



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

Misure dimensionali mediante tomografia a raggi x e macchina di misura di coordinate e analisi di dati mediante l'utilizzo di algoritmi

Dimensional measurements using x-ray tomography and coordinate measuring machine and data analysis using algorithms

Relatore:

Prof. Paolo Castellini

Tesi di Laurea di:

Andrea Faini

A.A. 2020 / 2021

Indice

1. INTRODUZIONE:	
1.1. Introduzione.....	5
2. STRUMENTI DI MISURA:	
2.1. Macchina di misura a Coordinate (CMM).....	9
2.2. Sistema di Tomografia computerizzato (TC).....	12
3. CALCOLO SCANALATURA:	
3.1. Obiettivi della misurazione.....	15
3.2. Taratura e settaggio dello strumento.....	18
3.3. Operazione di misura.....	22
3.4. Lavorazione post misurazione.....	26
4. CALCOLO PROVINO TITANIO:	
4.1. Obiettivi della misurazione.....	29
4.2. Settaggio dello strumento e operazione di misura.....	31
4.3. Lavorazione post misurazione.....	39
5. CONCLUSIONE:	
5.1. Conclusione.....	44
6. BIBLIOGRAFIA:	
6.1. Bibliografia e Sitografia.....	47
7. RINGRAZIAMENTI:	
7.1. Ringraziamenti.....	48

INTRODUZIONE

1.1) Introduzione:

Il presente elaborato rappresenta la conclusione del mio tirocinio svolto presso l'Università.

Di seguito illustrerò le diverse fasi del mio lavoro, i procedimenti seguiti e le conclusioni a cui sono arrivato.

Lo scopo principale di questo progetto è quello di effettuare misurazioni di precisione su varie tipologie di oggetti. Lo svolgimento consiste nell'elaborare i dati rilevati dagli strumenti di misurazione in maniera tale da renderli fruibili ed evidenziare le caratteristiche di maggiore interesse del pezzo.

Le misurazioni posso essere interne o esterne con riferimento al pezzo da misurare; nel primo caso gli strumenti di misurazione utilizzano una tecnologia che ci permette di analizzare la parte interna dell'oggetto, consentendoci di ottenere informazioni di grande interesse, come per esempio, la struttura interna del pezzo, la sua porosità e molte altre caratteristiche; nel secondo caso è possibile ottenere un'ulteriore suddivisione tra misurazioni grossolane, effettuate mediante tecniche di reverse engineering (che non saranno trattate all'interno di questo elaborato) e misurazioni di precisione, che invece usano strumenti in

grado di restituire misure con una grande accuratezza. Ovviamente questo tipo di misurazione, a differenza del primo tipo, permette di avere una diversa tipologia di informazione sul pezzo che sto analizzando, come ad esempio, dimensioni dello stesso con elevata precisione, informazioni sulle tolleranze, coordinate dei singoli punti appartenenti all'oggetto rispetto a un qualsiasi sistema di riferimento scelto, ecc.

La scelta della tipologia di misurazione e quindi dello strumento da utilizzare dipende da diversi fattori. Nel nostro caso sono la tipologia dell'oggetto da misurare e le caratteristiche principali da analizzare di quel determinato pezzo.

La prima tipologia di oggetti da prendere in esame è un pezzo realizzato con tecnologia di additive manufacturing, però in questo caso il materiale che lo costituisce è plastico e l'oggetto viene ottenuto mediante sedimentazione e consolidamento di strati sovrapposti (stampa 3D tradizionale). Nel presente caso lo scopo della misurazione è quello di individuare le coordinate di particolari punti di una fessura artificiale, posta al centro del pezzo, per utilizzarle successivamente mediante un'elaborazione fatta tramite il software Excel: Questa procedura ha l'obiettivo finale di verificare se la fessura centrale, appositamente creata e misurata con altri strumenti, ha lo stesso spessore ottenuto mediante l'utilizzo di un algoritmo creato per ottenerla in maniera automatica;

quindi lo scopo è verificare l'efficacia del codice utilizzando uno strumento di grande precisione.

La seconda tipologia di oggetti sottoposti alle misurazioni sono stati dei provini realizzati mediante tecniche di additive manufacturing. Questo tipo di tecnologia è alla base della stampa 3D e nello specifico i provini in esame sono stati realizzati in titanio usando stampanti che mediante l'uso di un laser riescono a trasformare le polveri, in questo caso di titanio, in un solido compatto, consolidando le particelle. Lo scopo della misurazione per questi oggetti è quello di effettuare un vero e proprio controllo qualità sia per quanto riguarda le dimensioni del provino, verificando se le tolleranze attese dal processo di produzione sono poi state realmente rispettate, sia per quanto riguarda la porosità interna del pezzo, caratteristica fondamentale per capire la qualità dell'oggetto in questione e sicuramente di maggior interesse.

Definite le diverse necessità dei due oggetti da misurare, si è scelto di optare per due tipologie di misurazioni diverse, e quindi per due strumenti di misura anch'essi diversi tra loro:

- Nel primo caso, vista la grande precisione richiesta per il controllo dell'efficacia dell'algoritmo, si è deciso di utilizzare la **Macchina di misura a Coordinate (CMM)**;
- Nel secondo caso invece, viste le caratteristiche che si vogliono analizzare e vista anche la natura del

pezzo, si è deciso di misurarlo utilizzando un **Sistema di Tomografia computerizzato (TC)**.

STRUMENTI DI MISURA

2.1) Macchina di misura a Coordinate (CMM):

Questo strumento di misura è impiegato, come già riportato nel paragrafo precedente, quando si richiede un'elevata precisione dei dati. Questo aspetto rappresenta uno dei suoi maggiori punti di forza, vista la capacità di ottenere misurazioni con la precisione del millesimo di millimetro.

Lo strumento di ultima generazione di casa ZEISS, è dotato di tecnologia di mass e grazie a un'interfaccia comune, consente di spostarsi facilmente tra le diverse tecnologie a sensori in pochi semplici passaggi. La tecnologia di mass permette di controllare con estrema precisione la macchina e scambiare, sullo stesso dispositivo di misura, numerosi sensori ZEISS e cioè sensori con RDS o un sistema a sonda fissa, sensori ottici o a contatto, passivi o attivi con la massima flessibilità. La CMM permette, inoltre, di ridurre i tempi di misurazione, mantenendo al contempo un'accurata affidabilità. Questa caratteristica viene garantita da funzioni quali il navigatore VAST di ZEISS o la performance VAST, in combinazione con le teste di misura VAST di ZEISS.

Lo strumento di misura è accoppiato con il software ZEISS CALYPSO che permette la massimizzazione delle prestazioni di misura. Grazie ad esso, infatti, è possibile gestire l'oggetto ricostruendo nel programma un suo disegno CAD mentre il sensore lo misura oppure è possibile effettuare il processo inverso, cioè importando il disegno CAD dall'esterno e mediante il software utilizzarlo per misurare il pezzo fisico. Le opportunità offerte dallo strumento, che lo contraddistinguono per efficienza ed efficacia, sono la capacità fornita dal programma di creare le strategie attraverso cui lo stesso andrà autonomamente ad effettuare tutte le misurazioni richieste dall'operatore e inoltre la possibilità di tarare lo strumento ogni volta che si inizia un'operazione di misura e memorizzare tale taratura per successive esecuzioni della stessa procedura in maniera automatica.

Nel caso in oggetto il tipo di sensore utilizzato per la misurazione è lo ZEISS VAST XT, a contatto (tastatore) attivo, realizzato in rubino sintetico (materiale ottimo per quanto riguarda la resistenza all'usura, fenomeno di notevole entità in questo tipo di sensori visto le dimensioni ridotte e il continuo contatto con gli oggetti soggetti alla misurazione). Esso nella linea di questa tipologia di sensori, svolge un ruolo importante in tutte le applicazioni metrologiche dove è richiesta la massima precisione. Oltre alla scansione attiva, questo sensore

consente anche la misurazione a punto singolo, consentendo l'uso flessibile di complesse configurazioni dello stilo e l'auto centraggio.

2.2) Sistema di Tomografia computerizzato (TC):

Questo strumento di misura viene impiegato sia quando è richiesto l'analisi della parte esterna del pezzo, ma soprattutto quando è necessario misurarlo internamente. Esso, infatti, consente di scansionare con elevata precisione pezzi in materiale plastico o in metallo leggero. La tecnologia utilizzata da questo strumento sfrutta i raggi X prodotti da un X-ray tube.

L'X-ray tube usando un alto voltaggio accelera gli elettroni prodotti dal catodo che andranno a interagire con l'anodo e produrranno i raggi X. Questi raggi includono Bremsstrahlung e la radiazione caratteristica, intendendo per Bremsstrahlung una radiazione elettromagnetica che viene prodotta da una particella carica (un elettrone, carica negativa) che viene deviata da un'altra particella carica (nucleo dell'anodo, carica positiva) perdendo energia cinetica. Più l'elettrone passa vicino al nucleo, più energia cinetica perde e quindi potrà o arrestarsi o deviare la sua traiettoria.

La radiazione caratteristica è provocata dalla conservazione dell'energia negli atomi dell'anodo, in cui gli elettroni persi per interazioni con quelli provenienti dal catodo, devono essere sostituiti da altri elettroni, sempre appartenenti a quell'atomo ma con maggiore energia. L'energia persa nel processo si trasforma in

raggio X che sono caratterizzati dall'energia di legame di quello specifico materiale.

Il X-ray tube funziona come un convertitore di energia, ricevendo energia elettrica e convertendola in due altre forme di energia (1% radiazione di raggi X e 99% di calore). In sostanza converte l'energia degli elettroni in fotoni.

Esso è costituito da due elementi principali:

- Filamento (catodo): emette elettroni tramite emissione termoionica;
- Target(anodo): gli elettroni colpiscono il focal spot per produrre raggi X.

Il catodo e l'anodo sono contenuti all'interno dell'envelope, che fornisce il vuoto. L'envelope è generalmente fatto di vetro, anche se ne esistono di ceramici e metallici.

L'energia usata per questo processo è fornita da un generatore (che deve anch'esso convertirla da AC in DC per assicurare un flusso unidirezionale costante di elettroni dal catodo all'anodo), connesso tramite un circuito elettrico all'X-ray tube.

I raggi X vengono impiegati, all'interno di una tecnica di imaging/scanning diagnostica, per realizzare una cross-selection di immagini ("slices") del pezzo da misurare. Queste cross-sections sono ricostruite da misure di coefficienti di attenuazione di beam di raggi X nell'intero volume scansionato.

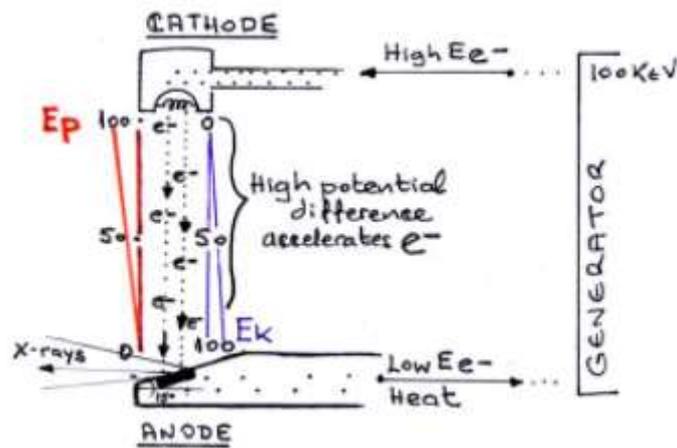


Figura 2.1-schema funzionamento del X-ray tube

La Tomografia computerizzata (TC) è basata sul principio fondamentale che la densità del tessuto attraversato dai raggi X può essere misurato dal calcolo del coefficiente di attenuazione. Questo principio permette di ricostruire la densità del corpo attraverso scansioni (2D-section) perpendicolari all'asse del sistema di acquisizione.

Un detector posizionato all'uscita del pezzo misura la quantità fotoni che passano, i valori di attenuazione del beam dei raggi X sono registrati e i dati ottenuti dal detector sono utilizzati per costruire una rappresentazione 3D dell'oggetto scansionato.

L'immagine della sezione dell'oggetto irradiato è ricostruita da un gran numero di misure del coefficiente di attenuazione, essa è un'immagine digitale e consiste di una matrice quadrata di elementi (pixels), ognuno dei quali rappresenta un voxel dell'oggetto.

Una misura fatta da un TC detector è proporzionale alla somma dei coefficienti di attenuazione.

CALCOLO SCANALATURA

3.1) Obiettivo della misurazione:

Come già anticipato nell'introduzione, lo scopo di questa misurazione effettuata sulla fessura di forma rettangolare del parallelepipedo stampato in materiale plastico, è quello di ottenere le coordinate di determinati punti appartenenti a tale fessura; il motivo per cui necessitiamo di ricorrere a uno strumento di così grande precisione - sensibile al millesimo di millimetro - scaturisce dal fatto che questo ottenimento di dati e la sua successiva elaborazione hanno l'obiettivo ultimo di convalidare il funzionamento di uno specifico software. Questo algoritmo è specializzato nel calcolo dello spessore di una qualsiasi fessura, come ad esempio quella delle crepe generate sulle pareti dopo una scossa sismica, e prescindere dalla sua complessità ed evoluzione. Il principio di funzionamento del programma si basa sull'individuazione della funzione che costituisce la curva di mezzeria della fessura, derivando tale funzione in determinati punti, appartenenti alla curva. Esso calcola la distanza perpendicolare alla curva in quel determinato punto, dando come risultato ultimo la misura dello spessore. La verifica del funzionamento dell'algoritmo, che ha una precisione del centesimo di millimetro, è stata effettuata utilizzando tre diversi strumenti con precisione sempre

maggiore (compreso quello di cui si parla in questo elaborato).

I primi due strumenti utilizzati per verificare il programma sono strumenti ottici, ovvero che sfruttano sorgenti luminose per compiere le misurazioni, e che hanno entrambi precisione pari al centesimo di millimetro.

Il primo strumento per effettuare le misurazioni utilizza un raggio luminoso telecentrico che colpendo l'oggetto, posto a una determinata distanza, restituisce alla fotocamera, posta all'uscita dell'oggetto, un'immagine della fessura che non è soggetta a distorsioni. La natura telecentrica del raggio luminoso permette di usarla direttamente per il calcolo dello spessore. Lo spessore risultante dalla misurazione sarà una media degli spessori calcolati a varie altezze lungo la fessura rettangolare.

Il secondo strumento utilizza un principio di funzionamento basato su un fascio laser orizzontale, il quale avendo il pezzo come interferenza, restituisce al visore ottico, posto all'uscita del pezzo, una funzione non lineare che permette di determinare lo spessore della fessura. Il meccanismo di acquisizione è costituito da un carrello mobile millimetrato su cui è posizionato lo strumento. Esso è comandato da un software, che una volta posizionato e puntato lo strumento, consente, grazie al suo movimento lungo il pezzo da misurare in

direzione tale da scandagliare tutta la fessura, di acquisire un numero elevato di misurazioni che nel nostro caso sono circa 400.

Le misurazioni determinate dallo strumento vengono visualizzate sotto forma di funzioni che, in un primo momento saranno costanti quando il laser colpisce la superficie superiore del pezzo, poi improvvisamente diventeranno decrescenti, non appena il laser entrerà nella scanalatura, per poi diventare crescenti quando il laser arriva alla fine della scanalatura, dopo un periodo in cui saranno di nuovo costanti, ed infine concludere e tornare costanti in quanto il laser colpisce la superficie superiore del pezzo.

La determinazione dello spessore della scanalatura passa per la derivata seconda della funzione sopra individuata, in maniera tale da identificare i punti di flesso, cioè i punti in cui cambia la concavità della funzione – rappresentati dai punti di inizio e fine della scanalatura – per poi effettuare quindi il gradiente della funzione ed ottenere un grafico piatto sullo zero, che rappresenta i punti in cui la funzione è costante. Pertanto, per la parte decrescente il gradiente andrà su valori negativi, mentre per la parte positiva andrà su valori positivi. Infine, calcolando la distanza tra queste due variazioni si ottiene il valore dello spessore della scanalatura.

3.2) Taratura e settaggio dello strumento:

Il processo di taratura e settaggio, in particolare per strumenti di così grande precisione, è fondamentale per evitare errori di misurazioni di notevole entità e per far in modo che lo strumento possa lavorare in maniera ottimale. Nel nostro specifico caso la taratura dello strumento consiste nella calibrazione del sistema di tastatori.

Lo strumento è costituito infatti da un'intera struttura, che si muove grazie a motori ad aria compressa con pressione di circa 5 bar, che sorregge la testa, ovvero l'elemento a cui è agganciato il sistema di tastatori. Il sistema di tastatori è l'elemento che praticamente andrà a effettuare la misura entrando in contatto con l'oggetto da misurare, questo lo rende la parte più delicata della macchina e quella che necessita di una calibrazione prima di affrontare una misurazione.

Il sistema di tastatori può essere di vario tipo, quello che andremo ad utilizzare noi è costituito da un singolo stelo verticale ed è agganciato in modo magnetico alla testa dello strumento, seguendo appositi riferimenti presenti su entrambi gli elementi.

La calibrazione avviene mediante il software che controlla lo strumento, nel quale è presente una finestra dedicata a questa operazione, che risulta obbligatoria quando si introduce un nuovo sistema di tastatori.

La prima operazione da effettuare quando si calibra un nuovo sistema è quella di individuare la sfera di calibrazione che poi si userà per la calibrazione vera e propria. La sfera è data in dotazione con lo strumento di misura e in questa operazione l'addetto alla misurazione la deve fissare in una posizione qualsiasi del piano di misura, successivamente deve agganciare alla testa il tastatore di riferimento. Questo specifico tastatore è anch'esso dato in dotazione e serve unicamente per permettere al software di individuare la sfera di calibrazione all'interno del sistema di riferimento dello strumento.

Il sistema di riferimento anzidetto è quello proprio del sistema che è posizionato in alto a sinistra, cioè per intenderci nella posizione in cui la macchina si colloca autonomamente appena all'avvio il software.

Quindi installati tutti gli elementi sullo strumento si può aprire la finestra del software a cui si faceva riferimento precedentemente, raggiungibile dal menu principale selezionando la funzione "Gestione sistema di riferimento". La finestra che si apre è costituita da due parti, una superiore composta da parametri da inserire manualmente in base a quale operazione di calibratura si sta eseguendo e un'altra parte posizionata subito sotto, costituita dai valori che si ottengono dopo la calibrazione.

I parametri che andremo a inserire nella parte superiore sono:

- Il sistema di tastatori che si sta utilizzando e cioè tastatore di riferimento, tastatore a stelo verticale ecc.;
- La sensibilità con cui deve avvenire il tocco tra il tastatore e la sfera di calibrazione che nel nostro caso si è optato per STANDARD;
- La posizione nello spazio della sfera di calibrazione, individuata mediante quattro configurazioni tra cui scegliere e a cui corrispondono due angoli che in automatico il sistema individuerà in funzione della configurazione scelta e in funzione di come la sfera è stata montata sul piano di misura;
- Il tipo di calibrazione: CALIBRAZIONE PASSIVA STILO oppure RICALIBRAZIONE GEOMETRICA, che si effettuano entrambi;

Una volta impostati questi parametri basterà premere il pulsante “Pos. Sfera di Calibratura” e portare manualmente il tastatore a contatto con la sommità della sfera, seguendo la direzione dello stelo, come indicato anche dal programma. Lo strumento, non appena riconosce la sfera, in automatico cercherà la sommità della sfera per quanto riguarda la “calibrazione passiva stilo”, mentre per la “ricalibrazione geometrica” lo strumento individuerà i 5 punti caratteristici della sfera uno per la sommità e gli altri quattro per determinare la circonferenza nella zona equatoriale.

Concluse queste operazioni nella parte inferiore della finestra il software genererà dei valori suddivisi in due

colonne. In quella di destra ci saranno i parametri riferiti al tastatore di riferimento, come le sue coordinate in funzione del suo sistema di riferimento che sono di poco interesse, mentre su quella di sinistra appaiono i parametri riferiti alla sfera di calibrazione, tra cui quello di maggior interesse è il parametro “s” che viene utilizzato per verificare la qualità della taratura effettuata. Tale valore deve aggirarsi tra 1-2 decimi di micron. Nella nostra misurazione si è determinato, nella prima calibrazione, un valore di $s=6$ decimi di micron, che, come detto, è un valore inaccettabile. Pertanto, è stata pulita la sfera di calibrazione e il tastatore ed è stata ripetuta l’operazione ottenendo un $s=1$ decimo di micron che è quello che ci si aspettava di ottenere. Nel caso in cui il valore restava alto il problema poteva essere determinato da un lieve svitamento del tastatore, dall’instabilità della sfera, dovuta a un fissaggio sbagliato, o addirittura qualcosa di maggiore gravità. Infine, si sostituisce il tastatore e installando quello con cui si andrà a misurare, si effettua l’operazione già vista. In questo caso però i valori della sfera di calibrazione sono confrontati con quelli ottenuti mediante il tastatore di riferimento in maniera tale da ottenere la calibrazione del nuovo sistema di tastatori.

3.3) Operazione di misura:

Effettuate le operazioni di taratura e calibrazione si può procedere con l'utilizzo dello strumento. Le sue applicazioni sono innumerevoli e l'approccio che si può utilizzare è di vario tipo, nel caso in esame si andranno a effettuare delle semplici acquisizioni.

L'acquisizione in questione fa riferimento a coordinate di specifici punti del nostro oggetto che poi andremo a lavorare in seguito per ottenere la grandezza che ci interessa.

Il tipo di lavoro in esame non prevede l'impostazione di strategie, che lo strumento dovrà eseguire quando lavorerà in autonomo, ma richiede comunque la necessità di individuare una zona sicura, all'interno della quale, lo strumento riconosce esserci il pezzo. Tale individuazione è indispensabile per evitare allo strumento in movimento di urtare, per errore, l'oggetto. La determinazione della zona sicura avviene mediante la movimentazione manuale, che avviene spostando il tastatore con il joystick e quando ci si trova nella zona di spazio desiderata, acquisisco quel punto, come estremo della zona sicura, premendo un pulsante sulla leva di movimentazione del joystick. Nel caso in esame per circoscrivere il nostro parallelepipedo sono stati acquisiti due punti, uno in basso a destra e uno in alto a sinistra, ovviamente in posizioni opposte al pezzo in maniera da poter creare una zona sicura che circonda il

pezzo. La zona sicura viene visualizzata sull'interfaccia del software nel riquadro principale, dove appaiono gli elementi che si stanno fisicamente misurando con il tastatore e dove eventualmente si potrebbe inserire il disegno del pezzo.

Individuata la zona sicura l'interfaccia del software permette di scegliere tra numerose funzioni per la misurazione di numerose caratteristiche di vari oggetti, dando la possibilità di risolvere una singola necessità in tanti modi diversi, alcuni basilari altri molto più complessi. Nella nostra misurazione abbiamo ragionato su quale possibilità scegliere tra le numerose opportunità ma alla fine, per la natura banale della misurazione da eseguire, si è optato per acquisire singolarmente le coordinate di ogni punto di interesse per poi lavorarle in un secondo momento.

All'interno del software c'è uno specifico comando che permette di acquisire le coordinate di un determinato punto dell'oggetto previa individuazione di un sistema di riferimento al quale le coordinate si appoggiano.

Il nostro sistema di riferimento non è stato scelto in modo casuale ma è stato individuato in maniera che coincidesse con i bordi del pezzo da misurare. Nello specifico è stato posizionato il pezzo in modo che le due facce in cui era presente la fessura si trovassero una rivolta in alto e la speculare rivolta in basso. Ovviamente cercando di metterlo il più dritto possibile, anche se con uno strumento così preciso sarà impossibile farlo. L'asse z del sistema di riferimento è stato fatto coincidere con

lo spessore della piastrina e gli altri due assi con i due spigoli corrispondenti alla faccia dove è presente la fessura. L'origine infine è stata messa sul vertice che apparteneva alla faccia rivolta verso l'alto.

Impostato il sistema di riferimento e scelti i punti da acquisire, che ovviamente sono punti che fanno parte della faccia rivolta verso l'alto e che appartengono ai due lati lunghi della fessura, sono stati acquisiti a coppie, in modo che un punto sia speculare all'altro rispetto alla mezzeria della fessura. Infine, sono stati acquisiti fisicamente i punti andando a toccare singolarmente con il tastatore che a questo punto non seguiva il software ma veniva guidato mediante il joystick.

Durante l'acquisizione i vari punti venivano visualizzati, nell'interfaccia del software, sulla schermata precedentemente descritta. Il software, alla fine dell'operazione, permetteva di scaricare un file con estensione pdf contenente il riepilogo dei punti acquisiti.

ZEISS CALYPSO

Part name: Piano di misura 1
 Drawing number:
 Order number:
 Variant:
 Company:
 Department:
 Typ CMM: CON_2017
 No. CMM: 225525
 Operator: Master
 Year:

Last measurements:
 Approval: Blocked
 Part Ident:
 Time/Date: 24/05/2024 10:05
 Run:
 No. measured values: 89
 No. values not: 12
 Measurement Duration: 00:32:01.0

Name	Measured value	Nominal value	+Tol	-Tol	Deviation
X Val. 1Punto1	29.2822	29.3000	0.1500	-0.1500	-0.0178
Y Val. 1Punto1	32.1868	32.2000	0.1500	-0.1500	-0.0132
Z Val. 2Punto1	-1.8008	-1.8000	0.0500	-0.0500	0.0194
Distancia Punto SpazioPunto1	-0.0302	0.0000	0.0500	-0.0500	-0.0302
X Val. 1Punto2	29.2848	29.3000	0.1500	-0.1500	-0.0152
Y Val. 1Punto2	27.3831	27.4000	0.1500	-0.1500	-0.0169
Z Val. 2Punto2	-1.8058	-1.8000	0.0500	-0.0500	0.0391
Distancia Punto SpazioPunto1	-0.0208	0.0000	0.0500	-0.0500	-0.0208
Distancia Punto SpazioPunto1	0.0301	0.0000	0.0500	-0.0500	0.0301
X Val. 1Punto3	32.8962	32.9000	0.1500	-0.1500	-0.0038
Y Val. 1Punto3	32.1868	32.2000	0.1500	-0.1500	-0.0132
Z Val. 2Punto3	-1.8201	-1.8000	0.0500	-0.0500	-0.0201
Distancia Punto SpazioPunto1	-0.0208	0.0000	0.0500	-0.0500	-0.0208
X Val. 1Punto4	32.8928	32.9000	0.1500	-0.1500	-0.0072
Y Val. 1Punto4	27.3767	27.4000	0.1500	-0.1500	-0.0233
Z Val. 2Punto4	-1.8142	-1.8000	0.0500	-0.0500	-0.0142
Distancia Punto SpazioPunto1	-0.0958	0.0000	0.0500	-0.0500	-0.0958
X Val. 1Punto5	37.3708	37.4000	0.1500	-0.1500	-0.0292
Y Val. 1Punto5	27.3878	27.4000	0.1500	-0.1500	-0.0122
Z Val. 2Punto5	-1.7807	-1.8000	0.0500	-0.0500	0.0493
Distancia Punto SpazioPunto1	0.0407	0.0000	0.0500	-0.0500	0.0407
X Val. 1Punto6	37.3878	37.4000	0.1500	-0.1500	-0.0122
Y Val. 1Punto6	32.1857	32.2000	0.1500	-0.1500	-0.0143
Z Val. 2Punto6	-1.7865	-1.8000	0.0500	-0.0500	0.0135

Figura3.1-prima pagina del report pdf dei punti acquisiti con la CMM



Figura3. Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato. 1-Screen della porzione dell'interfaccia di Calypso in cui appaiono i punti mentre li acquisiamo

3.4) Lavorazione post misurazione:

Queste lavorazioni, che intervengono sui dati ottenuti dalla misurazione, sono necessarie in quanto il nostro obiettivo è quello di trovare, con elevata precisione, il valore medio dello spessore della fessura presente sul nostro oggetto, così da convalidare il software creato per lo stesso scopo e non la posizione dei punti rispetto a un determinato sistema di riferimento.

Il motivo per cui non calcoliamo semplicemente la distanza delle coppie di punti trovati risiede nella diversità dei sistemi di riferimento che entrano in gioco durante la misurazione; infatti, sono presenti due sistemi di riferimento distinti. Il primo è quello proprio dello strumento in riferimento al quale la macchina si muove nello spazio, per fare un esempio quando muovo la macchina semplicemente in una direzione, ad esempio verso l'alto, senza spostarmi in altre direzioni la macchina segue il suo asse z e quindi tutti i punti che incontrerò differiranno solo per la coordinata z .

L'altro sistema di riferimento che entra in gioco è quello scelto da noi in riferimento al quale sono state prese le coordinate di tutti i punti acquisiti nella misurazione, questi due sistemi per quanto possiamo esser precisi nel posizionamento del pezzo sono sicuramente inclinati uno rispetto all'altro proprio a causa della grandissima sensibilità dello strumento e proprio per questa ragione se andassi semplicemente a calcolarmi la distanza tra i

punti non otterrei il valore desiderato ma la sua proiezione su un piano solidale al sistema di riferimento dello strumento. Questo avviene anche perché quando abbiamo acquisito le coordinate abbiamo lavorato sempre sulla stessa quota z e ci siamo mossi su quel piano sia longitudinalmente, per prendere punti su tutta la lunghezza del pezzo, sia trasversalmente, per prendere coppie di punti che fossero specchiate rispetto alla mezzeria della scanalatura.

L'operazione che andremo a fare ha lo scopo di riportare la distanza delle coppie di punti su un piano solidale con il sistema di riferimento scelto da noi e per farlo è necessario risolvere un semplice problema di trigonometria. Questo problema ha un doppio obiettivo, il primo è di correggere la distanza rispetto alla differenza presente sull'asse z (sistema di riferimento scelto da noi) e lo si fa risolvendo il triangolo rettangolo in cui l'ipotenusa è la distanza della coppia di punti e il cateto minore è la differenza delle loro coordinate z (sistema di riferimento scelto da noi). Ottenuti questi dati posso ricavarli l'angolo che noi chiameremo α attraverso il quale si può trovare l'altro cateto, il nostro obiettivo, usando la formula "cateto = ipotenusa \times $\cos(\alpha)$ ".

Il secondo è consequenziale al primo infatti la nuova distanza trovata ora deve essere corretta rispetto alla differenza presente sull'asse x (sistema di riferimento scelto da noi) e lo si fa seguendo lo stesso procedimento di prima solo che in questo caso l'ipotenusa è il valore

ottenuto dal primo passaggio e il cateto minore è la differenza tra le coordinate x delle coppie di punti, trovo l'angolo denominato come beta e poi con la formula vista prima trovo l'altro cateto che sarà la distanza che cercavo come obiettivo finale.

Questo procedimento viene ripetuto, mediante un foglio di calcolo Excel, per tutte le coppie di punti misurate e infine viene fatta la media tra i valori ottenuti da ogni coppia di punti, quello sarà il termine da comparare con il valore che trova il software.

PUNTI	X	Z	Y	DISTANZE	ALFA	DIST. CORRETTE (in z)	BETA	DIST. CORRETTE (in z e x)	MEDIA
1	29,2922	-1,8806	32,1999	4,806801	0,003058	4,806778281	0,000562	4,806777522	4,801714
2	29,2949	-1,8659	27,3931						
3	32,8992	-1,8301	32,1998	4,8211	0,003298	4,821073847	0,000166	4,821073781	
4	32,9	-1,8142	27,3787						
5	37,3708	-1,7507	27,3676	4,818101	0,003238	4,818075679	0,000623	4,818074745	
6	37,3678	-1,7663	32,1857						
7	40,8484	-1,7188	32,1757	4,824901	0,002819	4,824881765	0,000622	4,824880833	
8	40,8514	-1,7052	27,3508						
9	43,4402	-1,6816	32,1682	4,8171	0,003384	4,817072572	0,000249	4,817072422	
10	43,4414	-1,6653	27,3511						
11	47,6845	-1,6218	32,153	4,8033	0,003435	4,803272076	0,000416	4,80327166	
12	47,6865	-1,6053	27,3497						
14	55,1215	-1,5166	32,1344	4,788504	0,003675	4,788471933	0,001337	4,788467656	
15	55,1279	-1,499	27,3459						
16	60,3505	-1,4421	32,1259	4,7795	0,003473	4,779471224	0,000146	4,779471173	
17	60,3512	-1,4255	27,3464						
18	63,5188	-1,3961	32,1207	4,7784	0,003181	4,778376092	0,000335	4,778375824	
19	63,5204	-1,3809	27,3423						
20	66,6018	-1,352	32,1123	4,7797	0,003347	4,779673347	0,00023	4,77967322	
21	66,6029	-1,336	27,3326						

Figura3.3-Screen del foglio Excel su cui sono stati effettuati i calcoli descritti nel paragrafo al fine di ottenere il valore medio in alto a destra

CALCOLO PROVINO IN TITANIO

4.1) Obiettivo della misurazione:

Questo lavoro è di natura completamente diverso da quello discusso nei paragrafi precedenti perché, oltre ad appartenere a progetti completamente distinti l'uno dall'altro, per questa misurazione abbiamo come obiettivi l'acquisizione di parametri diversi.

Alla luce di quello detto sopra non cambierà solo lo strumento utilizzato per la misurazione, come già puntualizzato nei paragrafi precedenti, ma cambierà anche il lavoro da effettuare nel processo post misurazione, tutto questo perché con questa misurazione dovremmo ottenere diversi elaborati.

Il principale di questi elaborati consiste in un modello digitale tridimensionale da cui è possibile analizzare le caratteristiche principali del nostro oggetto, per esempio porosità, dimensioni e anche eventuali difetti dovuti alla tecnologia con cui è stato realizzato, successivamente è di interesse riuscire a ricavare dallo strumento le immagini delle diverse sezioni del pezzo (a diverse altezze) per poter analizzare le stesse caratteristiche viste prima ma questa volta della parte interna.

Queste lavorazioni hanno lo scopo di valutare la qualità e le caratteristiche di elementi complessi e realizzati tramite tecniche non convenzionali, solo con l'utilizzo

di strumenti di misura come il Tomografo è possibile effettuare determinate misurazioni con tale precisione. La tecnica di lavorazione con cui il nostro provino è stato realizzato è denominata additive manufacturing (stampa 3D), nello specifico per il nostro pezzo non è stata utilizzata una tecnica di sedimentazione di strati che è la più conosciuta quando si parla di stampa 3D ma una tecnica che impiega un laser per consolidare delle polveri, nel nostro caso di titanio, e ottenere l'oggetto finito.

4.2) Settaggio dello strumento e operazione di misura:

Questo procedimento per quando riguarda il Tomografo è incentrato più sul settaggio dei parametri con cui poi lui andrà a eseguire la misurazione ed essi sono dipendenti da diversi fattori. Il primo fattore che influenza i parametri che andremo a inserire è l'oggetto che dovrò andare a scansionare, questo riguarda la sua dimensione, la sua complessità ed il materiale di cui è costituito. Il secondo fattore è sicuramente lo scopo e la risoluzione con la quale vogliamo effettuare la scansione, questo perché non tutte le misurazioni richiedono lo stesso livello di risoluzioni e precisione, proprio sulla base di cosa voglio ottenere imposteremo dei parametri rispetto ad altri.

Nel nostro caso abbiamo un provino in titanio di dimensioni ridotte che riusciamo a posizionare vicino alla sorgente dei raggi x, questo perché più il pezzo è vicino più riesco ad ottenere un'immagine con risoluzione elevata in cui sono visibili particolari di dimensioni ridotte che altrimenti avrei perso. Questa maggiore risoluzione dipende da alcuni parametri che sono legati al valore che esprime la distanza tra il pezzo e l'X-ray tube, i parametri in questione sono il focal spot size e il conseguente voxel size che esprimono la risoluzione dell'immagine, infatti, più i loro valori sono piccoli più la risoluzione dell'immagine aumenterà e per

averli più piccoli possibile devo avere la distanza tra pezzo e X-ray tube più piccola possibile.

Il pezzo comunque non può essere posto troppo vicino alla sorgente in quanto, affinché la scansione sia completa, il pezzo deve essere interamente contenuto all'interno del fascio conico di raggi x. Questo determina un compromesso sulla posizione del pezzo all'interno dello strumento. Per quando riguarda il nostro provino le coordinate che abbiamo impostato sono pari a $X = 198\text{mm}$ e $Z = 66\text{mm}$ mentre Y è fisso e non è possibile variarlo.

Un'altra operazione che possiamo effettuare fisicamente all'interno dello strumento prima di passare a intervenire sul software, per inserire i parametri dovuti ai raggi x, è quella di inserire il filtro davanti alla sorgente. Si sono utilizzati dei filtri per evitare che il raggio troppo forte passi attraverso l'oggetto, in modo troppo aggressivo, non riuscendo a darci un'immagine con buon contrasto nelle quali non è possibile individuare le caratteristiche di interesse che invece stiamo cercando. La scelta del filtro dipende fortemente dal tipo di materiale di cui è costituito il nostro oggetto ma anche da quanto voglio che sia chiara l'immagine che alla fine lo strumento mi restituirà.

Nel nostro caso abbiamo il titanio e abbiamo deciso di utilizzare un filtro di rame dallo spessore di 1 mm, per analoghe misurazioni su componenti simili al nostro, ma costituiti da materiali plastici, si sono utilizzati filtri sempre fatti di rame ma con spessori maggiori per aumentare l'attenuazione dei raggi x.

Concluse le preparazioni all'interno della macchina si passa a impostare i settaggi sul software per poi far partire la scansione. L'interfaccia del software presenta una colonna sulla destra dove è possibile impostare i parametri di interesse per la misurazione mentre alla sinistra della colonna sopra citata c'è una schermata che durante la misurazione fungerà da schermo di controllo; infatti, sarà possibile vedere una ricostruzione del pezzo e anche le rotazioni che la macchina gli farà compiere durante il processo. Nella parte sottostante c'è invece un istogramma dal quale è possibile capire la qualità dell'immagine, più ha una forma schiacciata e spostata verso destra e più si sfrutta il dynamic range del detector. Cioè la sua sensibilità ai raggi x, in pratica come riesce convertire i raggi x in voltaggio ed è proprio per questo che più riuscirò ad avere un istogramma con le caratteristiche che ho descritto sopra più la qualità dell'immagine sarà elevata. L'istogramma varia al variare dei parametri che noi andiamo a inserire, i parametri in questione sono il voltaggio, la corrente, integration time e image averaging. Infatti, se a parità di voltaggio diminuisco la corrente il focal spot, di conseguenza, diminuisce e l'istogramma si sposterà verso sinistra andando a inficiare la qualità dell'immagine. Questo ci fa capire come in funzione dell'istogramma bisognerà trovare un bilanciamento tra i parametri sopra citati per aver la miglior configurazione possibile per il nostro istogramma.

I parametri che si provano sulla colonna di destra, come anticipato precedentemente, sono riferiti non solo ai

raggi x, ma ci sono parametri che individuano la risoluzione dell'immagine catturata dal detector e altri parametri che invece fanno riferimento all'acquisizione vera e propria.

I parametri scelti da noi sono:

- Voltaggio = 190 kV, questo parametro misura il voltaggio (o differenza di potenziale) applicato al X-ray tube per accelerare gli elettroni prodotti dal catodo e ovviamente più questo valore cresce più cresce l'accelerazione degli elettroni e la conseguente creazione di raggi x
- Corrente = 140 mA, questo parametro misura l'energia elettrica che viene prodotta dal catodo e quindi aumentando la corrente aumenteranno gli elettroni che possono essere accelerati dal X-ray tube per poi diventare raggi x
- Integration time = 3000 ms, questo parametro non si riferisce alla quantità raggi x ma al tempo di esposizione ai raggi; infatti, quando lo strumento fa la scansione il pezzo viene messo in rotazione, rispetto a un asse verticale perpendicolare al piattello piano che sostiene il pezzo, e con questo parametro si indica il tempo in cui il pezzo deve rimanere fermo in una determinata configurazione prima di ruotare di nuovo per poter passare alla configurazione successiva
- Gain = 4, è un parametro che misura il guadagno cioè più il valore sarà alto più l'immagine che ne risulterà sarà chiara, mettendo un valore troppo

grande si rischia di avere un'immagine piena di rumore. I valori ottimali sono 4 o 8.

- Image averaging = 3, questo parametro individua quante immagini devono essere utilizzate dal software affinché possa restituire l'immagine finale. Questo perché il prodotto finale restituito dallo strumento mediante il software è ottenuto da una media effettuata tra più scansioni e con questo parametro si può scegliere quanti elementi vogliamo che il software utilizzi per la media, ovviamente più il valore è grande più la risoluzione aumenta e con essa anche il tempo impiegato dallo strumento per effettuare la misurazione
- Binning = 1x1, questo parametro mi individua in che modo va effettuata l'aggregazione di pixel (due dimensioni) anche se per noi è più utile parlare di voxel (tre dimensioni); infatti, nel contesto dell'elaborazione delle immagini, il binning è la procedura di combinazione di un cluster di pixel in un singolo pixel. Questa aggregazione, sebbene associata a perdita di informazioni, riduce la quantità di dati da elaborare, facilitando l'analisi e soprattutto può anche ridurre l'impatto del rumore di lettura sull'immagine elaborata. Noi abbiamo scelto di non effettuare aggregazioni perché oltre avere un pezzo piccolo, e quindi dati limitati che non portavano problemi di elaborazione, per la misurazione che stiamo effettuando non abbiamo problemi di rumore o di errori da correggere (se avessimo scelto, ad esempio, un binning 2x2

avremmo avuto che un array di 4 pixel diventava un unico pixel più grande, riducendo quindi il numero di pixel e l'eventuale risoluzione)

- Focal spot size = 27 micron, con questo si esprime l'apertura del focal spot, cioè la sorgente dei raggi x, più il parametro è grande più si apre il focal spot e più cresce l'apertura del fascio conico di raggi x. Questo parametro non è settabile ma dipende dal valore della distanza del pezzo dal X-ray tube, una volta impostata il software mi darà automaticamente il valore di questo parametro. Il valore ottenuto è un indice della qualità dell'immagine, all'aumentare della distanza conseguentemente deve aumentare anche il focal spot size ed essendo il valore di riferimento per il voxel size aumenterà anche la dimensione minima percepita dal detector, in parole povere se ho una distanza che mi fa ottenere un focal spot size di 27 micron tutti i particolari più piccoli (porosità o difetti) non saranno visibili nell'immagine finale. L'obiettivo è quello di avere un valore più piccolo possibile, per poter vedere più particolari possibili ma come abbiamo già osservato sopra è necessario fare un compromesso affinché si possa ottenere la giusta risoluzione e il pezzo sia scansionabile nella sua interezza.
- Voxel size = 26.82 micron, questo parametro è il valore dello spigo di un cubetto che in due dimensioni è l'equivalente del pixel, in parole povere questo valore è il lato del pixel e quindi mi

permette di capire la risoluzione che avrà l'immagine catturata dal detector (più il valore è piccolo più avrò una risoluzione elevata). Questo parametro è ovviamente legato al Focal spot size, infatti, si sceglie sempre un valore il più possibile vicino al voxel size e soprattutto non è possibile scegliere un valore maggiore sarebbe fisicamente impossibile da realizzare per lo strumento

- Magnification = 7.26, è il parametro dell'ingrandimento che va a esprimere l'ingrandimento del pezzo misurato nell'immagine che io andrò a vedere. Questo parametro dipende dalla distanza tra il pezzo e il tubo di raggi x.

Impostati tutti questi parametri lo strumento in automatico ci darà il tempo necessario per effettuare la misurazione. E' evidente che con parametri di maggiore risoluzione e precisione della scansione, si avranno tempi di misurazione maggiori in quanto lo strumento ha necessità di maggior tempo per ogni configurazione o perché ha la necessità di aumentare il numero di immagini da utilizzare per fare la media.

Le operazioni di misura per questa macchina sono automatiche, infatti, appena impostati i parametri, precedentemente citati, basta avviare la scansione e la macchina procede in autonomia. L'unica operazione svolta dall'operatore è quella di preparazione del pezzo all'interno della macchina.

L'operazione di cui si parla è principalmente quella di realizzare uno stampo in polistirolo che possa sostenere

il pezzo per far in modo che il provino non sia a contatto con la piastra dello strumento, condizione quest'ultima che renderebbe impossibile la scansione della parte sottostante, perché appunto ci sarebbe la piastra ad oscurare la faccia sottostante. Questo supporto deve essere necessariamente di polistirolo perché il polistirolo è "invisibile" ai raggi x. Infatti, effettuando la scansione viene attraversato senza effetti di attenuazione da parte del materiale sui raggi x e quindi il detector non lo rivela rendendolo perfetto per lo scopo.

Inoltre, il supporto deve essere tale da non far muovere il pezzo durante la rotazione altrimenti questo creerebbe errori grossolani sulla misurazione finale e in casi estremi costringerebbe a rifare tutta la misurazione.

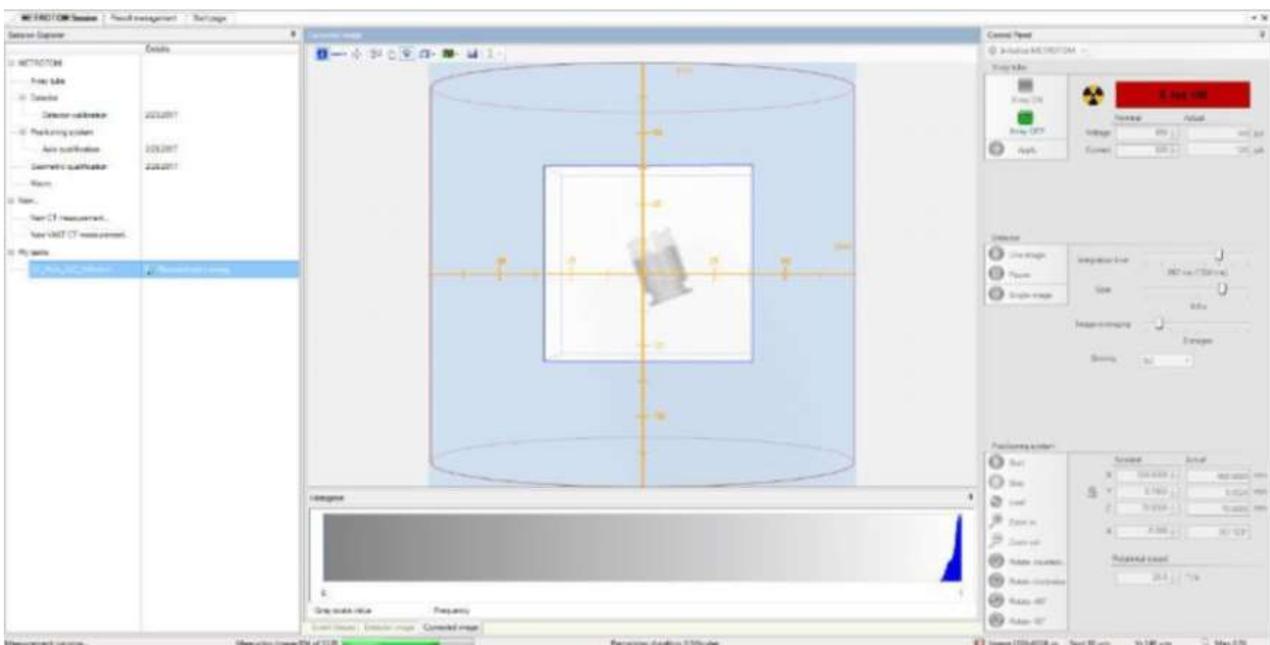


Figura 4.1-Interfaccia grafica del software che controlla il Tomografo con tutte le componenti descritte nel paragrafo più il menu generale presente sulla sinistra con cui è possibile passare da una parte all'altra del programma

4.3) Lavorazione post misurazione:

Quando si effettuano misurazioni utilizzando strumenti come il Tomografo risulta necessario un processo di elaborazioni delle informazioni estrapolate dello strumento, in quanto a differenza di quello che possiamo vedere sull'interfaccia grafica del software che controlla il Tomografo, si possono esportare solo alcuni tipi di file, tra cui però è possibile fare una distinzione:

1. File script, costituiti da numerose estensioni, contengono i parametri e le informazioni ottenuti dalla scansione, mediante questi file si possono ripercorrere tutte le fasi che il software ha dovuto compiere in ogni singolo passaggio necessario per arrivare al completamento della scansione;
2. File con estensione unit16 che sono i file contenenti le informazioni riferite all'immagine ottenuta dalla scansione mediante il detector e analizzata dal software

Quando si esportano i file dal Tomografo è necessario esportare l'intero pacchetto riferito a una singola scansione perché anche se non utilizzeremo ogni singolo file in modo diretto per l'elaborazione, gli altri sono necessari perché contengono informazioni fondamentali per l'analisi dei dati. Il file principale che sarà oggetto di elaborazione diretta è quello con estensione unit16 ed effettueremo questo processo utilizzando dei codici scritti su Matlab.

Matlab è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in linguaggio di programmazione C, che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks. Inoltre consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi.

Il nostro utilizzo di questo software ha lo scopo di implementare un codice che permette di analizzare il file ottenuto dal Tomografo con lo scopo di ottenere sia dati caratteristici del pezzo scansionato, sia altre tipologie di file che poi utilizzando altri software ci daranno il modello tridimensionale voluto.

Il codice in questione è costituito da numerose parti ognuna ha un ingresso con il conseguente elemento che deve essere inserito per poi dare all'uscita un prodotto diverso da quello che è entrato, concatenando queste parti e rendendo l'uscita di un blocco l'ingresso di quello successivo ottengo il codice finale.

Il codice utilizzato per l'analisi dell'immagine è l'insieme di parti di codice presi da altre stringhe utilizzate per lavori diversi dal nostro, che poi abbiamo modificato, adattato e implementato per il nostro lavoro ma i lavori in questione devono ancora essere pubblicati e proprio per questo motivo sono coperti da riservatezza per cui non è possibile scrivere il codice nella sua interezza in questo elaborato; inoltre, ai fini di questo elaborato sarebbe di scarso interesse copiare e incollare un stringa

di codice ma di più interesse è analizzare cosa va a fare il codice suddividendolo in blocchi consecutivi.

Algoritmo di elaborazione dell'immagine:

Importo dati dell'intero oggetto scansionato mediante i file con estensione `unit16` questi dati vengono automaticamente visualizzati come una matrice 3D grayscale. Non vengono importati tutti i dati in modo indiscriminato ma si fa una selezione utilizzando le coordinate del FOV, questo ha lo scopo di importare i dati che sono stati scansionati dal Tomografo

Successivamente si prende la matrice 3D si effettua una segmentazione utilizzando il global thresholding questo specifico procedimento all'interno dell'analisi delle immagini ha lo scopo di settare un parametro di soglia attraverso cui è possibile distinguere le diverse fasi contenute nell'immagine o nel nostro caso all'interno della matrice; infatti, tutti i valori più bassi della soglia appartengono a una fase (nel nostro caso allo spazio che circonda il pezzo e ai pori) a cui poi si attribuirà un determinato colore mentre tutti i valori più alti della soglia faranno parte di un'altra fase (sempre nel nostro caso si fa riferimento al pezzo vero e proprio). Così facendo si distinguono le fasi ed è possibile passare alla loro analisi

Separate le fasi è possibile calcolare il volume dell'oggetto (considerando solo la fase riferita al pezzo) che andremo a esprimere in μm^3 e posso anche calcolare le caratteristiche come la percentuale di porosità sul volume totale (ovviamente per distinguere i pori rispetto allo spazio che circonda il pezzo basta eliminare dalla matrice l'elemento che ha un'area di dimensione spropositata rispetto alle altre).
Scrivo tutti questi parametri in un report che poi andrò a salvare in estensione pdf e questo costituirà il primo prodotto dell'elaborazione dei dati effettuata mediante il codice

Oltre alla segmentazione una volta calcolato le quantità di interesse posso riprendere la matrice 3D e effettuare una scomposizione intera nelle singole slices (immagini delle sezioni a diverse altezze dell'oggetto) e effettuo il salvataggio di ogni singola slices, con l'estensione `unit16 tiff`, come immagini, questo mi permette anche di vedere come la porosità varia da slice a slice.
Queste immagini salvate sono un altro prodotto dell'elaborazione dei dati

L'ultimo prodotto che posso ottenere dall'analisi dei dati effettuata con il codice è la conversione con conseguente export della matrice 3D dalla sua estensione `unit16` a `vtk` che è di maggior interesse per noi.

Il file con estensione vtk esportato dal codice è di interesse per utilizzando un altro software, chiamato Paraview, da cui è possibile ottenere un modello tridimensionale del nostro provino.

Paraview è un'applicazione multiplatforma open source per la visualizzazione scientifica interattiva che può essere utilizzata per creare visualizzazioni e analisi di dati utilizzando tecniche qualitative e quantitative. L'esplorazione dei dati può essere eseguita in modo interattivo in 3D o in modo programmatico utilizzando le capacità di elaborazione batch di ParaView, ovviamente nel nostro caso avendo già programmato su Matlab utilizzeremo l'importazione in modo interattivo in 3D.

6,90474E+12
14314470,93
12109160,28
6836463,006
4170041,951
4069800,558
3728979,822
3608690,15
3588641,871
3328014,249
3247821,135
3107483,185
3047338,349
2927048,677

Figura4.2-Parte superiore della tabella dei volumi (μm^3) del provino 3D titanio, la prima riga costituisce il volume del materiale e le altre sono i volumi delle porosità

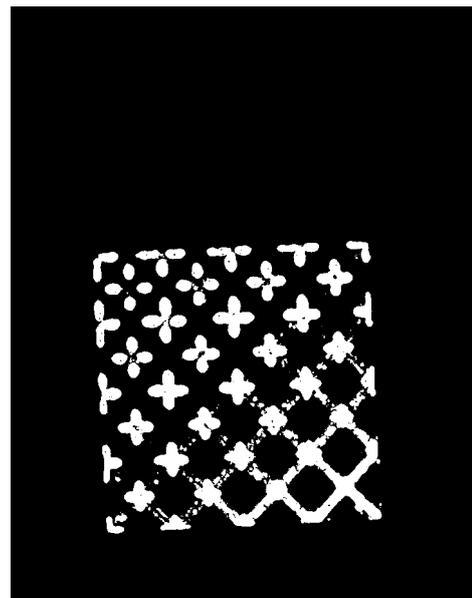


Figura4. Errore. Nel documento non esiste testo dello stile specificato. 3-Slice provino 3D titanio (300 of 1769)

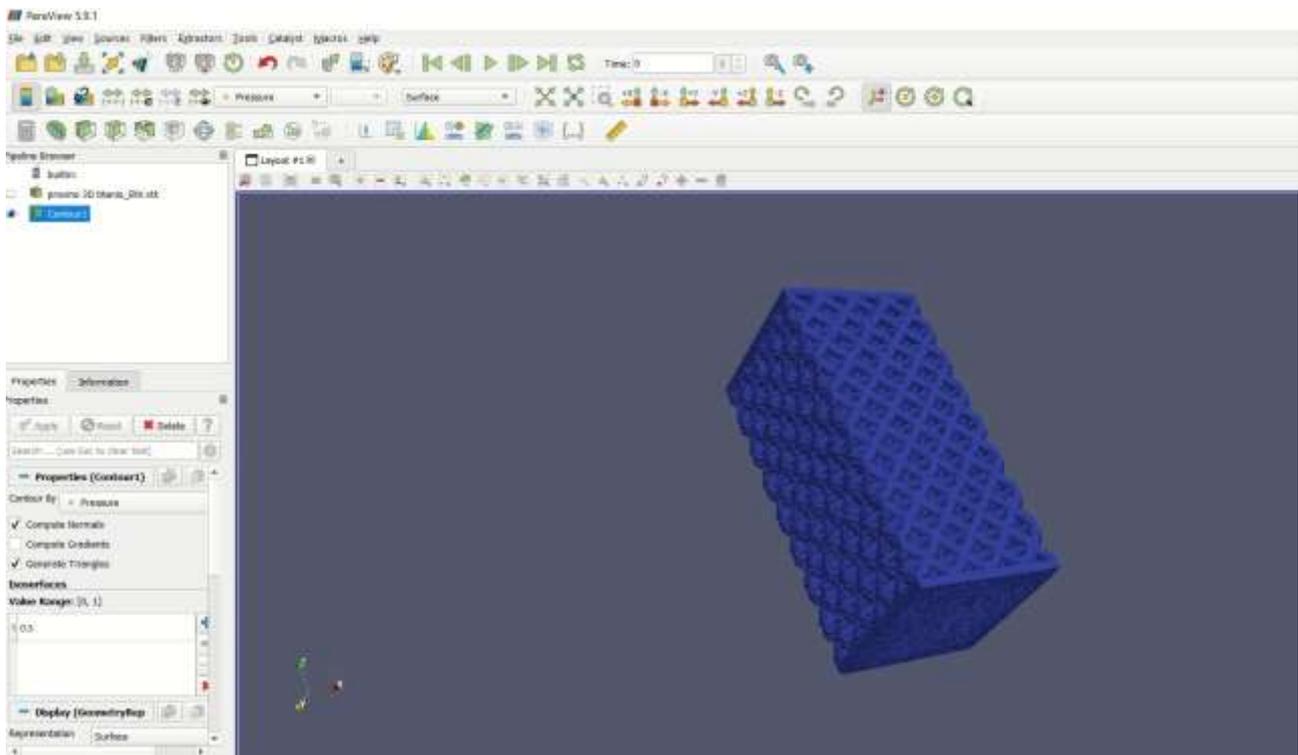


Figura.4-Interfaccia del software Paraview in cui è già stato inserito il file .vtk e in cui è stato ottenuto il modello tridimensionale del provino 3D titanio

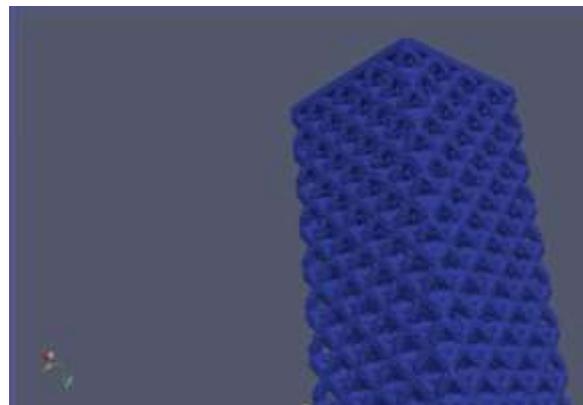
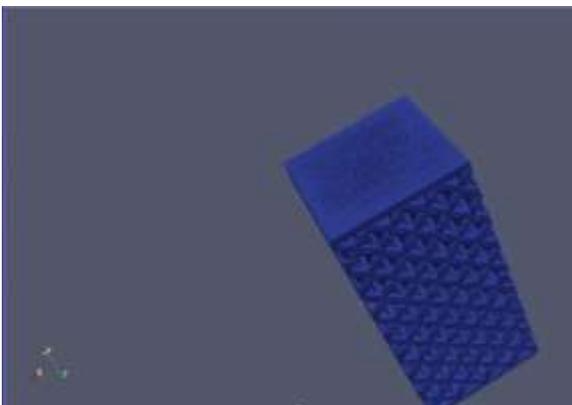
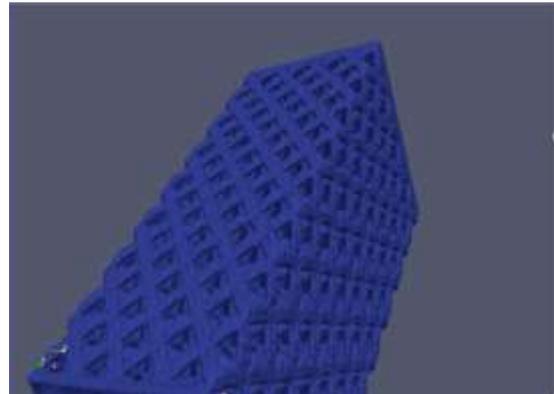
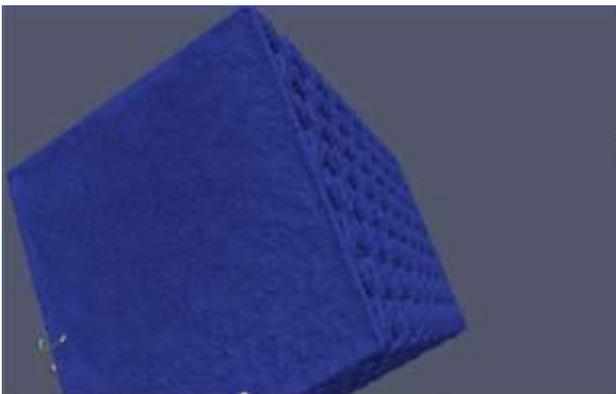


Figura.4.5-Altre visuali del provino 3D titanio ottenute ruotando il modello di Paraview

CONCLUSIONE

5.1) Conclusione:

Infine, si vuole concludere questo elaborato facendo un resoconto sui dati ottenuti da entrambe le misurazioni e sugli eventuali sviluppi futuri che possono seguire il lavoro già fatto.

- I. MISURAZIONE EFFETTUATA CON LA CMM= per quanto riguarda questo lavoro si è arrivato ad ottenere un valore dello spessore medio della scanalatura che potrà poi in seguito essere confrontato con il valore ottenuto dal software per verificare l'effettivo funzionamento del programma; infatti, questa lavorazione è arrivata al termine anche se il range di applicazione, per quanto riguarda lo strumento di misura, è vastissimo soprattutto se si pensa che ci sono numerosi sistemi di tastatori che casa madre Zeiss permette di acquistare separatamente e che qualora servissero, aumenterebbero le opportunità di impiego della CMM.

- II. MISURAZIONE EFFETTUATA CON IL TOMOGRAFO= per quanto riguarda invece questo lavoro si è giunti a ottenere i valori desiderati riferiti al nostro provino e si sono inseriti tutti all'interno

di un report pdf, con questi valori si potrà effettuare un controllo sulla qualità del pezzo stesso e valutare se la tecnologia utilizzata per la sua produzione è idonea. Inoltre, abbiamo ottenuto sia un numero considerevole (1769) di immagini diverse riferite a sezioni differenti del provino con le quali è possibile fare un confronto per vedere come determinati parametri variano da sezione a sezione, sia un modello 3D con il quale è possibile visualizzare in modo digitale il provino nella sua interezza e valutarne le caratteristiche (geometriche, struttura interna ecc.). Questo lavoro può essere portato avanti unendo il modello tridimensionale con le singole slices per creare un modello che mi permetta interattivamente di comporre il provino sovrapponendo le varie slices utilizzando ad esempio un cursore, muovendo avanti e dietro il cursore sarebbe possibile sovrapporre o scomporre il provino sommando o sottraendo le singole slice. L'implementazione di cui ho parlato avrebbe più che altro una valenza illustrativa.

Un altro lavoro che può essere effettuato conseguentemente a quello descritto nell'elaborato è quello di scansionare, usando lo stesso criterio, lo stesso provino ma questa volta sollecitato con un carico così da confrontare i risultati per poter valutare la deformazione del provino, per quanto riguarda la struttura interna, e conseguentemente valutare gli sforzi ai quali quale sarebbe sottoposto.

BIBLIOGRAFIA

6.1) Bibliografia e Sitografia:

- Zeiss, “Metrotom 1500 opening instructions”
- zeiss.it, per quanto riguarda i due strumenti di misura Zeiss

RINGRAZIAMENTI

7.1) Ringraziamenti:

Infine, volevo concludere l'elaborato con i ringraziamenti. Questa parte della tesi è stato oggetto di vari discorsi, con i miei amici, in cui sostenevo che ci sarebbe stato da ringraziare solo me per la mia laurea e scherzando sul fatto di essere l'unico vero artefice di tutto.

Non che questa cosa non sia in parte vera, però non sarei corretto se non dicessi che il merito è da riconoscere anche alle persone che sono al mio fianco e che mi hanno accompagnato, sostenendomi, per tutto questo tempo.

In primis la mia famiglia, pilastro fondamentale della mia vita, senza di loro a motivarmi dopo ogni traguardo e sorreggermi dopo ogni passo falso non sarei riuscito ad arrivare fino alla "fine". Loro sono parte fondamentale di quello che sono e di quello che potrò diventare in futuro. In secondo luogo, tutti i miei amici, da quei malati degli 'Ingegneri Marche' con cui ho effettivamente condiviso tutto il percorso di studi e che si sono rilevati più di semplici compagni di corso, al mio gruppo 'Gli Zi' la mia seconda famiglia con cui ho condiviso tutto e spero di continuare a farlo anche in futuro. Senza dimenticare gli amici di sempre come Luca, Iacopo, Alessandro e Maria Rita che, ognuno a suo modo, hanno avuto un ruolo

decisivo non solo nel mio percorso di studi ma soprattutto nella mia vita, festeggiando con me i miei traguardi e standomi vicini nei momenti difficili che purtroppo tutti dobbiamo affrontare.

Per ultimo vorrei ringraziare una persona che purtroppo non ha potuto assistere a questa festa ma che sicuramente sarebbe stata una delle persone più orgogliose e felici di esserci, mio nonno Guido. Infatti, prima di andarsene l'università era uno dei principali discorsi che facevamo, non perdeva occasione per ricordarmi quanto fossi meritevole e mi spronava sempre a fare meglio anche quando io in prima persona ci credevo poco. È proprio per tutto questo che voglio dedicare la mia laurea a lui.

