provini con strategia Rounded e Octagonal. In particolare, in questi ultimi, alla stessa percentuale di porosità riscontrata in entrambi è corrisposto lo stesso valore di resistenza a trazione.

Osservando i valori di deformazione, si nota che i provini con strategia Octagonal posseggono il più alto valore di allungamento a rottura senza discostarsi eccessivamente dai provini con strategia Straight. I provini con strategia Rounded, invece, sono caratterizzati dal valore di deformazione minore fra le tre tipologie.

Una situazione simile si ripresenta anche nei provini con riempimento del 50% in riferimento all'allungamento a rottura, anche se in questo caso, in media sono i provini Straight ad aver subito una deformazione leggermente maggiore di quella subita dai provini Octagonal.

Per quanto riguarda la resistenza a trazione, invece, sia per provini col 50% che col 100% di infill si ottengono risultati differenti da quelli precedentemente esposti per i provini con infill 25%. Nei provini realizzati con strategia Straight e Octagonal non si rileva alcuna correlazione tra la resistenza a trazione e la percentuale di porosità. Si può pensare, quindi, che questi livelli di porosità non siano così elevati da avere un'influenza sulle caratteristiche meccaniche dei provini con questa percentuale di riempimento. In particolare, il provino 6_3 presenta un valore di resistenza decisamente inferiore rispetto agli altri provini "6" nonostante possieda la più bassa percentuale di porosità fra i tre. Ciò potrebbe essere legato al minor volume di materiale complessivo presente in esso (circa 3230 mm³ rispetto ai circa 3640 mm³ degli altri due provini). Inoltre, essendo i provini "6" caratterizzati dalle minori percentuali di porosità rispetto ai provini realizzati con le altre due strategie, avrebbero dovuto possedere una resistenza migliore rispetto ad essi. Ciò che si osserva, invece, è l'opposto.

D'altro canto, tra i provini con strategia Rounded, il 2_2 che, come si è analizzato, possiede la più alta percentuale in assoluto di porosità, è anche caratterizzato da una resistenza a trazione minore di quella del provino 2_1. Ciò potrebbe voler dire che nel caso di elevate percentuali di porosità come quella riscontrata in questo caso, i difetti possano influenzare negativamente la resistenza di un provino anche con il 50% di riempimento. Oltretutto, dai valori di tensione calcolati, si evince l'elevata resistenza a trazione che caratterizza la strategia Rounded, sia perché, nonostante il provino 2_2 abbia la percentuale più alta di porosità in assoluto tra tutti i provini stampati, sopporti un carico simile se non maggiore rispetto a quello sopportato dai provini 50% Straight e Octagonal, sia perché il provino 2_1 possiede la resistenza a trazione più elevata in assoluto, quindi anche maggiore dei provini con riempimento del 100%. Quest'ultima osservazione potrebbe essere giustificata dal fatto che, dalle statistiche calcolate dall'analisi di porosità, si è notato che la quantità di materiale presente nel provino 2_1 è molto simile a quella caratterizzante i provini 7. Per quel che riguarda i provini Octagonal, essi sono caratterizzati da una resistenza a trazione anch'essa maggiore rispetto a quella dei provini Straight al 50% di infill e circa uguale a quella dei provini con riempimento al 100%. In riferimento a questi ultimi, tra tutti il 7_1 è l'unico provino per cui la resistenza a trazione mostrata sia correlabile con la propria percentuale di porosità. Essa, infatti, è la più bassa in assoluto riscontrata fra tutti i provini, nonostante siano stati realizzati con la massima percentuale di riempimento possibile. Proprio per questo motivo, la correlazione potrebbe essere giustificata dalla motivazione precedentemente enunciata per il provino 2_2, ma in questo caso in maniera opposta: la presenza di difetti deve essere particolarmente ridotta affinché possa influenzare - stavolta - positivamente persino la resistenza di un provino col 100 % (e probabilmente anche col 50%) di riempimento.

Per quanto riguarda i provini con infill 100%, escludendo dal discorso il provino 7_1 di cui si è già discusso, nel 7_2 e nel 7_3 si nota la possibile correlazione con la percentuale di porosità presente in essi ma non è possibile affermare lo stesso per il 7_4. Il comportamento di quest'ultimo, quindi, potrebbe essere dipeso dal volume più elevato di difetti, ovvero il difetto (o i difetti) singolo ha avuto conseguenze più incisive rispetto all'insieme di pori provocando un tipo di frattura più fragile. Ad avvalorare questa ipotesi si aggiunge il fatto che si è notato anche sui provini fisici che il tipo di rottura e formazione di bande di deformazione appaiono quasi identici nei provini 7_2 e 7_3 mentre diversi appaiono nel provino 7_1 e ancora differenti si osservano nel 7_4 (il cui taglio netto centrale e deformazione minima fra i quattro provini ne rispecchiano il comportamento fragile).

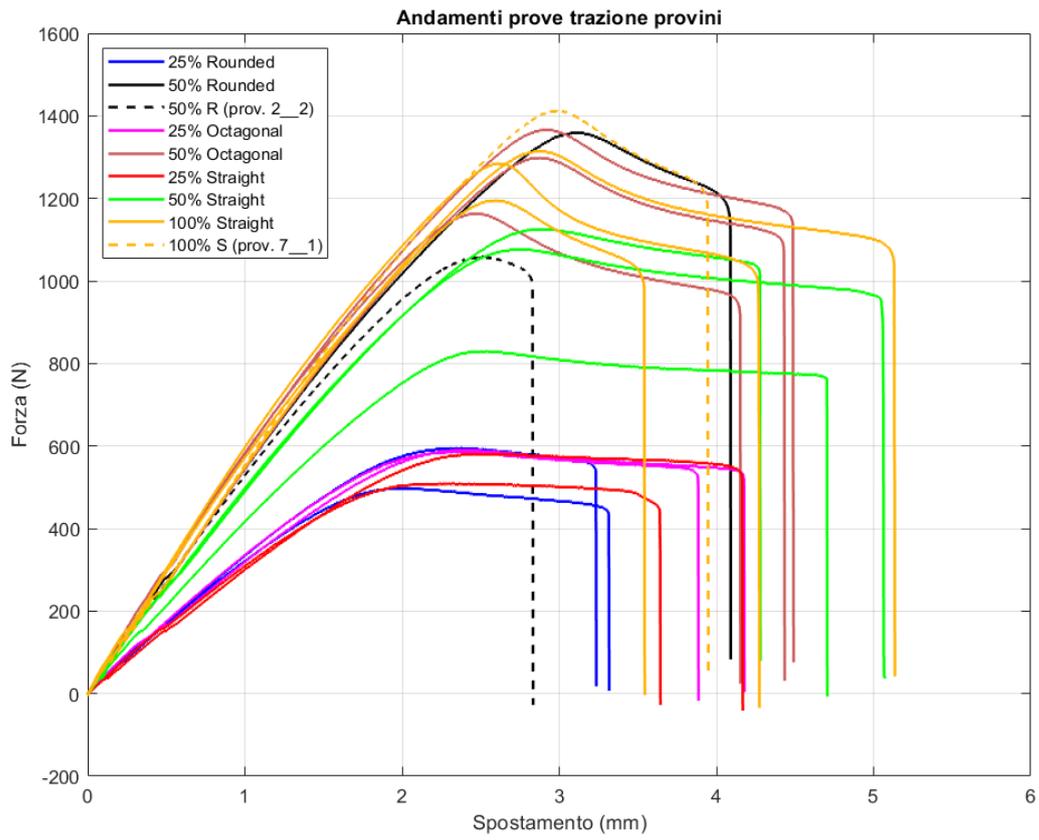


Figura 98. Grafici forza-spostamento di tutti i provini

4.3 Correlazione tra difetti e punti sul provino maggiormente sollecitati

Per valutare la correlazione tra i difetti riscontrati tramite tomografia e i punti maggiormente sollecitati sul provino, non potendo riportare sul modello 3D di **GOM Correlate** tutti i singoli pori identificati con l'analisi di porosità, si è scelto di selezionare i primi tre difetti dal volume maggiore che si presume possano avere più influenza sulla resistenza del provino stesso. Al contempo, dall'osservazione dei volumi tomografici si è ricercata una possibile correlazione anche tra gruppi di difetti dal volume medio-alto evidenziati dall'analisi di porosità e i punti di rottura e di maggiore sollecitazione (presenti sul provino sottoforma di bande di deformazione) rilevati sul provino fisico. In corrispondenza di questi è stata monitorata e osservata l'evoluzione delle deformazioni locali fino a rottura attraverso il software DIC. Osservando tutte le fasi delle varie prove di trazione, infatti, è stato possibile notare che in alcuni provini inizialmente la deformazione veniva innescata in corrispondenza dei difetti rilevati con l'analisi di porosità e solo dopo alcuni secondi si è riscontrato in un punto differente un aumento maggiore di deformazione che avrebbe successivamente portato alla rottura. Tale osservazione potrebbe indicare un'iniziale influenza del difetto in esame sul provino successivamente resa trascurabile dalla presenza di altri fattori che hanno portato il provino a rompersi o a deformarsi maggiormente in altri punti.

Ad esempio, nel caso del provino 4_3, in corrispondenza di un difetto di $0,06 \text{ mm}^3$ si è formata una banda di deformazione che con l'analisi effettuata su GOM Correlate è stato osservato possedere una deformazione maggiore (linea blu) fino a circa 24 secondi dall'inizio della prova rispetto a quella presente in corrispondenza del punto di rottura (linea nera) avvenuta dopo circa 33 secondi. Si riporta in Fig. 99 l'andamento delle deformazioni dei due punti nel tempo.

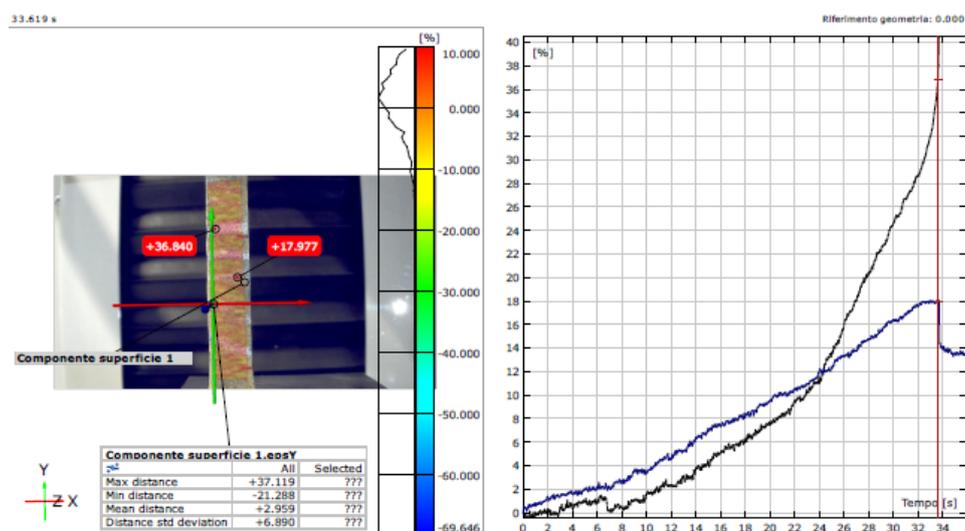


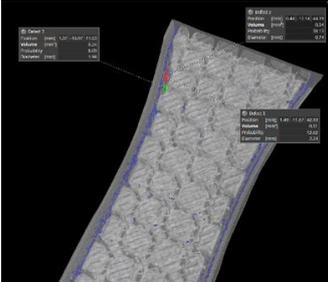
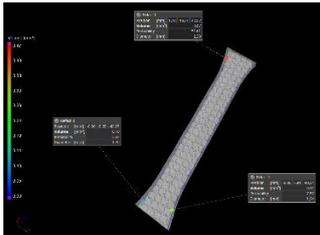
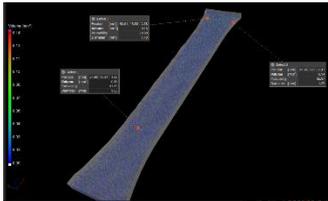
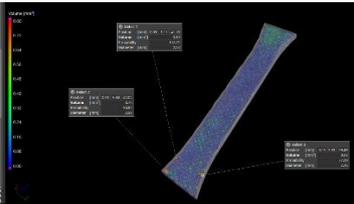
Figura 99. Andamenti delle deformazioni di due punti sul provino 4_3 di cui uno corrispondente ad un difetto identificato tramite analisi tomografica (linea blu) e uno corrispondente al punto di rottura (linea nera)

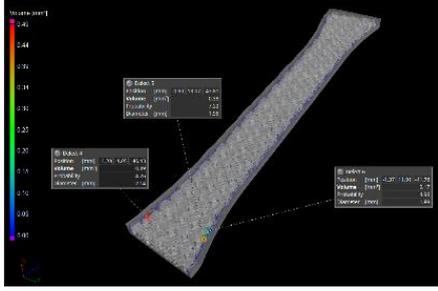
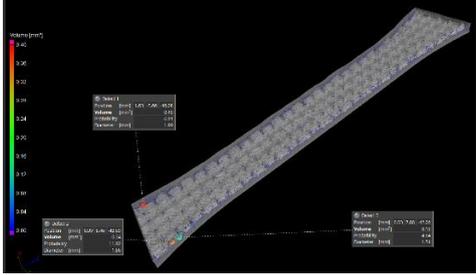
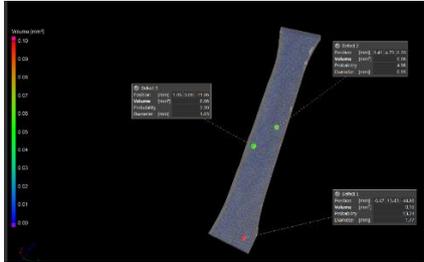
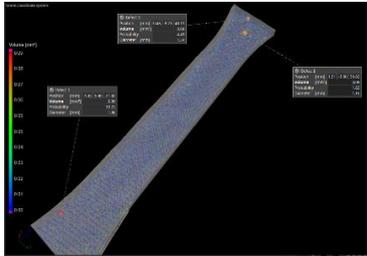
Altro aspetto che è importante sottolineare è che come è noto, secondo normativa, la rottura si dovrebbe verificare entro la parte centrale del provino affinché le prove di trazione possano essere reputate valide. Nella maggior parte delle prove ciò si è verificato, ma in alcuni casi la frattura è avvenuta al di fuori della zona centrale del provino e per questo motivo non è stato possibile rilevare la percentuale di deformazione locale con il software DIC. Si è comunque scelto di non escludere le prove in questione al fine di ottenere maggiori dati da analizzare, in quanto scopo di questa fase non consiste nello studio delle proprietà del materiale, bensì nella ricerca di una correlazione tra i punti maggiormente sollecitati durante la prova e i difetti individuati dall'analisi di porosità.

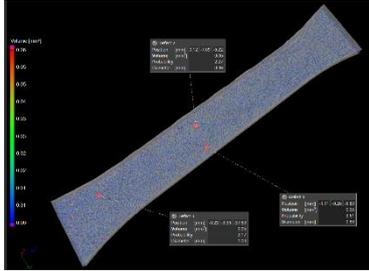
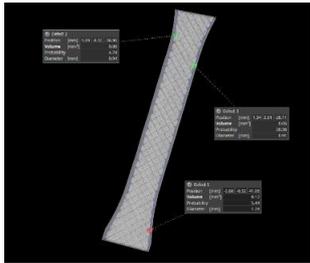
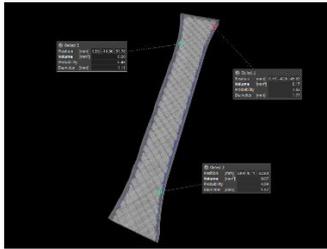
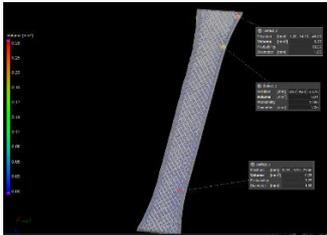
Di seguito, si mostra in Tabella 6 se dai risultati ottenuti è stata riscontrata o meno la corrispondenza tra le posizioni dei difetti evidenziati dall'analisi di porosità (i primi tre in ordine di volume) e:

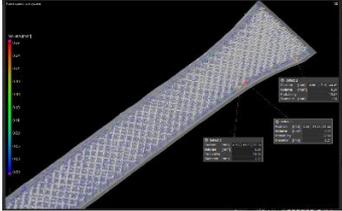
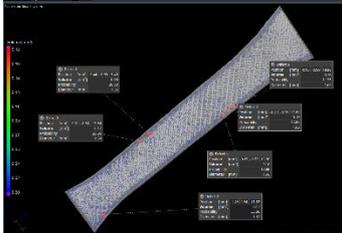
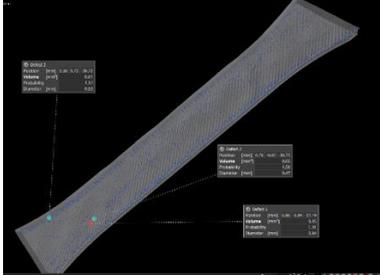
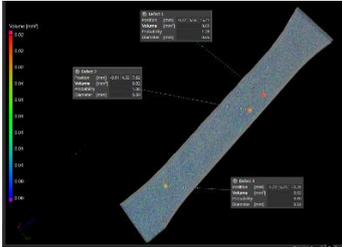
- i punti di rottura (nella seconda colonna);
- le zone ad elevata sollecitazione (ovvero dove si è riscontrata la formazione di bande di deformazione durante le prove di trazione) nella terza colonna.

Con “SÌ” si conferma il rilevamento di tale correlazione diretta con il difetto di cui viene indicato il volume. Con “NO” si indica che nessuna correlazione è stata riscontrata. Infine, con “FORSE” si è voluto indicare l'ottenimento di un risultato ritenuto incerto, situazione che si è presentata in tre casi: la presenza, in corrispondenza del punto di rottura o di una zona maggiormente sollecitata, di un gruppo di difetti dal volume medio-alto la cui posizione, però, non è detto coincida perfettamente con i primi considerando anche il procedimento lungo e complesso che avrebbe richiesto ricostruire sul CAD tutti i punti corrispondenti ai pori che costituiscono tali gruppi; la vicinanza di uno o di tutti e tre i difetti al punto di rottura o ad una banda di deformazione che potrebbe in qualche modo aver provocato una maggiore sollecitazione in quei punti nonostante la distanza (anche se non eccessiva) rispetto ad essi; il rilevamento tramite l'analisi dell'evoluzione delle deformazioni effettuata con GOM Correlate, durante le fasi iniziali della prova di trazione, di un valore di deformazione maggiore rispetto a quello presente sul punto di successiva rottura in corrispondenza di un punto la cui posizione, individuata sul provino nel software DIC, potrebbe corrispondere ad uno dei tre difetti dal volume maggiore (come nella situazione osservata nell'esempio precedentemente esposto tramite Fig. 99) senza però poterne essere certi essendo difficile individuare l'esatta posizione di un punto del provino sul video e confrontarla con quella del difetto noto sul provino fisico.

Provino	Corrispondenza tra difetti e punto di rottura	Corrispondenza tra difetti e zona ad elevata sollecitazione, ma non di rottura	Informazioni aggiuntive
1_1 25% R	FORSE Presenza di alcuni difetti (anche se caratterizzati da un valore di volume minore rispetto ai primi tre difetti) nella zona interna in corrispondenza del punto di rottura del provino	NO	Difetti maggiori ravvicinati lungo il raccordo dell'estremità superiore (fuori inquadratura) 
1_2 25% R	FORSE Presenza di alcuni difetti (anche se caratterizzati da un valore di volume minore rispetto ai primi tre difetti) nella zona interna in corrispondenza del punto di rottura del provino	SÌ (0,31 mm ³) In corrispondenza del difetto 2 si è riscontrata una banda sul provino il cui valore di deformazione non è stato possibile rilevare poiché non soggetto all'inquadratura.	Difetti 2 e 3 lungo i due raccordi dell'estremità inferiore, difetto 1 lungo un raccordo dell'estremità superiore 
2_1 50% R	FORSE Si nota una concentrazione di difetti di volume compreso tra 0,06 e 0,04 mm ³ in corrispondenza della zona di rottura del provino	SÌ (0,14 mm ³) Si nota dall'analisi svolta su GOM che inizialmente in quel punto si aveva una deformazione maggiore rispetto al punto di rottura	Due difetti ai due raccordi dell'estremità superiore, un difetto sulla parte bassa della zona centrale (verso l'interno) 
2_2 50% R	FORSE La presenza dei tre difetti dai volumi più elevati sulla parte inferiore del provino insieme ad una piccola concentrazione di difetti dalle dimensioni comprese tra 0,5 e 0,3 mm ³ potrebbe aver causato la rottura in quel punto	NO Durante i primi secondi della prova la deformazione massima si ha sulla parte alta della lunghezza utile del provino in corrispondenza della quale si ha una grande concentrazione di difetti dal volume compreso tra 0,5 e 0,3 mm ³	Si notano poche se non nessuna banda di deformazione e poco definite. I livelli di deformazione locale, infatti, sono molto ridotti rispetto agli altri provini 

<p>3_1 25% O</p>	<p>FORSE</p> <p>I tre difetti lungo i due raccordi dell'estremità inferiore potrebbero aver influito sulla rottura nella parte bassa della parte centrale dal profilo rettilineo</p>	<p>FORSE</p> <p>Dall'analisi delle deformazioni inizialmente il punto più critico (ovvero con deformazione maggiore rispetto a quella relativa al punto di rottura) si trovava più in basso (più vicino ai 3 difetti) in corrispondenza del quale si trova una banda</p>	<p>Tutti e tre i difetti lungo i due raccordi dell'estremità inferiore</p> 
<p>3_2 25% O</p>	<p>FORSE</p> <p>I tre difetti lungo i due raccordi dell'estremità inferiore potrebbero aver influito sulla rottura nella parte bassa della parte centrale dal profilo rettilineo</p>	<p>FORSE</p> <p>Dall'analisi delle deformazioni inizialmente il punto più critico (ovvero con deformazione maggiore rispetto a quella relativa al punto di rottura) si trovava più in basso (più vicino ai 3 difetti) in corrispondenza del quale si trova una banda</p>	<p>Tutti e tre i difetti lungo i due raccordi dell'estremità inferiore</p> 
<p>4_1 50% O</p>	<p>FORSE</p> <p>Si nota dal modello tomografico la presenza di difetti concentrati in quella zona dai volumi compresi tra 0,06 e 0,04 mm³ correlabili al punto di rottura</p>	<p>SÌ (0,06 mm³)</p>	<p>I difetti evidenziati non sono tanto maggiori di altri quindi questa correlazione non è sicura</p> 
<p>4_2 50% O</p>	<p>NO</p>	<p>FORSE</p> <p>Banda di deformazione provocata dalla concentrazione di difetti con volumi compresi tra 0,06 e 0,09 mm³ individuati nell'intorno della zona superiore della parte centrale del provino e la cui deformazione prima era maggiore di quella in</p>	<p>Difetti in zone al di fuori di quella d'interesse</p> 

		corrispondenza del punto di rottura.	
4_3 50% O	NO	SÌ (0,06 mm ³) Dall'analisi delle deformazioni si nota che in corrispondenza di questa banda, la deformazione in una prima fase della prova risulta maggiore di quella presente in corrispondenza del punto di rottura	Due difetti interno alla zona d'interesse e uno all'altezza del raggio di raccordo dell'estremità inferiore ma sempre interno 
5_1 25% S	SÌ (0,06 mm ³) dalla tomografia si nota una concentrazione di difetti (di colore azzurro) con un volume compreso tra 0,03 e 0,04 mm ³ sul lato destro all'altezza del punto 2 che potrebbe aver indotto ulteriormente la rottura sulla zona superiore	SÌ (0,06 mm ³)	Difetti lungo i bordi, difetto 1 lungo il raccordo dell'estremità inferiore, difetto 2 lungo il raccordo dell'estremità superiore, difetto 3 all'altezza della parte alta della zona centrale. 
5_2 25% S	NO	SÌ (2) (0,07 mm ³ e 0,06 mm ³) si nota che nei primi secondi in corrispondenza del difetto da 0,07 mm ³ la deformazione è la maggiore su tutto il provino	Difetti lungo i bordi, difetto 1 vicino alla testa superiore, difetti 2 e 3 appena al di fuori della parte centrale con profilo rettilineo ma alle due estremità opposte 
6_1 50% S	SÌ (0,13 mm ³)	SÌ (2) (0,21 mm ³ e 0,28 mm ³)	Due difetti fuori dalla zona d'interesse lungo il raccordo all'estremità superiore, un difetto sulla parte bassa della zona d'interesse 

6_2 50% S	SÌ (0,21 mm ³) Possibile causa di rottura in quel punto anche per la sua vicinanza con il difetto 1 di 0,27 mm ³	NO	Due difetti vicini lungo il bordo della parte alta della zona d'interesse e uno sulla testa dell'estremità superiore 
6_3 50% S	FORSE Vi sono dei difetti con un volume appena minore di quelli dei primi tre difetti (tra 0,13 e 0,16 mm ³) che si trovano in prossimità (appena al di sopra) del punto di rottura.	SÌ (2) (0,18 mm ³ e 0,17 mm ³)	Dall'analisi delle deformazioni, si nota che inizialmente i valori maggiori di deformazione si hanno al di sopra del punto di rottura in corrispondenza di quei difetti tra 0,13 e 0,16 mm ³ , poi col passare del tempo il valore di deformazione più alto si ha sul punto di rottura. 
7_1 100%	FORSE Frattura sulla parte medio-bassa del provino per la presenza di una certa concentrazione di difetti in quella zona (anche se dal volume minimo)	SÌ (0,02 mm ³) Questa deformazione era inizialmente maggiore di quella di rottura ma non la massima	Pochi punti in cui il provino è stato deformato 
7_2 100%	SÌ (0,02 mm ³)	NO	Uniformità nella distribuzione e nel volume dei difetti 
7_3 100%	FORSE Concentrazione di difetti nella zona di rottura con volume di 0,05-0,06 mm ³	SÌ (0,07 mm ³)	Dall'analisi delle deformazioni si nota che inizialmente la maggiore deformazione si ha sulla parte superiore al punto di rottura (e in effetti lì c'è concentrazione di difetti con volume di 0,05-0,06 mm ³) per poi col passare del tempo avere come

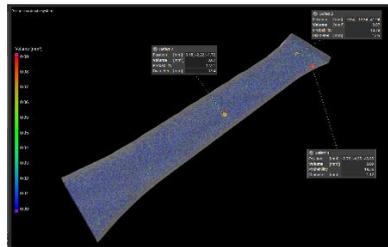
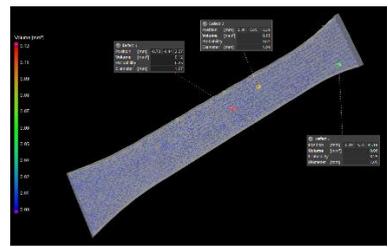
			valore di deformazione maggiore quello in corrispondenza del punto di rottura
			
7_4 100%	SÌ (0,12 mm ³)	FORSE Il punto 2 si trova un po' più in alto di una banda al di sopra del punto di rottura. Si nota che in corrispondenza di esso all'inizio la deformazione era maggiore rispetto al punto di rottura	

Tabella 6. Riassunto dei risultati ottenuti dalla ricerca di correlazione tra difetti e punti di rottura o zone ad elevata sollecitazione

Si è notato immediatamente durante le analisi delle porosità che tutti i provini con il 25% di infill, a prescindere dalla strategia con cui sono stati realizzati, presentano la maggior parte dei difetti in corrispondenza dei bordi. Ciò può essere giustificato dal fatto che, essendo la geometria interna caratterizzata dai vuoti dalle dimensioni maggiori rispetto ai provini con le altre percentuali di riempimento, la gran parte del materiale si concentra lungo il profilo del provino, offrendo una condizione più favorevole alla formazione di pori in quella zona.

I provini con strategia Rounded con questa percentuale di riempimento non hanno presentato una correlazione diretta con i singoli difetti individuati ma piuttosto con concentrazioni di difetti che potrebbero aver causato la rottura in un punto che è risultato essere lo stesso per entrambi i provini.

Neanche nei provini Octagonal è stata trovata una corrispondenza esatta con i difetti dalle dimensioni maggiori ma la particolarità di questo caso riguarda il fatto che questi si trovassero nella stessa posizione nei due provini, tutti a una decina di mm al di sotto rispetto al punto di rottura che è avvenuta anche in questo caso in maniera quasi identica in entrambi. Però, grazie all'osservazione dell'evoluzione dei valori di deformazione su tutto il provino, si è notato che in corrispondenza di un punto compreso tra quello di rottura e i difetti evidenziati, in una prima fase della prova la deformazione era maggiore rispetto a quella in corrispondenza del punto di rottura.

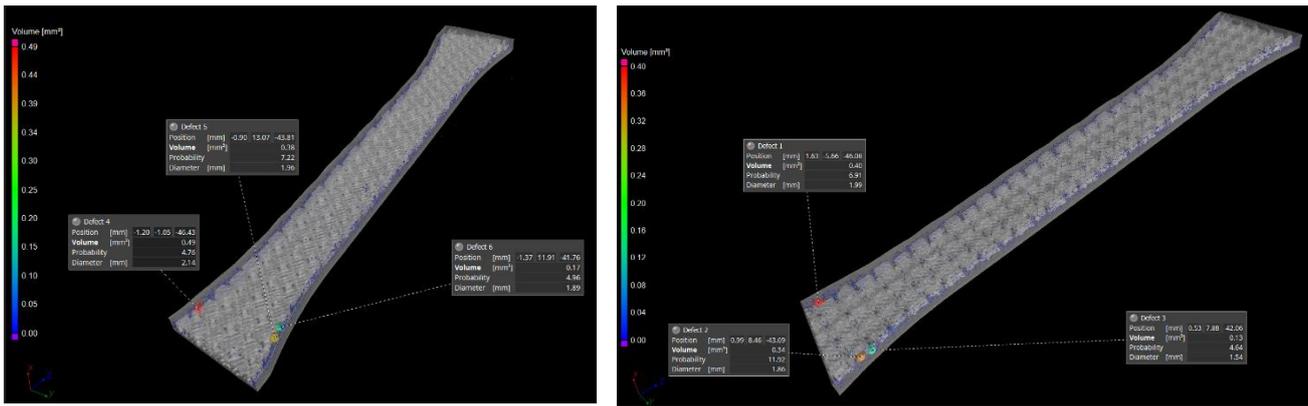


Figura 100. Difetti nei provini 3_1 e 3_2

Per quanto riguarda la tipologia con strategia Straight, invece, si è riscontrata una maggiore correlazione tra difetti e punti maggiormente sollecitati ma la frattura non si è verificata allo stesso modo nei due provini come accaduto per le altre due strategie. In particolare, il provino 5_1 ha subito un tipo di rottura simile (ma non quasi identica come negli altri casi) a quella subita dai provini Rounded. Si è notato, infatti, che essi oltre a possedere la stessa percentuale di porosità, presentano anche una concentrazione dei difetti in corrispondenza del punto di frattura. In più rispetto ai provini “1”, però, nel 5_1 è stata osservata una correlazione diretta tra difetto e punto di rottura (cosa che potrebbe aver reso la forma del taglio diversa rispetto a quella dei provini “1”). Nel 5_2, invece, avendo i difetti (di cui si è trovata correlazione con delle bande di deformazione) un volume maggiore rispetto a quelli individuati nel 5_1 e osservando dall’analisi DIC una deformazione più elevata in corrispondenza di uno di essi rispetto a quella al punto di rottura in una prima fase della prova di trazione, il difetto in questione potrebbe aver influenzato il punto e la modalità di rottura, differenziandola dal provino 5_1. Bisogna anche precisare che i volumi dei difetti riscontrati nella tipologia 25% Straight sono minori rispetto a quelli evidenziati nei 25% Rounded e Octagonal e nonostante questo si è notata maggiore correlazione diretta con singoli difetti nei provini della prima tipologia. Ciò potrebbe voler dire che i provini realizzati con strategia Straight siano maggiormente influenzati dalla presenza di difetti dal volume maggiore rispetto agli altri presenti nel provino.

Per quanto riguarda i provini con il 50% di riempimento, non si ottengono risultati interpretabili in modo chiaro. Cominciando con i provini realizzati con strategia Rounded, non è stata riscontrata alcuna correlazione diretta tra i punti di rottura e i singoli difetti ma si è notato che in entrambi la rottura è avvenuta nell’intorno di concentrazioni di difetti dal volume medio-alto anche se in posizioni diverse nei due provini. In realtà, nel 2_2 sono stati individuati due diversi gruppi di difetti di volume compreso tra 0,3 e 0,5 mm³, uno più grande verso l’estremità superiore e uno più piccolo nella parte bassa della zona centrale, dove è avvenuta la frattura. Poco più in basso di quest’ultima vi erano i tre difetti dal volume maggiore che, come si è visto al paragrafo 4.1.1, sono caratterizzati dai volumi più elevati fra tutti i provini analizzati. Questi, quindi, potrebbero aver influenzato notevolmente la rottura in quella

zona considerando anche il fatto che dall'analisi DIC si è osservato che inizialmente la deformazione maggiore si è innescata in corrispondenza della concentrazione più estesa di difetti.

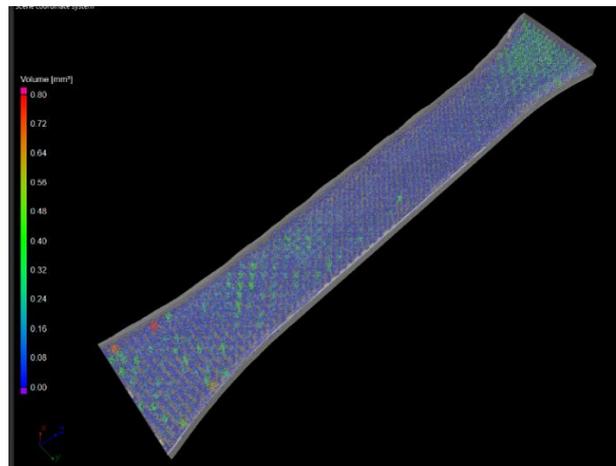


Figura 101. Due diverse concentrazioni di difetti nel provino 2_2

Nel caso dei provini con strategia Octagonal i risultati sono piuttosto discordanti fra loro. Solo nel provino 4_1 è stata trovata una correlazione tra il punto di rottura e uno dei difetti identificati fra i primi tre in termini di volume ($0,06 \text{ mm}^3$) che si trova però in una zona in cui si concentrano molti difetti dal volume compreso tra $0,06$ e $0,04 \text{ mm}^3$, circa lo stesso volume del difetto prima citato. Per questo motivo non è possibile essere certi della diretta correlazione tra il punto di rottura e il singolo difetto. Maggiore correlazione si è riscontrata invece con bande di deformazione formatesi durante la prova anche negli altri due provini della stessa tipologia in cui però non è stata osservata alcuna corrispondenza con i punti di rottura, a quanto pare causate né da concentrazioni di difetti né da un singolo difetto in particolare.

Infine, per quanto riguarda la tipologia Straight, si è notata maggiormente la correlazione tra difetti e punti di rottura e/o bande di deformazione. Ciò potrebbe essere giustificato dal fatto che la minore porosità che caratterizza i provini realizzati con questa strategia rispetto alle altre tipologie di provino con stessa percentuale di riempimento potrebbe aver fatto sì che i pori dalle dimensioni maggiori determinino più incisivamente i punti di rottura e deformazione rispetto agli altri che, oltre ad essere molto più piccoli, sono in quantità ridotta. Questa ipotesi però non giustificherebbe le correlazioni riscontrate anche nei provini con riempimento del 100%, che pur essendo caratterizzati dalla stessa strategia, presentano porosità più elevata di quelli con il 50% di infill e simile a quelle dei provini con strategia Rounded e Octagonal. Allora, avvalorando l'ipotesi espressa precedentemente per i provini 25% Straight, si potrebbe pensare che sia proprio la geometria che caratterizza questo tipo di strategia a far sì che i difetti influenzino maggiormente il comportamento meccanico dei provini.

Inoltre, si è notato che in molti provini con 50% di infill i difetti si trovano in zone al di fuori della zona teoricamente soggetta alla trazione e in cui il provino dovrebbe subire frattura. Infatti, nel caso delle strategie Rounded e Octagonal quei difetti non corrispondono praticamente mai ai punti di rottura o deformazione riscontrati sui provini fisici mentre, al contrario, due dei tre provini con strategia Straight

hanno subito rottura in corrispondenza di quei difetti nonostante si trovassero in prossimità dei raggi di raccordo del provino, ovvero una zona difficilmente soggetta a rottura. Questo potrebbe dimostrare nuovamente la maggiore influenza che hanno i difetti (soprattutto quelli dai volumi maggiori) su provini realizzati con strategia Straight.

CONCLUSIONI

L'attività svolta presso il Centro Interdipartimentale di Additive Manufacturing (IAM@PoliTO) ha permesso la ricerca di una correlazione tra le proprietà meccaniche di provini stampati con tecnologia FDM e i difetti riscontrati al loro interno tramite tomografia computerizzata. Grazie a quest'ultima è stato possibile analizzare internamente sette tipologie di provini mostrandone le differenti percentuali di porosità, distribuzioni e volumi dei difetti.

Dai risultati ottenuti si evince innanzi tutto che, per quanto riguarda il comportamento a trazione, è stata osservata una corrispondenza con le percentuali di porosità contenute nei provini caratterizzati da una percentuale di riempimento del 25%. Contrariamente, non è stato rilevato alcun legame con la maggior parte dei provini con infill del 50% e del 100%. Le uniche eccezioni hanno riguardato un provino che ha presentato la massima quantità di difetti al suo interno e un altro, invece, caratterizzato da una percentuale di porosità particolarmente ridotta. Da quanto osservato, si può presumere che la presenza di difetti interni influisca sul comportamento meccanico del provino in base alla relazione esistente tra percentuale di riempimento e percentuale di porosità al suo interno. Evidentemente, la combinazione di un riempimento del 25% con le percentuali di porosità riscontrate in quei provini permette a queste ultime di influire sulla capacità di sopportazione del carico. Lo stesso accade nei due casi anomali descritti, solo che, per provini con una maggiore percentuale di riempimento, affinché si ottenga un'analogia correlazione, la porosità deve essere marcatamente inferiore o superiore rispetto a quella riscontrata per poter provocare conseguenze sulla resistenza a trazione. Da ciò ne deriva quindi l'assenza di un'influenza delle percentuali di porosità rilevate sulla resistenza della maggior parte dei provini con riempimento 50% e 100%.

La ricerca della correlazione tra singoli difetti e i punti sul provino particolarmente sollecitati non ha mostrato risultati facilmente interpretabili. Ciò anche a causa del fatto che, in alcuni casi, non è stato possibile riscontrare una correlazione poiché i difetti dai volumi maggiori sono stati individuati lungo i raggi di raccordo dei provini, ovvero in zone che, oltre a non essere soggette all'inquadratura della telecamera utilizzata per il monitoraggio delle deformazioni con tecnologia DIC, si trovano all'altezza di un'area di sezione maggiore rispetto a quella centrale del provino e che quindi è meno soggetta alle tensioni di trazione durante la prova meccanica. La geometria del provino, infatti, è stata studiata in modo tale che la rottura avvenga nella sezione centrale dello stesso. Nonostante ciò, si è riusciti in altri casi a identificare punti di rottura e punti particolarmente sollecitati in corrispondenza dei quali si erano precedentemente individuati o i difetti dal volume maggiore o gruppi di difetti dal volume medio-alto ma la cui concentrazione in un determinato punto potrebbe aver condizionato il comportamento a trazione. Tra le tre tipologie, i provini in cui si è riscontrata una maggiore correlazione del primo tipo sono quelli realizzati con strategia Straight. Nei provini caratterizzati dalle strategie Rounded e Octagonal, invece, spesso sono le concentrazioni di porosità che sembrano influenzare la deformazione

in un punto. Si potrebbe quindi supporre che, in base alla geometria della struttura interna dei provini, i singoli difetti dal volume maggiore rispetto a tutti quelli presenti abbiano maggiore o minore capacità di condizionare la sollecitazione nel punto in cui questi si trovano.

In conclusione, la tomografia si è confermata un ottimo strumento di indagine interna non distruttiva utile all'individuazione dei difetti e al calcolo delle percentuali di porosità permettendo, rispetto a questi aspetti, una distinzione della loro influenza sulle varie tipologie di provini.

Per quanto riguarda ulteriori approfondimenti futuri, rispetto ai risultati preliminari presentati in questa tesi che spesso sono stati oggetto di un'interpretazione incerta, per una maggiore significatività statistica della ricerca di correlazione tra la difettosità dei provini stampati 3D e i risultati delle prove di trazione, sarebbe necessario estendere la campagna sperimentale all'analisi di un maggior numero di campioni per ogni tipologia di provino e strategia di riempimento.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] Luca Iuliano, Dispense del corso di “Tecniche di Fabbricazione Additiva”, *Introduzione all'AM e Fused Deposition Modelling*, Politecnico di Torino, Anno Accademico 2018/2019
- [2] Eleonora Atzeni, Dispense del corso di “Sistemi integrati di produzione”, *SLA e FDM*, Politecnico di Torino, Anno Accademico 2019/2020
- [3] Tronvoll, S. A., Vedvik, N. P., Elverum, C. W., & Welo, T. (2019). A new method for assessing anisotropy in fused deposition modeled parts using computed tomography data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1), 47-65.
- [4] Englert, L., Dietrich, S., & Pinter, P. (2020). Investigations on printing path dependent properties of additively manufactured samples using micro computed tomography. *Rapid Prototyping Journal*.
- [5] Chen, R. K., Lo, T. T., Chen, L., & Shih, A. J. (2015). Nano-CT characterization of structural voids and air bubbles in fused deposition modeling for additive manufacturing. In *ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection.
- [6] Ang, K. C., Leong, K. F., Chua, C. K., & Chandrasekaran, M. (2006). Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures. *Rapid Prototyping Journal*.
- [7] Wang, X., Zhao, L., Fuh, J. Y. H., & Lee, H. P. (2019). Effect of porosity on mechanical properties of 3D printed polymers: Experiments and micromechanical modeling based on X-ray computed tomography analysis. *Polymers*, 11(7), 1154.
- [8] Marseglia, D., Nacucchi, M., & De Pascalis, F. (2017). Analisi morfologica/strutturale di schiume polimeriche mediante micro-tomografia a raggi X e test meccanici in situ, Rapporto tecnico RT/2017/3/ENEA.
- [9] Shah, P., Racasan, R., & Bills, P. (2016). Comparison of different additive manufacturing methods using computed tomography. *Case studies in nondestructive testing and evaluation*, 6, 69-78.
- [10] Waller, J. M., Parker, B. H., Hodges, K. L., Burke, E. R., Walker, J. L., & Generazio, E. R. (2014). Nondestructive evaluation of additive manufacturing. *National Aeronautics and Space Administration*.
- [11] Minetola P., "L'additive ai raggi X", sezione "Tecnologia Additive Manufacturing - Controlli Non Distruttivi", rivista *The Next Factory*, Anno 3 - Numero 2, pagine 76-77.
- [12] Paolo Minetola, Dispense del corso di “Tecniche di Fabbricazione Additiva”, *Collaudo dimensionale e Reverse Engineering*, Politecnico di Torino, Anno Accademico 2018/2019
- [13] Pedersen, D. B., Andersen, S. A., & Hansen, H. N. (2019). Measurements in additive manufacturing. *Metrology. Precision Manufacturing*.
- [14] Kruth, J. P., Bartscher, M., Carmignato, S., Schmitt, R., De Chiffre, L., & Weckenmann, A. (2011). Computed tomography for dimensional metrology. *CIRP annals*, 60(2), 821-842.
- [15] <https://www.tomografi.it/phoenix-vtomex.html> (ultima consultazione 14/02/2021)
- [16] Weiß, D., Shi, Q., & Kuhn, C. (2012, September). Measuring the 3D resolution of a micro-focus X-ray CT setup. In *Conference on Industrial Computed Tomography* (pp. 345-53).

- [17] Ali, M. A., Umer, R., & Khan, K. A. (2020). *CT Scan Generated Material Twins for Composites Manufacturing in Industry 4.0*. Springer.
- [18] <https://www.scienzagiovane.unibo.it/favole/tac/raggix.html> (ultima consultazione 14/02/2021)
- [19] <https://www.youtube.com/watch?v=IcWjZbXiFkM> (ultima consultazione 14/02/2021)
- [20] Hsieh, J. (2003). *Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances* (Vol. 114). SPIE press.
- [21] Babout, L., Grudzień, K., Wiącek, J., Niedostatkiewicz, M., Karpiński, B., & Szkodo, M. (2018). Selection of material for X-ray tomography analysis and DEM simulations: comparison between granular materials of biological and non-biological origins. *Granular Matter*, 20(3), 1-14.
- [22] Feldkamp, L. A., Davis, L. C., & Kress, J. W. (1984). Practical cone-beam algorithm. *Josa a*, 1(6), 612-619.
- [23] Antonio Gugliotta, Dispense del corso di “Costruzione di macchine”, *Fatica dei materiali*, Politecnico di Torino, Anno Accademico 2017/2018
- [24] Giovanni Petrucci, Dispense del corso di “Lezioni di Costruzione di Macchine”, *Proprietà dei materiali e prove meccaniche*, Università degli studi di Palermo
- [25] http://www.unife.it/interfacolta/design/insegnamenti/materiali-per-prodotto-industriale/PROVA%20DI%20TRAZIONE%20STATICA_sito.pdf (ultima consultazione 22/02/2021)
- [26] <https://people.unica.it/francescoaymerich/files/2017/06/Slides-DIC.pdf> (ultima consultazione 01/03/2021)
- [27] Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement science and technology*, 20(6), 062001.
- [28] <https://www.bakerhughesds.com/industrial-x-ray-ct-scanners/phoenix-vtomex-s-micro-ct> (ultima consultazione 14/02/2021)
- [29] <https://www.amnh.org/research/microscopy-and-imaging-facility/instruments/ge-phoenix-v-tome-x-s240> (ultima consultazione 14/02/2021)
- [30] General Electric Company, *Specifiche tecniche e configurazioni phoenix v|tome|x s e v|tome|x m*, 2016
- [31] General Electric Company, *phoenix datos|x 2, Advanced CT software for fully automated data acquisition, reconstruction and volume processing with GE's industrial CT systems*, 2012
- [32] General Electric Company, *datos|x acquisition, Acquisition software for computer tomography*, 2019
- [33] Mairhofer, S., Pridmore, T., Johnson, J., Wells, D. M., Bennett, M. J., Mooney, S. J., & Sturrock, C. J. (2017). X-ray computed tomography of crop plant root systems grown in soil. *Current Protocols in Plant Biology*, 2(4), 270-286.
- [34] <https://pdf.directindustry.it/pdf-en/volume-graphics-gmbh/vgstudio-max/147738-896035.html#open> (ultima consultazione 04/03/2021)
- [35] Volume Graphics GmbH, *VGStudio MAX 3.0, The market's leading application software for analysis and visualization of industrial computed tomography / voxel data*, 2014
- [36] Volume Graphics GmbH, *VGStudio Max Reference Manual*, 2020
- [37] <https://3ntr.net/it/> (ultima consultazione 17/02/2021)

- [38] <https://www.meccanicanews.com/2015/11/05/jdeal-form-la-stampa-3d-che-nasce-dalla-corsetteria/> (ultima consultazione 09/02/2021)
- [39] 3ntr, *Manuale uso stampanti 3d A4v3 A2v2*, 2015
- [40] William F. Smith, Javad Hashemi, *Scienza e tecnologia dei materiali*, McGraw-Hill, 2016
- [41] <https://felofil.com/it/abs-mini-guida-del-filamento-plastico-per-stampanti-3d/?v=5ea34fa833a1> (ultima consultazione 03/03/2021)
- [42] <https://www.filoalfa3d.com/it/content/10-abs> (ultima consultazione 02/03/2021)
- [43] <https://www.kisslicer.com/> (ultima consultazione 10/02/2021)
- [44] <https://www.lillia.net/kisslicer-stile/> (ultima consultazione 10/02/2021)
- [45] <https://docplayer.it/13358903-Manuale-uso-stampanti-3d-a4v3-a2v2-v-201015.html> (ultima consultazione 15/02/2021)
- [46] <https://www.repetier.com/> (ultima consultazione 11/02/2021)
- [47] <https://www.easydur.com/aura-tensile/> (ultima consultazione 07/03/2021)
- [48] <https://www.amazon.it/Svpro-Varifocal-Illumination-Industrial-SV-USBFHD06H-SFV/dp/B07HJXYSN4?th=1> (ultima consultazione 30/03/2021)
- [49] GOM Correlate, *Software GOM 2019, Training di base*, 2019
- [50] ASTM D638-14, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastic