



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in
INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di Laurea

***Analisi sperimentale e numerica per la caratterizzazione
meccanica di una tela composita per centratori acustici***

***Experimental and numerical analysis for the mechanical
characterization of a composite cloth for acoustic spider***

Relatore:
Prof. Sasso Marco

Candidato:
Calcinaro Giacomo

Correlatore:
Prof. Chiappini Gianluca

Anno Accademico 2020-2021

| | |
|---|----|
| Introduzione..... | 1 |
| 1. Il materiale | 3 |
| 1.1. Centratore acustico..... | 3 |
| 1.2. Tipologia di centratori..... | 6 |
| 1.3. Comportamento Meccanico | 8 |
| 2. Caratterizzazione dei materiali | 11 |
| 2.1. Introduzione alla prova di trazione..... | 11 |
| 2.2. Funzionamento DIC..... | 12 |
| 2.3. I provini | 15 |
| 2.4. Set up per la misurazione | 18 |
| 2.5. Calibrazione | 22 |
| 2.6. Misurazione | 24 |
| 3. Elaborazione delle immagini tramite MatchID: | 28 |
| 3.1. Preparazione e area di interesse | 28 |
| 3.2. Subset e step size..... | 29 |
| 4. Estrazione dati elaborazione | 35 |
| 4.1. Estrazione risultati di MatchID..... | 35 |
| 4.2. Script "Export_data" | 37 |
| 4.3. Script Curva | 39 |
| 4.4. Normativa ASTM D-3518 | 42 |
| 5. Acquisizioni della geometria reale..... | 45 |
| 5.1. Ricerca della geometria reale | 45 |
| 5.2. Acquisizione con Scanner Ottico | 47 |
| 5.3. Elaborazione nuvola di punti | 50 |
| 6. Confronto geometria CAD e superficie acquisita | 53 |

| | |
|---|----|
| 6.1. Quotatura dei centratori reali..... | 53 |
| 6.2. Confronto misurazioni centratore CAD, centratore A e centratore B..... | 55 |
| 7. Analisi agli elementi finiti tramite ABAQUS | 60 |
| 7.1. Panoramica software | 60 |
| 7.2. Impostazione modello | 61 |
| 7.3. Analisi e risultati dei modelli..... | 65 |
| 8. Confronto tra modello CAD, centratori A e B | 71 |
| 9. Conclusioni..... | 76 |
| Indice delle figure..... | 78 |
| Indice delle tabelle | 82 |
| Bibliografia e sitografia | 83 |

Introduzione

In questa tesi magistrale di Ingegneria Meccanica, si andrà ad effettuare la caratterizzazione meccanica di una tela composita per centratori acustici, tramite prove meccaniche, al fine di poter ottenere parametri ingegneristici da inserire all'interno di un modello ad elementi finiti, che sarà predittivo del comportamento dell'oggetto in esame.

Nei seguenti capitoli verrà introdotto in primis l'oggetto di studio "centratore" e i vari materiali che verranno studiati. Questo servirà a dare una panoramica su alcune assunzioni che verranno fatte più avanti e spiegherà il motivo di alcune soluzioni adottate nel modello FEM.

Definito l'oggetto di studio si passerà a descrivere il test che verrà utilizzato per la caratterizzazione, ovvero la prova di trazione. Tale prova deformerà dei provini andando a registrare i parametri ingegneristici di interesse. In questo frangente si andrà ad utilizzare, per la misurazione delle deformazioni, la tecnica ottica DIC (digital image correlation). Questa tecnologia consente di effettuare misurazioni a tutto campo, in modo non invasivo, tramite l'acquisizione di immagini sequenziali durante tutta la prova. Queste verranno riprese tramite l'utilizzo, nel nostro caso, di due telecamere ad alta risoluzione di tipo stereoscopico, così da misurare spostamenti dentro e fuori dal piano del provino.

A sostegno di tutta la fase di misurazione tramite DIC, verranno utilizzati programmi come "MatchID Calibration" e "MatchID Stereo", per effettuare la calibrazione del set-up e per la correlazione delle immagini; per la rielaborazione dei risultati si farà ricorso ad alcuni script Matlab che ci consentiranno di ricavare i parametri ingegneristici e le curve caratteristiche dei materiali.

Effettuata la caratterizzazione dei materiali si potrà passare a generare il modello FEM predittivo sul software ABAQUS, ma questo necessiterà di una geometria sul quale applicare i risultati precedenti. In prima approssimazione, si è ritenuto di poter generare un modello 3D del centratore andando a ridisegnare, tramite disegni meccanici quotati, il file .stp (file 3D necessario per simulare la geometria). I risultati saranno discussi nei

capitoli successivi e si vedrà come questi, non rispecchino il comportamento reale del materiale, che si presume essere asimmetrico dai dati riscontrati in letteratura.

Si è cercato quindi di andare ad indagare possibili motivazioni per giustificare la mancata asimmetria del materiale, partendo in primis dalla geometria alla base del modello FEM. Utilizzando lo Scanner ottico, in dotazione all'Università Politecnica delle Marche, è stata ricavata la nuvola di punti caratteristica di ogni centratore. Si è pensato infatti che, il comportamento asimmetrico dei materiali, potesse essere generato da una geometria dei centrotori, in qualche modo, differente rispetto a quella ideale rappresentata con il modello CAD. Il processo di termoformatura del materiale, di fatti, genera delle differenze rispetto alla geometria ideale; per questo verrà inserita una sezione apposita dove verranno analizzate le differenze tra la geometria CAD e la geometria acquisita tramite la scansione ottica, per dare fondamento a questa asserzione.

L'elaborazione della nuvola di punti porterà quindi ad ottenere la superficie effettiva di ogni centratore. Queste verranno utilizzate alla base dei modelli FEM su ABAQUS e, tramite i parametri ingegneristici ricavati dalla caratterizzazione, si andranno a ricavare delle curve predittive dell'elasticità dei centrotori.

1. Il materiale

1.1. Centratore acustico

Il centratore acustico è un componente presente all'interno degli altoparlanti magnetodinamici. Lo scopo di questo elemento è quello di collaborare con la sospensione della membrana, per mantenere la bobina mobile perfettamente centrata sul traferro. Così facendo si limitano le interferenze meccaniche che porterebbero al danneggiamento della bobina mobile, a causa dello sfregamento sul polo centrale. In figura viene riportata una sezione riepilogativa schematizzata della struttura interna di un altoparlante, insieme ad una versione preliminare di altoparlante dove vengono effettivamente montati i centratore in esame. [Figura 1.1]

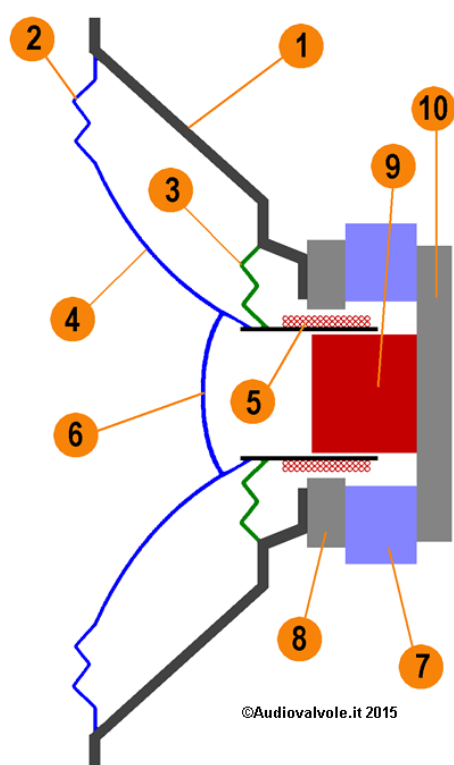


Figura 1.1: A sinistra sezione schematica di un altoparlante, a destra altoparlante parzialmente assemblato con centratore in vista

Nell'immagine vengono indicati i principali componenti e al fine di darne una panoramica sulla funzione base ne viene fatta una breve descrizione:

1. Cestello: struttura portante di tutto l'altoparlante
2. Sospensione della membrana: la sua funzione è quella di ancorare la membrana al cestello permettendone il movimento e mantenendola perfettamente centrata.
3. Centratore: lavora in sinergia con la sospensione per il posizionamento della bobina
4. Membrana: funge da diaframma per la compressione dell'aria emettendo onde sonore
5. Bobina mobile: montata sul centratore quando eccitata consente la movimentazione interagendo col campo fisso generato dal magnete
6. Parapolvere
7. Magnete
8. Piastra polare: indirizza insieme al 9 il campo del magnete
9. Polo centrale
10. Piastra esterna: chiude il circuito magnetico

L'altoparlante è quindi un sistema in grado di generare onde sonore, andando a comprimere o rarefare l'aria tramite una membrana. Quest'ultima è fissata all'esterno sul cestello fisso tramite la sospensione (2), mentre il centro è incollato all'equipaggio mobile, in grado di produrne lo spostamento. La movimentazione dell'intero gruppo avviene per l'interazione di campi magnetici, uno fisso generato dal magnete (7), uno variabile generato dagli avvolgimenti della bobina in base al verso e all'intensità della corrente che li attraversa.

Lo scopo del centratore è quindi quello di garantire la precisione del movimento della bobina [Figura 1.2], all'atto pratico questo si traduce nella precisione del suono.

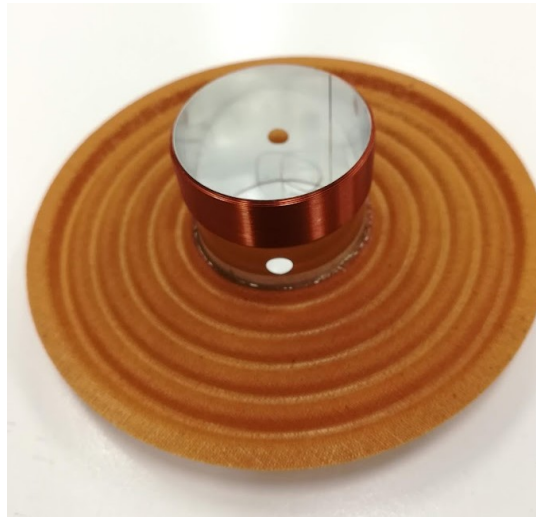


Figura 1.2:Centratore per altoparlanti con bobina incollata

La corretta realizzazione del centratore e della sospensione è quindi di fondamentale importanza per la qualità del suono emesso, ma per loro natura, i due elementi citati, non sono assolutamente esenti da errori di lavorazione. Ciò comporta, soprattutto negli altoparlanti più economici, la necessità di sopperire a tale defezione, ricorrendo ad espedienti quali: l'aumento del traferro e l'inserimento di magneti sovradimensionati. Ciò comporta l'aumento generale delle dimensioni del prodotto, con ingombri e costi maggiori.

Questo non è l'unico motivo per il quale il centratore acustico richiede un'attenta progettazione; questo elemento di fatto concorre, insieme alla membrana e altri fattori, a generare non linearità nella movimentazione dell'equipaggio mobile, generando distorsione nella riproduzione del suono. Garantire un'escursione lineare della bobina, che abbiamo visto essere l'elemento di movimentazione della membrana, consente all'altoparlante di avere uno spostamento lineare.

Poter prevedere il contributo di non linearità introdotto dal centratore e dalla sospensione, consente quindi di valutare la massima escursione attribuibile alla bobina, il dimensionamento del traferro e quindi migliorare il rendimento di tutto il sistema.

È chiara, dunque, l'importanza di poter definire il comportamento elastico del centratore. Il parametro che tiene conto della risposta alle deformazioni è il CMS

(cedevolezza delle sospensioni [mm/N]) o il suo inverso KMS (rigidezza della sospensione [N/mm]). Poter ricavare tali andamenti non risulta affatto scontato, in quanto la misurazione della rigidezza del centratore, in fase di utilizzo, comporta l'analisi di distorsioni non lineari, con l'utilizzo di apparecchiature avanzate e costose.

Questo sarà l'oggetto della nostra ricerca, andare a definire il comportamento asimmetrico dei centratori tramite la loro rigidezza.

1.2. Tipologia di centratori

Il centratore è quindi un oggetto assialsimmetrico con sviluppo prettamente circolare. È caratterizzato dalla presenza di creste e avvallamenti che fungono da elemento elastico, smorzante per riportare in condizione di riposo l'equipaggio mobile.

I centratori, oggetto di questo studio, sono stati tutti realizzati tramite stampaggio. Il processo prevede, a grandi linee, di partire da una tela del materiale scelto, già precedentemente impregnata con materiale resinoso (resina epossidica nel nostro caso), in seguito si pone la tela all'interno di uno stampo e viene ricoperta con un diaframma flessibile, per isolarla, al fine di generare una variazione di pressione. La forza applicata per modellare la tela sullo stampo viene data: o tramite un'apposita pompa da vuoto, che rimuovendo l'aria dal sacco genererà la forza necessaria allo stampaggio (Vacuum-Bag forming), oppure mettendo l'intero assieme, comprensivo di stampo, laminato e sacco da vuoto, all'interno di un'autoclave, nella quale viene insufflata aria calda. [Figura 1.3]

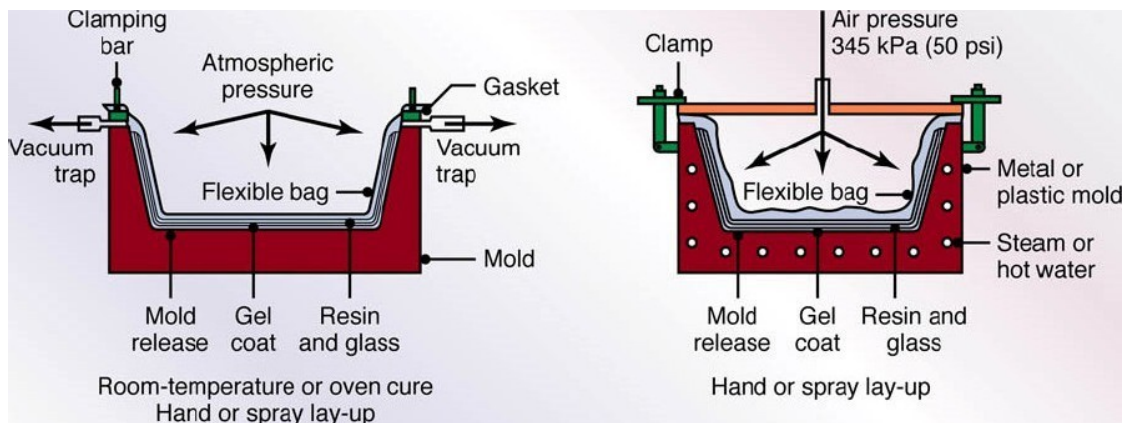


Figura 1.3: Schema dei due processi di termoformatura, a sinistra il Vacuum Bag forming, a destra Pressure-Bag forming

Questa tecnica consente di ottenere materiali estremamente compatti, con un'elevata percentuale di fibre, una bassa percentuale di difetti, e caratterizzati da una buona flessibilità e complessità geometrica.

I centratori che verranno analizzati in questo studio sono quattro, ognuno è caratterizzato da un differente materiale, ma dalla stessa geometria di stampaggio a meno dello spessore, questo viene di fatti a modificarsi al variare della tela utilizzata per la realizzazione.

Le differenze tra i vari materiali sono decisamente evidenti, in quanto, l'ispessimento del materiale, l'allargamento della trama generano variazioni cromatiche, ma soprattutto differenze tattili del materiale.

Nel corso di tutto l'elaborato faremo riferimento a questi quattro centratori chiamandoli "centratore A", "centratore B", "centratore C", "centratore D". [Figura 1.4]

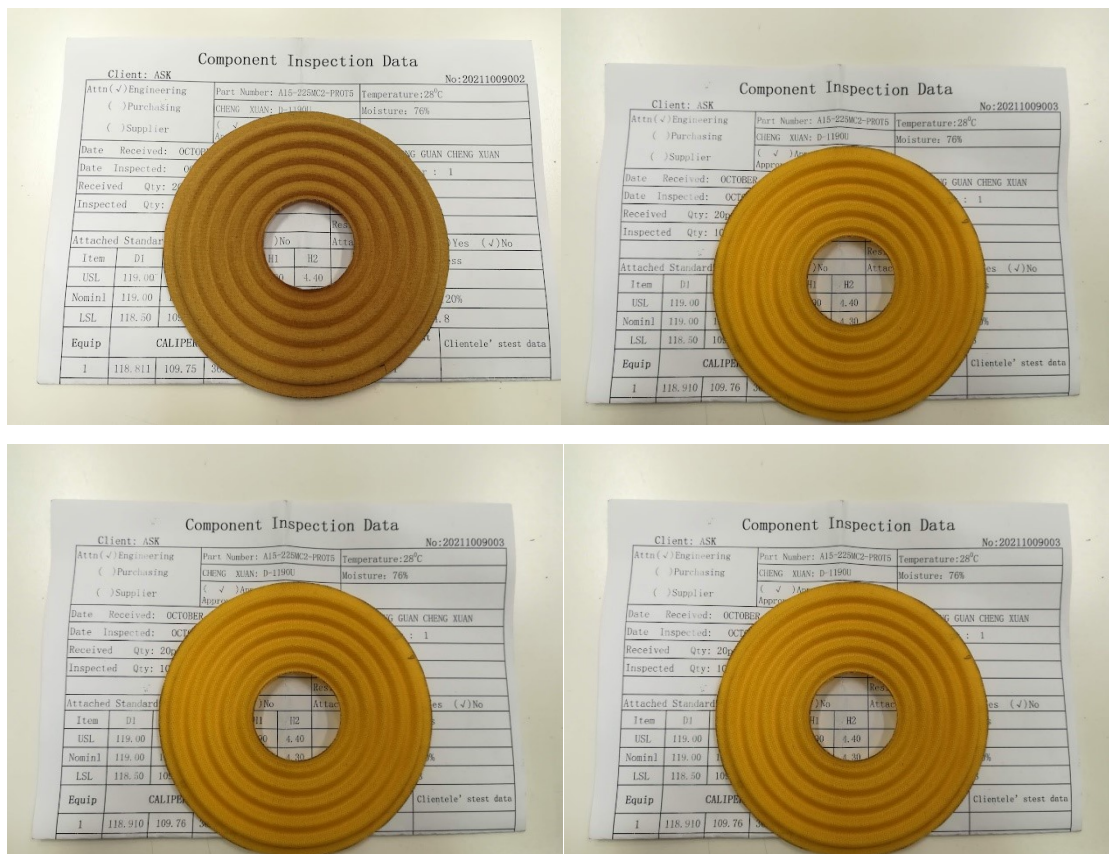


Figura 1.4: Le quattro tipologie di centratori A, B, C, D (partendo in alto a sinistra)

Ad ogni centratore corrisponde un diverso materiale, con diverso spessore, ma è importante ricordare che la geometria che li accomuna è la stessa. Questo è stato alla

base della scelta di generare, in prima approssimazione, un prototipo 3D a partire dai disegni geometrici. Non trovando riscontro del comportamento reale nel modello realizzato, si è quindi passati alla generazione di un modello 3D, a partire dalle scansioni effettuate con lo scanner ottico, una per ogni centratore, così da minimizzare il più possibile errori dovuti a differenze geometriche.

1.3. Comportamento Meccanico

Dovendo andare a generare un'analisi FEM dei centratori, ci si è posti subito il dubbio di come valutare una materiale che presentasse una matrice composita polimerica. Nel dettaglio in foto [Figura 1.5] si cerca di fare apprezzare la grandezza della maglia per evidenziare la complessità geometrica e quindi la non banalità nello scegliere la modellazione da adoperare.



Figura 1.5: Dettaglio della trama di un centratore

Grazie a ricerche in letteratura e prendendo spunto da guide di vari programmi per il calcolo agli elementi finiti, si è visto come modellare questo comportamento.

Essendo questo materiale una lamina di materiale composito, con spessori compresi tra i 0,1mm e 5mm, si è optato per assumerlo come macroscopicamente omogeneo, ma con un comportamento meccanico anisotropo, in particolare ortotropo.

Si definisce un materiale anisotropo, quando, le sue caratteristiche meccaniche, variano continuamente con la direzione considerata, ma se il materiale ammette tre piani di simmetria, tra loro mutuamente ortogonali, questo viene definito ortogonalmente anisotropo, ovvero ortotropo.

Consideriamo una lamina bidimensionale, applichiamo ora a quest'ultima un carico, se la direzione di carico coincide con una direzione principale allora, ad uno sforzo normale semplice, corrisponde uno stato di deformazione uniforme senza scorrimenti. Al contrario se la direzione del carico fosse deviata rispetto alla direzione principale, questo produrrebbe anche scorrimenti nel piano. [Figura 1.6]

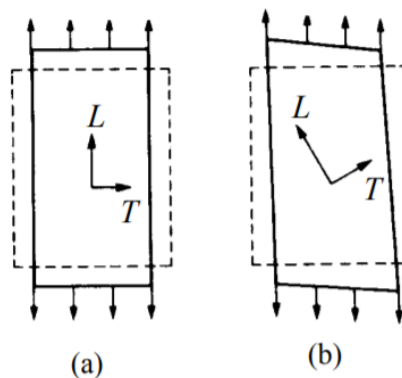


Figura 1.6: Deformazione di lamina ortotropa con carico secondo una direzione principale (a) e deviato (b)

Utilizzando ora i richiami di scienze delle costruzioni, si farà un breve riepilogo di quali parametri dovranno essere ricercati durante i test di caratterizzazione del materiale.

Partendo dallo stato di tensione di un punto, descritto dalle 9 componenti σ_{ij} ($i,j=1,2,3$) e dallo stato piano di deformazione descritto dalle altre 9 ϵ_{ij} ($i,j=1,2,3$), inserendo la legge di Hooke generalizzata per correlare le varie incognite, si arriva alla definizione di un legame costitutivo con 81 elementi da definire. Questo sarebbe il problema posto per un materiale completamente anisotropo.

Si vanno ora ad elencare in ordine logico, tutte le semplificazioni che vengono fatte all'interno del problema elastico, al fine di ricondurci ai quattro parametri di interesse che descrivano interamente il problema:

- 1) I tensori σ_{ij} e ϵ_{ij} sono simmetrici, 6 componenti sono linearmente dipendenti
- 2) Si dimostra che il tensore $[E]$ è simmetrico, bastano gli elementi della diagonale più quelli fuori sopra (o sotto)
- 3) Se il materiale è ortotropo le leggi costitutive coinvolgono solo 9 costanti elastiche
- 4) Tenendo conto dell'isotropia trasversale e in presenza di uno stato piano di tensione si arriva a 4 costanti elastiche indipendenti.

Le quattro costanti elastiche che consentono quindi di descrivere interamente il materiale ortotropo, con isotropia trasversale, sono: E_1 , E_2 , G_{12} , ν , rispettivamente i due moduli di Young nelle due direzioni principali, il modulo di resistenza a taglio e il coefficiente di Poisson.

Tramite la prova di trazione questi saranno i valori da ricercare e saranno gli stessi parametri che consentiranno di simulare il materiale all'interno del modello FEM.

2. Caratterizzazione dei materiali

2.1. Introduzione alla prova di trazione

Nel seguente capitolo si andranno ad illustrare i passaggi inerenti alla prova di trazione monoassiale, necessaria per la caratterizzazione del materiale, in quanto consente di ricavare misurazioni riguardo la rigidità, il coefficiente di Poisson e il modulo di taglio. Questi sono i parametri di studio che andranno ricercati tramite queste prove, col fine di poter conoscere tutti i valori necessari a descrivere il materiale analizzato e, considerando il comportamento del materiale come ortotropo, andare a realizzare un modello FEM attendibile.

Dalle tele 150x150 di materiale a nostra disposizione, sono stati ricavati dei provini rettangolari 34x150mm. Per ogni materiale sono stati realizzati n°2 provini con fibre rivolte ortogonalmente rispetto alla prova di trazione, e n°2 provini con fibre inclinate a 45°. Tramite l'analisi dei provini a 0° si andranno a valutare il modulo di Young (E) del materiale ed il coefficiente di Poisson (ν), tramite lo studio dei provini a 45° si ricaverà il modulo di taglio G (ipotizzando il materiale come ortotropo si considerano uguali i valori di G12, G13, G23).

La prova di trazione prevede di deformare, tramite allungamento assiale prodotto dalla traslazione della traversa mobile, il provino fino a rottura. I provini vengono quindi inseriti negli afferraggi e tramite il controllo di posizione della traversa mobile, si inizia a trazione il materiale. La traversa si trova quindi ad alzarsi a bassa velocità, così da non apprezzare eventuali comportamenti dinamici, e poter valutare la prova come quasi statica.

Durante questo test vengono rilevate le forze applicate sul provino, tramite celle di carico, e lo spostamento della traversa. Con questi dati il software della macchina ci consente già di avere una curva σ - ϵ e vari parametri come E e ν , ma questi vengono calcolati a partire dalle deformazioni della traversa mobile e non garantiscono una precisione sufficiente per la caratterizzazione del materiale.

Per andare dunque a ricavare le deformazioni del provino e calcolare, tramite formule matematiche, i vari parametri ingegneristici, è stato utilizzato il metodo di Digital Image Correlation (DIC), basato sull'acquisizione di immagini tramite telecamere ad alta risoluzione. Definendo uno speckle pattern sul provino si vanno a registrare gli spostamenti dei singoli punti, in modo da registrare la deformazione dell'intero insieme, questi dati consentono quindi di avere l'intero campo delle deformazioni, di ricavare la curva σ - ϵ e i relativi parametri ingegneristici con una maggiore accuratezza.

2.2. Funzionamento DIC

La Digital Image Correlation è una tecnica di misura delle deformazioni a tutto campo, non invasiva, che si basa sull'acquisizione di immagini successive di un provino sottoposto a sollecitazioni tramite l'utilizzo di una o più telecamere. Il sistema si basa sulla capacità di un software di riconoscere, identificare dei punti e seguirne gli spostamenti. Nell'immagine riportata è descritta, in breve, la procedura logica alla base della misurazione.[Figura 2.1]

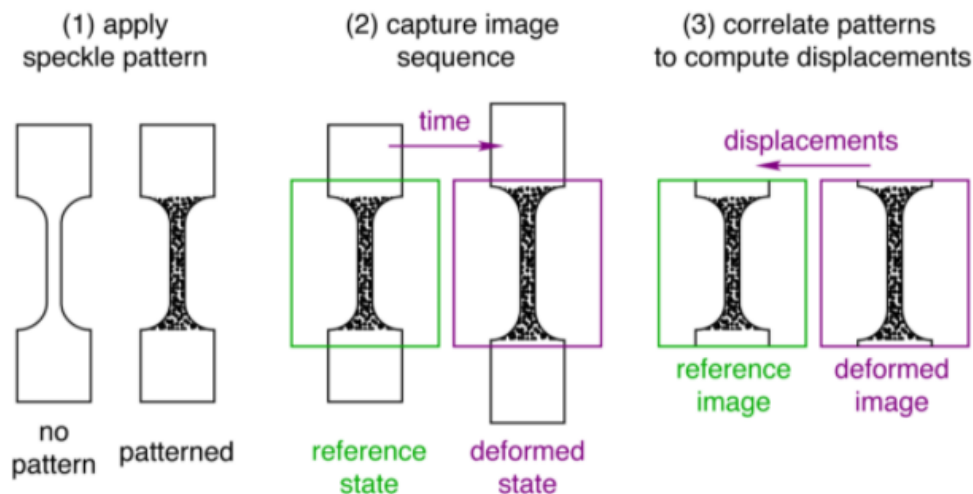


Figura 2.1: Processo logico di correlazione effettuato dalla tecnica DIC

Come primo step, per poter associare al provino dei punti notevoli, viene realizzato un pattern stocastico col fine di rendere univocamente identificabili diverse zone del provino. Le immagini sono registrate in bianco e nero così da analizzare il tutto con scale di grigi e ottenere un maggior contrasto tra le singole aree. Questo facilita il

riconoscimento delle zone, che vengono identificate tramite il valore di intensità luminosa riflessa dai pixel e dalla distribuzione di quest'ultimi.

Basando la distinzione delle zone tramite scale di grigi, il contrasto sarà il fattore discriminante che il software utilizzerà per distinguere i punti. Si cerca di fatti di avere un rapporto tra zone di luce e ombra pari al 50%; andando a realizzare un fondo bianco e un patter nero ci si pone quindi nelle condizioni ideali per facilitare il processo di calcolo del sistema.

Esistono diverse modalità di misurazioni tramite DIC, queste si basano o sull'utilizzo di una sola telecamera (2D-DIC), o tramite l'utilizzo di due telecamere posizionate in stereo (3D-DIC)[Figura 2.2].

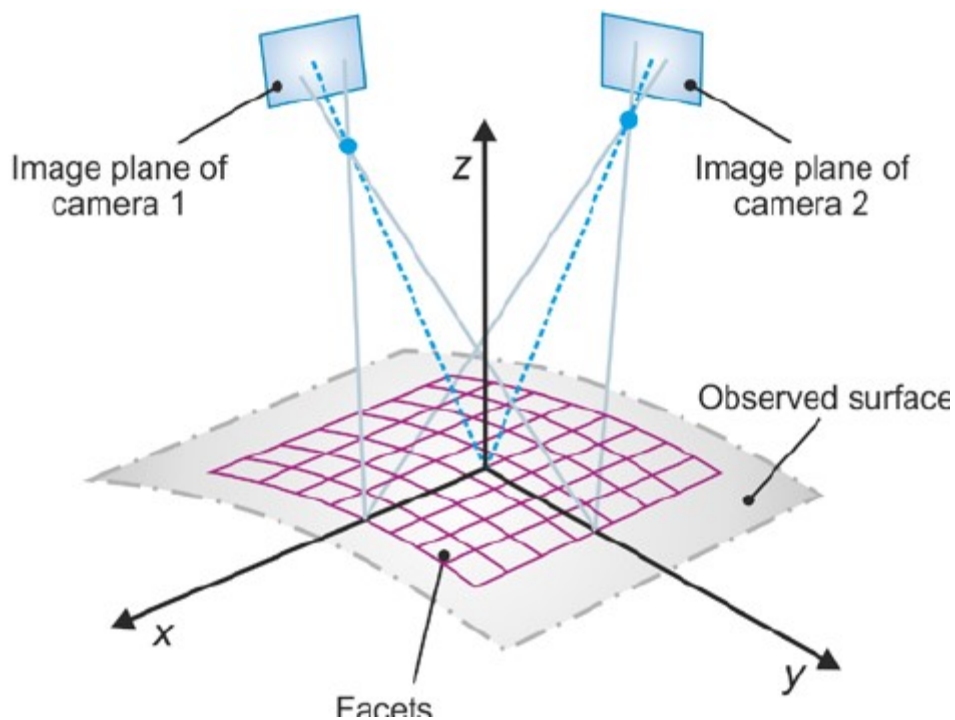


Figura 2.2: Funzionamento stereovisione per il tracciamento di punti nello spazio

Data la geometria del provino, una lamina con sviluppo prettamente verticale, si sarebbe potuto optare per l'utilizzo di una sola camera, al fine di misurare solamente gli spostamenti sul piano del provino. Andando però ad utilizzare la visione stereoscopica di due telecamere, sfruttando due punti di vista differenti per effettuare la misurazione e conoscendo la posizione relativa delle camere, il sistema può diventare sensibile anche a spostamenti *out of plane*. Ciò è stato rilevante soprattutto per andare ad osservare

anche le increspature longitudinali nei provini, frequenti nei test svolti con inclinazione delle fibre a 45°.

Durante l'intera prova si acquisiranno quindi immagini da entrambe le telecamere negli stessi istanti di tempo. Nel nostro caso si è scelto di impostare un intervallo di acquisizione di 0,6 secondi, riservandoci in seguito la possibilità di selezionare fotogrammi anche per intervalli maggiori, così da accorciare i tempi di correlazione del programma.

Per ogni prova verranno quindi generate coppie di immagini rispettivamente dalla CAM0 e dalla CAM1, più un file time identificativo degli istanti di tempo delle acquisizioni.

Per far sì che le immagini acquisite abbiano un senso fisico, serve poterle riferire ad un set-up iniziale che consenta di collocare spazialmente le telecamere e il provino. Nella fase di calibrazione, che verrà spiegata nel capitolo 2.5, vengono quindi calcolati tutti i parametri intrinseci ed estrinseci del sistema. Questo consentirà di avere un posizionamento relativo dei singoli elementi e di poter avere una situazione di riferimento, sulla base della quale andare ad osservare gli spostamenti del pattern e quindi le deformazioni del provino

2.3. I provini

Il materiale fornitoci prevede n°8 tele per ogni tipologia di materiale, di formato 150x150 mm [Figura 2.3] ciò ha in parte condizionato la lunghezza massima del provino che però, con sezioni da 34mm, si è dimostrato sufficientemente lungo per permettere di posizionare gli afferraggi, ad una distanza tale, da non interferire nella zona centrale. Questo garantisce, durante tutta la prova, che nella zona esaminata non insorgano sforzi biassiali, garantendo lo svolgimento di una prova puramente monoassiale, nel tratto di interesse.

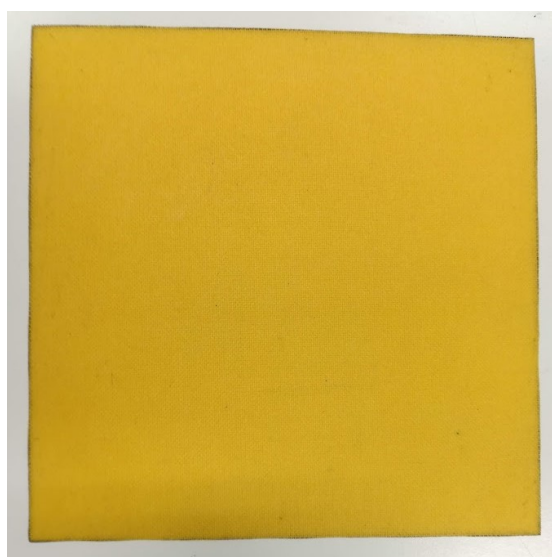


Figura 2.3: Tela 150x150 del materiale composito polimerico B

Le stesse dimensioni dei provini sono state mantenute anche per i provini a 45° e ne sono stati ricavati n°2 da un unico foglio, così da garantire la corretta inclinazione delle fibre.

Il processo di ottenimento dei singoli provini ha richiesto particolare accortezza soprattutto nel taglio di quest'ultimi. Essendo le tele composte da una matrice composita, di materiale polimerico, termoformato, presentano una trama distinguibile anche ad occhio nudo; l'azione di taglio, se non correttamente eseguita, avrebbe potuto portare alla rottura della maglia della tela e alla conseguente formazione di un punto di intaglio nel bordo del provino. Questo avrebbe favorito la formazione di una cricca e una prematura propagazione di quest'ultima, per un aumento improvviso delle tensioni locali. Soprattutto per i provini del materiale C e D, costituiti da fibre più spesse e trame

più ampie, quindi con una maggiore probabilità di intagli laterali, si sono dovuti scartare due provini in quanto non sono stati ritenuti idonei all'essere testati.

Il passo successivo è stata la realizzazione dello speckle pattern per la misurazione tramite DIC. Lo speckle, come precedentemente accennato, è alla base del funzionamento della misurazione; andando a caratterizzare l'area centrale del provino con zone più o meno scure, si permette alle telecamere di individuare, valutare e riconoscere le singole zone. Dopo aver calibrato il set-up di misura e aver individuato tutti i suoi componenti nello spazio, la tecnologia DIC consentirà di calcolare lo spostamento relativo delle singole zone, correlando tra di loro le immagini acquisite durante la prova. Si capisce quindi come sia di fondamentale importanza avere un contrasto sufficientemente elevato nel tratto da analizzare, al fine di poter apprezzare la differenza tra zone cromaticamente differenti. Per garantire un sicuro riconoscimento dei singoli speckle, sarà fondamentale generare un pattern il più casuale possibile, così da evitare errori di correlazione in fase di analisi. Un'altra causa di possibili decorrelazioni è la dimensione dello speckle: la telecamera avendo una propria risoluzione, consente di apprezzare movimenti solo oltre la dimensione minima del pixel, spostamenti inferiori non saranno dunque rilevati in quanto non porteranno ad una variazione dell'intensità luminosa del pixel. Perciò spostamenti all'interno di quest'ultimi non saranno registrati; di contro una dimensione dello speckle notevolmente più grande del singolo pixel, porterebbe a perdere sensibilità sui piccoli spostamenti, generando a volte anche decorrelazioni del programma.

L'immagine seguente esprime visivamente l'importanza delle dimensioni dei singoli speckle [Figura 2.4].

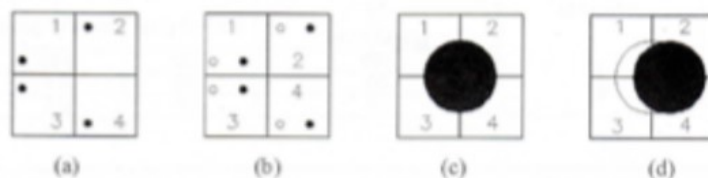


Figura 2.4: Schematizzazione delle dimensioni degli speckle, rapportate al pixel, che la procedura riesce a tracciare

È chiaro, in questo caso, come solo andando ad utilizzare dimensioni considerevoli rispetto al pixel, il sistema sia in grado di riconoscere e valutare lo spostamento dello speckle.

Esistono diverse tecniche per creare un pattern su di un provino e, tenendo conto delle considerazioni appena fatte, dovendo lavorare con delle tele, nelle quali la trama avrebbe potuto confondersi con il pattern, si è ritenuto opportuno realizzare lo speckle tramite verniciatura della parte centrale. Essendo la maglia abbastanza larga, per ottenere un contrasto maggiore tra zone chiaro scure, è stata prima realizzata una base con vernice bianca ad asciugatura rapida e, in seguito, il contrasto è stato realizzato tramite getti intermittenti di vernice nera opaca, così da realizzare il pattern come in figura [Figura 2.5]. Nell'immagine è inoltre descritta la sequenza di realizzazione del pattern, a partire dalla delimitazione dell'area di verniciatura tramite scotch carta fino al provino pronto da essere testato.

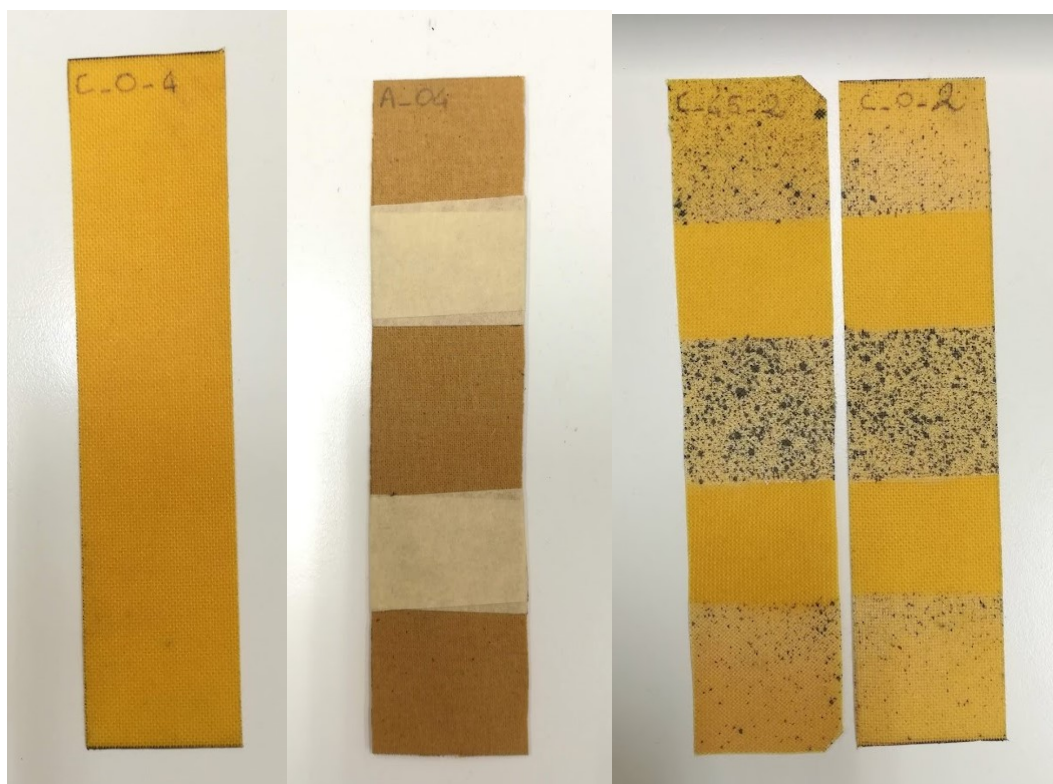


Figura 2.5: Sintesi del processo di realizzazione dello speckle pattern, dalla delimitazione dell'area di verniciatura, alla realizzazione del pattern

La zona di interesse è naturalmente la parte centrale del provino, lontano dagli afferraggi dove la deformazione rimane monoassiale. Il fondo bianco permette, rispetto alla trama base, di avere un contrasto di zone più definito e quindi consentire al

programma una più facile correlazione delle immagini. Non si è volutamente realizzato un pattern più ampio per limitare al minimo l'apporto di vernice sulla tela, ed evitare possibili modifiche delle proprietà.

Di fatti il risultato ottenuto sembra essere soddisfacente in quanto, le principali guide riguardanti la misurazione tramite DIC, presentano pattern simili come grandezza, casualità di distribuzione, densità di zone e contrasto. [Figura 2.6]

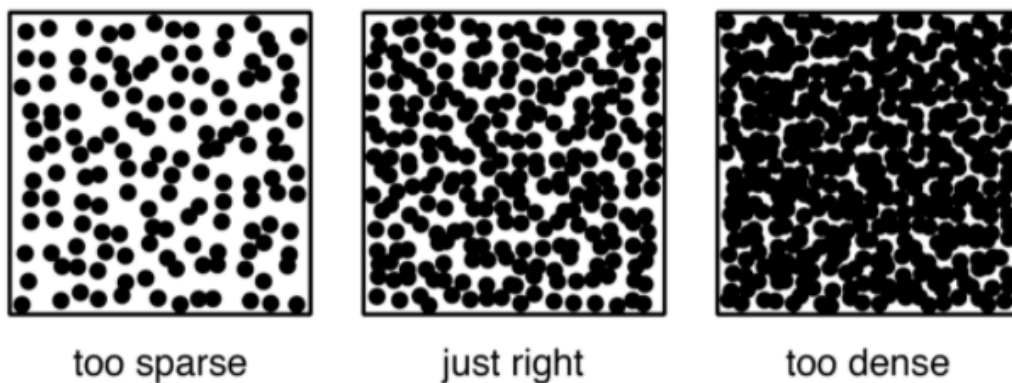


Figura 2.6: esempi di densità dello speckle per permettere una corretta correlazione dei punti

La bontà della soluzione è stata stimata ad occhio, ma a ragion veduta: la iDICs consente di fatti, in condizioni di stereoscopia, con telecamere ad alta risoluzione, di valutare ad occhio la grandezza degli speckle. Per garantire comunque una verifica più scientifica della semplice misurazione visiva, si potrebbe pensare di controllare, con un'analisi accurata, che le dimensioni medie degli speckle risultino essere dell'ordine di 3-5 pixels come consigliato all'interno della guida.

2.4. Set up per la misurazione

La macchina per la prova di trazione è stata dotata di due afferraggi a pinza, appositamente serrati per evitare slittamenti del provino, e, per la misurazione delle forze in gioco, si è ricorso a celle di carico da 5KN.

Per quanto riguarda il metodo DIC, per poter ottenere le deformazioni effettive del provino, sono state utilizzate due telecamere ad alta risoluzione in stereo. Per una corretta acquisizione delle immagini le due CAM sono state posizionate frontalmente al

provino su dei cavalletti; particolare accortezza è stata utilizzata nel posizionamento relativo, impostando tra di loro un angolo di stereo (stereo-angle) di 20° , questo valore è stato scelto in quanto la guida iDICs consiglia, per set-up di questo tipo, angoli compresi tra 15-35 gradi.

Nell'immagine [Figura 2.7] si evidenzia come, un primo set-up sia stato realizzato con una disposizione orizzontale delle telecamere, ma questo si è visto, tramite i parametri di calibrazione, non soddisfare i requisiti dello *stereo-angle* sopra citati.

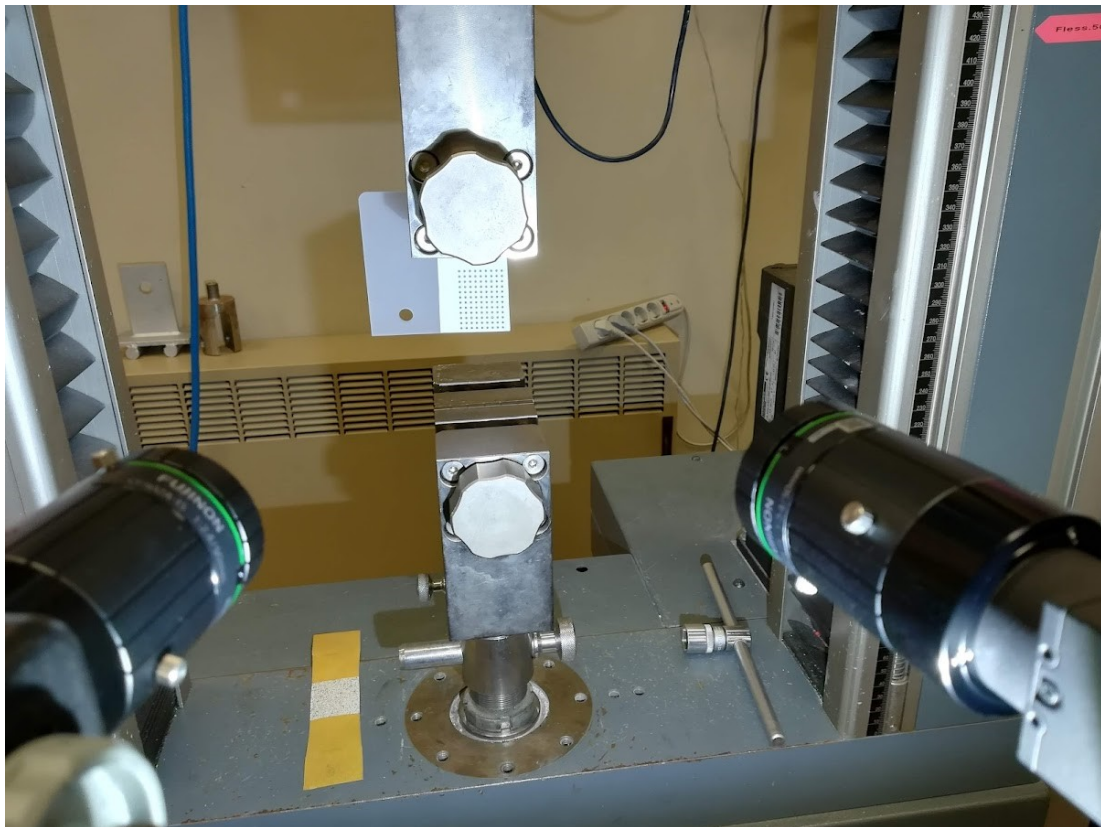


Figura 2.7: Primo set-up di misurazione con telecamere in stereoscopia, sull'afferraggio è montato il provino di calibrazione

L'utilizzo di un valore intermedio all'intervallo viene giustificato dal voler evidenziare possibili deformazioni fuori dal piano del provino, ma dando comunque una sensibilità maggiore agli spostamenti all'interno di questo; angoli troppo elevati tra le due telecamere porterebbero, di fatti, a possibili incongruenze in fase di correlazione e difficoltà da parte del programma a correlare i singoli punti.

Per rendere possibile tale angolo è stato necessario posizionare le telecamere una sopra l'altra, così da limitare gli ingombri dei cavalletti, prediligendo la disposizione verticale come in figura [Figura 2.8].

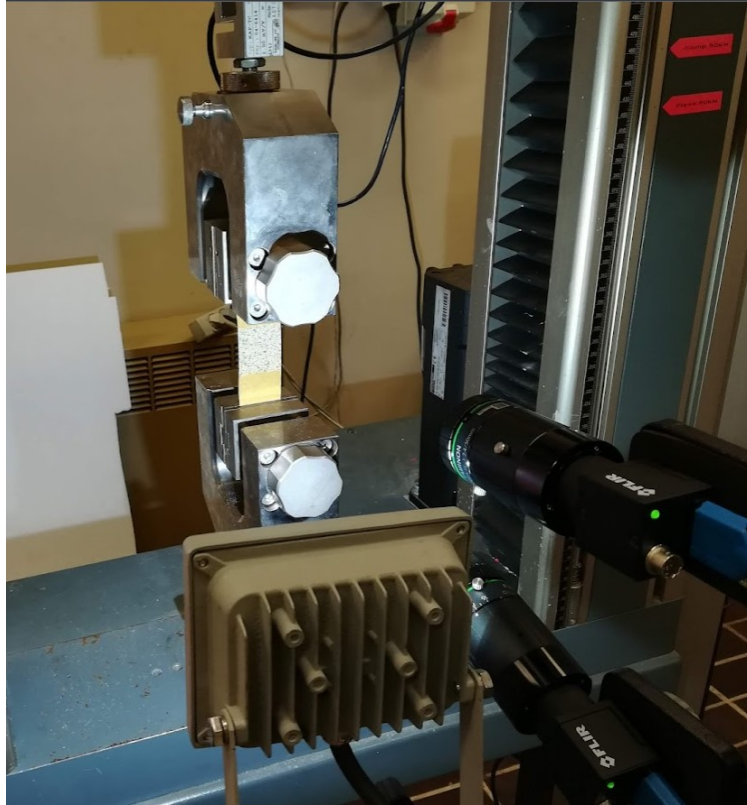


Figura 2.8: Set-up definitivo usato per tutte le prove, telecamere in stereoscopia montate verticalmente, faretto alogeno per l'illuminazione del target, provino afferrato in fase di trazione

Nella figura precedente si vede come per poter garantire la corretta visualizzazione dello speckle sui provini, sia stato necessario posizionare un terzo cavalletto per sorreggere un faretto alogeno che, nella configurazione verticale, è stato più correttamente inserito alla stessa altezza delle telecamere, così da irradiare il più frontalmente possibile il provino. Questo è stato posto in prossimità del provino, in modo da illuminare la prova per la sua intera durata, al fine di avere meno interferenze possibili con altre fonti di luce e garantire un'illuminazione intensa e uniforme.

Il faretto alogeno, data la natura della luce generata, richiede una frequenza di acquisizione più bassa rispetto alle potenzialità delle telecamere quindi, tramite il programma di controllo scritto dal dipartimento Impact and Materials Mechanics Laboratory (IMML) dell'Università Politecnica delle Marche, è stata modificata a 10Hz così da ottenere una ripresa pulita del provino.

Per la scelta di quali ottiche montare sulle telecamere, si è semplicemente provato con una lente da 20mm, per poi passare ad un obiettivo da 50mm come in foto [Figura 2.9]. La distanza dei tre cavalletti dovuta all'ingombro dell'attrezzatura di misurazione e la grandezza del provino, ha quindi influenzato la scelta della lente. Il risultato è comunque più che soddisfacente, in quanto, con il set-up scelto, si è riusciti ad avere un totale inquadramento di tutto il tratto utile per tutta la durata della prova.



Figura 2.9: A sinistra la telecamera montata sul cavalletto con l'obiettivo da 50mm, al centro particolare dell'obiettivo, a destra caratteristiche tecniche dell'obiettivo

2.5. Calibrazione

Il processo di acquisizione delle immagini deve essere necessariamente preceduto da una fase di calibrazione del set-up che viene effettuata con un primario di calibrazione di geometria nota.[Figura 2.10]

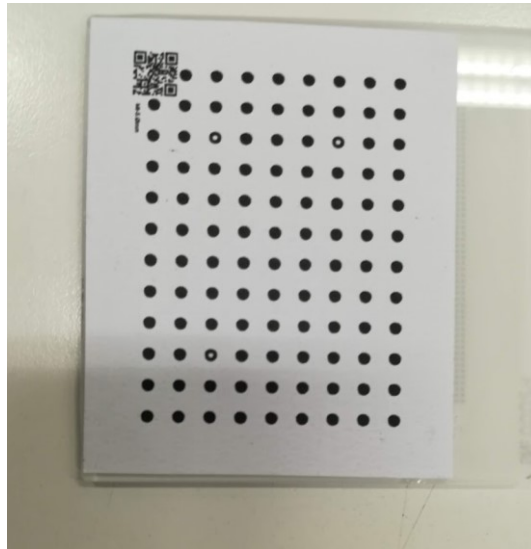


Figura 2.10: Esempio di provino di calibrazione montato su vetrino piano

Questo deve essere rigorosamente realizzato tramite software, in modo tale da poter conoscere tutte le grandezze caratteristiche, come la distanza tra i punti, la posizione dei marker per gli assi X e Y, e la dimensione generica della matrice. Una volta ricavato il modello, questo viene stampato ed incollato su di un lamierino di vetro o acciaio, rigorosamente piatto. Curvature presenti su questo pezzo porterebbero di fatti a calibrazioni non affidabili, andando a falzare le prove.

In questa fase si vanno a registrare i vari parametri geometrici nel volume di misura delle telecamere, per avere un riferimento col quale definire gli spostamenti del provino. Grazie a questo, si andranno quindi ad orientare le telecamere l'una rispetto all'altra, al fine di calcolare la posizione relativa fra le camere e la distanza del target.

Si va quindi ad acquisire l'immagine di riferimento del target che verrà utilizzata come confronto con le successive. Una volta effettuato il riconoscimento del target di riferimento, questo viene movimentato manualmente andando a ricavare una serie di fotogrammi sui quali basare la calibrazione; nel nostro caso sono state acquisite 74 coppie di immagini che il software utilizzerà in seguito come riferimento per calcolare

gli spostamenti del provino. Di seguito vengono riportate delle immagini esemplificative delle movimentazioni imposte al primario. [Figura 2.11]

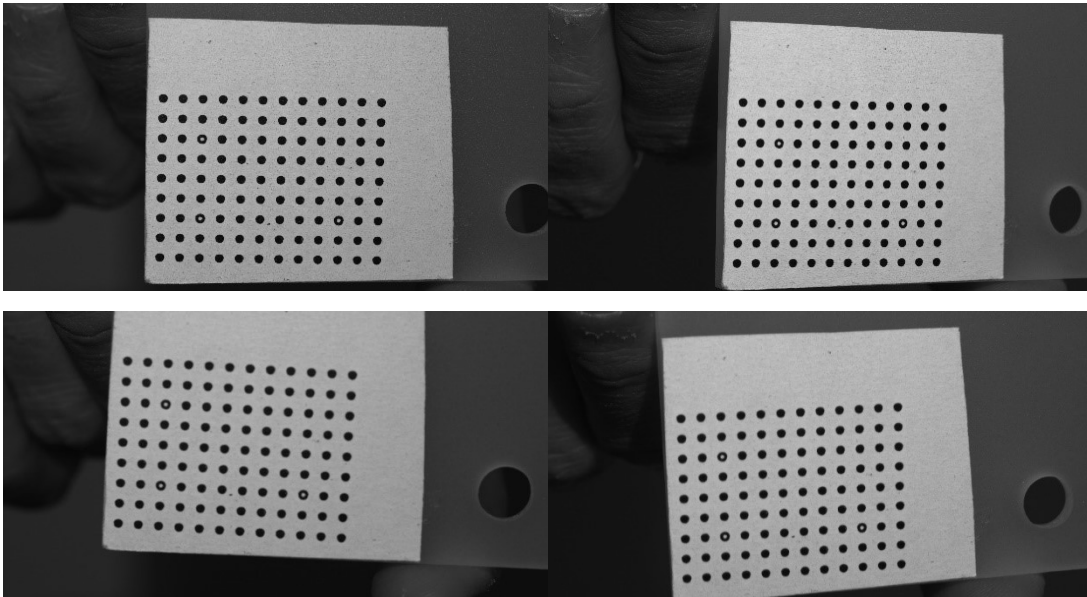


Figura 2.11: Processo di calibrazione, successione delle movimentazioni del target per calibrare il sistema, inquadratura della camera bassa

Tale processo è stato effettuato tramite un programma scritto in LabView dal dipartimento Impact and Materials Mechanics Laboratory (IMML) dell'Università Politecnica delle Marche.

La fase di calibrazione è un punto cruciale in quanto capace di falsare completamente la misurazione se non correttamente eseguita. Al fine di assicurarne una corretta riuscita, se ne consiglia l'attuazione in due persone, una addetta alla movimentazione del primario di calibrazione e una pronta a registrare l'immagine a varie inclinazioni. Di fatti in questa parte l'importanza sta nel riuscire ad avere immagini nitide al fine di garantire la massima messa a fuoco delle camere e una corretta distinzione dei chiaro scuri, riuscendo di fatti a collocare correttamente il target nello spazio.

Una volta scattate le immagini nelle quali viene mosso il primario, tramite il programma MatchID Calibration, si può procedere ad ottenere il file di calibrazione, fondamentale per le successive misurazioni. Il programma richiede come informazione base di identificare che tipo di primario si stia andando a registrare, le sue dimensioni e come sia composto.

Quello da noi utilizzato è un target normato [Figura 2.12] sul quale è stato stampato uno speckle pattern composto da 108 punti distribuiti in una matrice 12x9, con una spaziatura di 4mm, i tre dots in bianco vengono inseriti per permettere al sistema di individuare gli assi di riferimento X e Y.

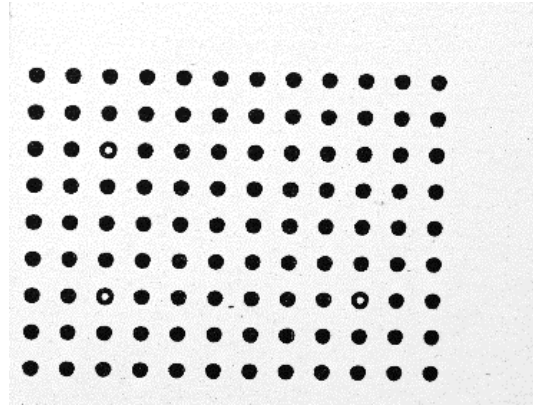


Figura 2.12: Primario di calibrazione utilizzato con pattern 9x12 con 4mm di spaziatura. Da notare i dots bianchi di riferimento per gli assi X e Y

2.6. Misurazione

Una volta allestito il set-up per l'acquisizione delle immagini, effettuata la calibrazione delle telecamere, ricavato e verniciato i provini, si può passare alla prova vera e propria.

Ogni provino prima di essere caricato sulla macchina viene misurato nelle due grandezze di interesse: larghezza e spessore. Ogni tipologia di materiale si differenzia geometricamente per spessori differenti, nella tabelle di seguito vengono elencati tutti i provini testati con le loro caratteristiche geometriche.

Tabella 2-1: Riepilogo delle caratteristiche geometriche per i provini di materiale A e B, vengono riportati i nomi aziendali, le dimensioni, la numerazione

| | | | | | |
|---------------|-------------|------|---------------|-------------|------|
| MATERIALE | CY-1458 | | MATERIALE | N-1040 | |
| N.CENTRATORE | 20211009002 | | N.CENTRATORE | 20211009003 | |
| N.TELE | 20211010012 | | N.TELE | 20211010011 | |
| DENOMINAZIONE | A | | DENOMINAZIONE | B | |
| | | | | | |
| PROVINI MONO. | DIMENSIONE | D | PROVINI MONO. | DIMENSIONE | D |
| A_0_1 | 150X33 | 0,36 | B_0_1 | 150X34 | 0,34 |
| A_0_2 | 150X35 | 0,36 | B_0_2 | 150X35 | 0,34 |
| A_45_1 | 150X34 | 0,36 | B_45_1 | 150X36 | 0,34 |
| A_45_2 | 150X34,2 | 0,36 | B_45_2 | 150X37 | 0,34 |

Tabella 2-2: Riepilogo delle caratteristiche geometriche per i provini di materiale C e D, vengono riportati i nomi aziendali, le dimensioni, la numerazione

| | | | | | |
|---------------|-------------|------|---------------|-------------|------|
| MATERIALE | N-11038 | | MATERIALE | N-1025 | |
| N.CENTRATORE | 20211009004 | | N.CENTRATORE | 20211009005 | |
| N.TELE | 20211010010 | | N.TELE | 20211010013 | |
| DENOMINAZIONE | C | | DENOMINAZIONE | D | |
| | | | | | |
| PROVINI MONO. | DIMENSIONE | D | PROVINI MONO. | DIMENSIONE | D |
| C_0_1 | 150X34 | 0,35 | D_0_1 | 150X36 | 0,48 |
| C_0_2 | 150X34 | 0,35 | D_0_2 | 150X36 | 0,48 |
| C_45_1 | 150X36 | 0,35 | D_45_1 | 150X34 | 0,48 |
| C_45_2 | 150X34 | 0,35 | D_45_2 | 150X34 | 0,48 |

La denominazione 0 e 45 fanno riferimento all'inclinazione delle fibre rispetto alla movimentazione della traversa, mentre il parametro D evidenzia lo spessore costante per ogni sottogruppo, ma differente tra i vari materiali.

Dopo aver fissato il provino con gli afferraggi si può dunque far partire il test. La prova viene eseguita imponendo la traslazione della traversa mobile e andando a registrare il

carico applicato al provino. La macchina di trazione ci consentirà quindi di avere l'andamento del carico nel tempo e di valutare, in prima approssimazione, la curva $\sigma-\epsilon$ e i parametri ingegneristici quali modulo di Young e coefficiente di Poisson. Per quanto riguarda il modulo di taglio, si fa riferimento alla norma ASTM D-3518 che definisce il metodo per il calcolo di G, che verrà approfondito nel capitolo 4.4.

Nell'istante in cui si avvia la prova di trazione, deve essere attivata anche l'acquisizione delle immagini da parte delle camere. Per fare ciò, dovendo usare due terminali diversi, uno per la prova e uno per l'acquisizione, è necessaria la presenza di due individui che, tramite semplice comunicazione verbale, avviano entrambi i processi. Ciò naturalmente avverrà con un certo sfasamento temporale, ma essendo questo un test quasi statico, per la bassa velocità di traslazione della traversa, il ritardo non inficerà minimamente la prova. L'unica accortezza dovrà essere tenuta in seguito quando si dovranno sincronizzare gli andamenti temporali delle deformazioni e del carico per ricavare la curva $\sigma-\epsilon$.

Anche in questa fase di acquisizione delle immagini si è ricorso all'utilizzo del programma scritto in LabView dal dipartimento Impact and Materials Mechanics Laboratory (IMML) dell'Università Politecnica delle Marche mostrato in foto. [Figura 2.13]

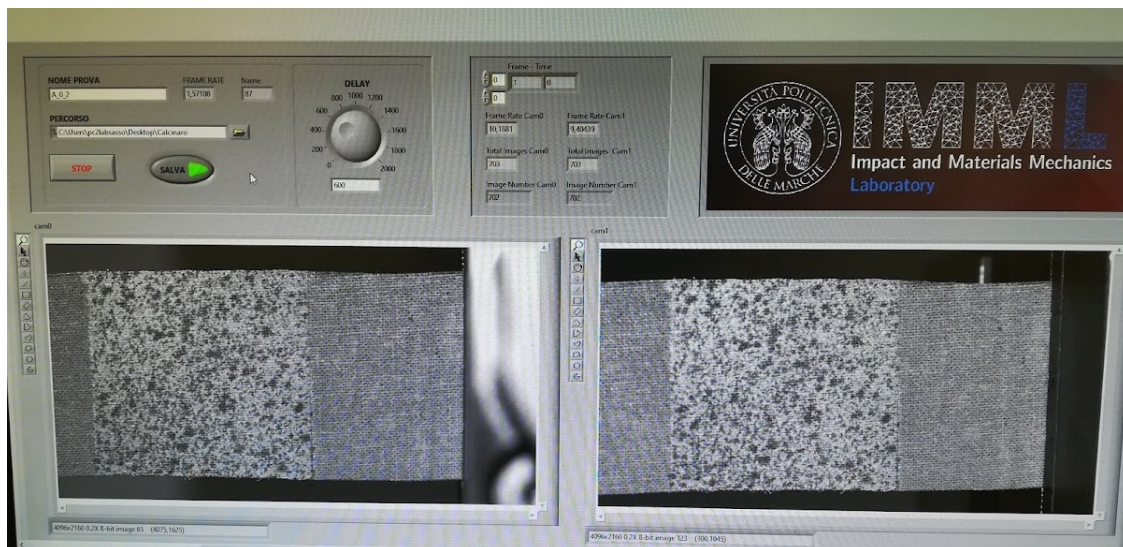


Figura 2.13: Interfaccia grafica del programma scritto in LabView per l'acquisizione delle immagini, a sinistra l'inquadratura della CAM0, a destra la CAM1 e in alto la plancia dei comandi

Questa è l'interfaccia grafica con la quale l'operatore si trova a lavorare, in basso viene riportata l'inquadratura di ogni telecamera, da notare la diversa prospettiva dell'afferraggio della macchina sulla destra delle immagini, a testimonianza dell'inclinazione delle due camere. In alto a sinistra sono presenti dei comandi quali: directory di salvataggio e nome della prova. Subito a fianco è stata inserita una manopola virtuale per la selezione del tempo di acquisizione delle singole immagini, impostata a 0,6 sec e tenuta costante per tutte le prove, e il comando "salva" per la registrazione manuale di vari frame. L'acquisizione manuale è stata utilizzata di fatti nella fase di calibrazione nella ripresa delle singole movimentazioni del primario.

3. Elaborazione delle immagini tramite MatchID:

3.1. Preparazione e area di interesse

MatchID è il programma di correlazione immagini che è stato scelto per elaborare le acquisizioni della DIC.

Essendo un programma realizzato per agevolare il processo, presenta un'interfaccia intuitiva e ben descritta, in modo da non rendere più macchinoso un processo già di per se complesso.

Come abbiamo già spiegato, la misurazione è imprescindibile dalla calibrazione, ogni sistema di misura relativo deve quindi essere orientato nello spazio e avere punti di riferimento. Il file calib.dat è il primo dato da inserire nel programma al fine di avere le informazioni di base per la misurazione.

Il passo successivo è stato il caricamento delle immagini della prova: queste sono state in numero variabile in base al tempo della prova, prove più lunghe con provini rotti anche oltre i 10min hanno di fatti richiesto più di 1200 fotogrammi. Affinchè il programma possa correlare, necessita di un'area di studio: le immagini, come precedentemente descritto, vengono registrate su scale di grigi per massimizzare il contrasto tra zone di luce e ombra, quindi bisogna limitare l'area di studio tramite una geometria. Per decidere quanto allargare lo spazio analizzato si sono fatte alcune considerazioni:

- 1) Fuori dallo speckle pattern realizzato il programma sicuramente non riuscirà a correlare
- 2) Non serve ai fini dello studio indagare gli effetti nel bordo
- 3) Nel lato corto tenersi lontano dalla trama
- 4) Aree più piccole riducono i tempi di correlazione
- 5) Aree con lati paralleli creano meno ostacoli al programma

Queste hanno portato a generare una sezione rettangolare come in figura [Figura 3.1]

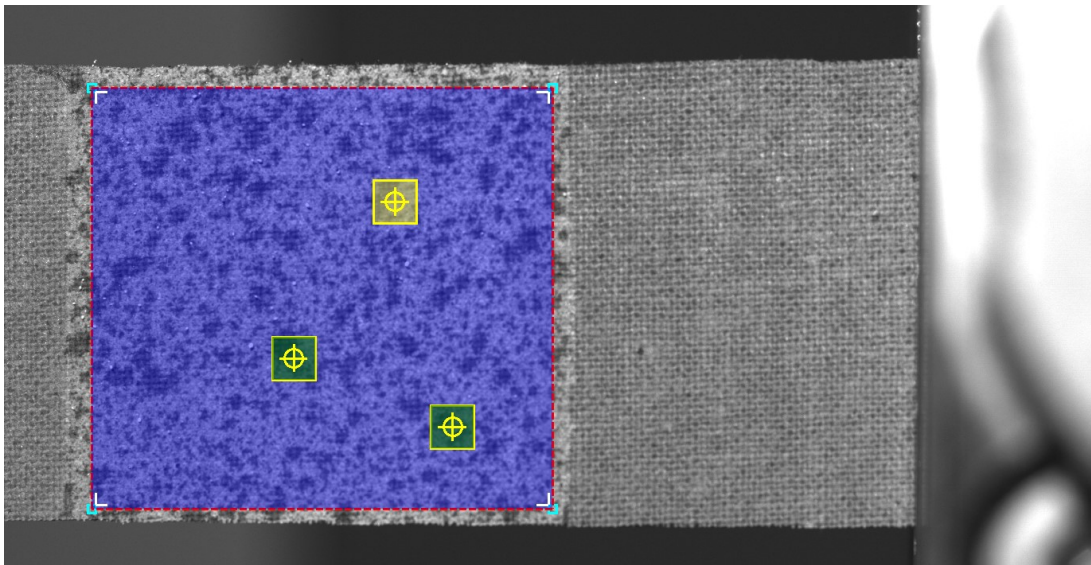


Figura 3.1: Area di interesse nello studio delle deformazioni, in giallo i subsets inseriti posizionati in zone ad alto contrasto

La sezione risulta quindi contenuta all'interno dello speckle patter e non ne ricopre interamente tutta l'area, tale scelta è stata dettata dalla non necessità di indagare effetti di bordo, non bisogna dimenticare lo scopo per il quale si è fatto ricorso alla misurazione tramite DIC: ricavare gli spostamenti durante una prova di trazione per ottenere E, G, ν . Di nostro interesse è di fatti il tratto iniziale della curva σ - ϵ , introdurre calcoli per effetti di bordo rischierebbe di aumentare considerevolmente i tempi di calcolo senza valorizzare ulteriormente l'indagine.

Come evidente non solo si è tenuto un certo distacco dal lato lungo del pattern, ma ci si è anche allontanati dalla zona di confine con la parte non verniciata del provino. Tale margine è stato inserito in virtù delle considerazioni già fatte sugli effetti di bordo; inoltre, essendo quella una zona di confine del pattern, il programma potrebbe non riuscire a distinguere le variazioni di luce introdotte dalla trama o dagli speckle.

3.2. Subset e step size

I tempi di elaborazione sono stati considerevoli, quindi cercare di ottimizzarli sulla base del nostro scopo è stato alla base delle nostre scelte, questo viene portato avanti anche dalla presenza di più subset nell'analisi.

Al fine di poter discretizzare l'immagine e quindi monitorare la variazione dell'intensità luminosa dei singoli punti, si devono impostare uno o più subset. Il subset è una zona, evidenziata sull'immagine di riferimento, che risulta essere ben caratterizzata da una distribuzione, ben distinta, di speckle; di fondamentale importanza è quindi identificare una zona con un buon contrasto e buona presenza di punti di luce e di ombra.

Oltre al posizionamento, si può modificare anche la dimensione del subset in modo da poterlo adattare ai vari casi di studio. L'utilizzo di uno size subset più o meno elevato comporta un'attenzione maggiore o minore degli effetti locali, di contro utilizzare un'area di indagine piccola porterà sicuramente a problemi di correlazione per mancanza di informazioni, gravando necessariamente sui tempi computazionali.

Oltre alla grandezza del subset si può modificare un altro parametro: lo step size. Al fine di discretizzare l'area di interesse, si dovrà ripetere il subset: il parametro step size descrive dunque la spaziatura presente, in pixel, tra due subset consecutivi. L'aumento di questo valore porterà quindi ad avere un'analisi più dettagliata a discapito dei tempi di calcolo. [Figura 3.2]

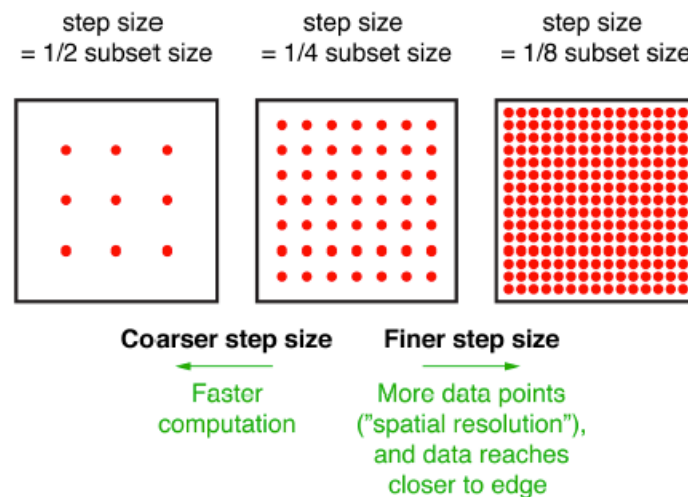


Figura 3.2: Correlazione tra subset size e step size

Entrambi questi parametri sono stati ricercati facendo girare il programma, per indagare la presenza di punti non rilevati, quindi si è valutata la bontà della scelta del numero e del posizionamento del subset, tenendo in considerazione i tempi di calcolo, decidendo se aumentare o meno lo step size.

In figura [Figura 3.3] vengono riportati i parametri utilizzati per testare il provino A_0_1, questo è stato processato utilizzando tre subset con una dimensione di 157 e una spaziatura di 51. Il programma cerca sempre in automatico di impostare un rapporto tra step size e subset di 1:4, ma sempre in base allo scopo dell'analisi, si è preferito abbassarlo leggermente a 1:3.

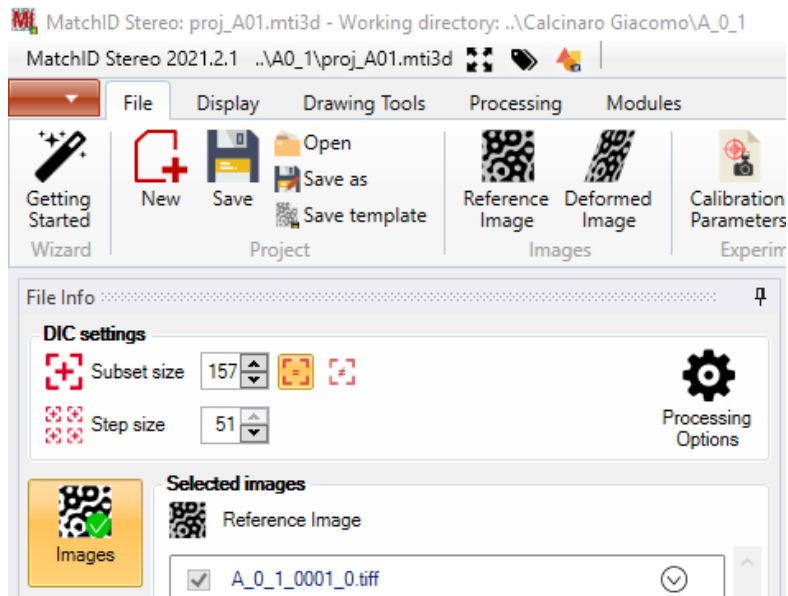


Figura 3.3: Interfaccia "MatchID Stereo" con la scelta del subset size e step size

Come illustrato precedentemente, durante le prove sono state acquisite immagini con intervalli di 0,6 sec. Questo ha generato, per alcuni provini, un quantitativo considerevole di frame; rimanendo quindi coerenti allo scopo della nostra indagine, si è provveduto ad effettuare una selezione delle immagini da analizzare, cercando di abbassare l'onere computazionale e diminuire i tempi di analisi. La scelta è stata fatta partendo dalla reference image e andando a selezionare un'immagine ogni due fotogrammi, questa periodicità è stata mantenuta per le prime cinquanta acquisizioni, che sono state ritenute sufficienti per caratterizzare accuratamente il tratto iniziale. Per consentire quindi una più veloce elaborazione, ma comunque affidabile, è stato selezionato un frame ogni sei nelle successive immagini fino alla rottura del provino. La rottura naturalmente, a causa dell'interruzione manuale dell'acquisizione durante la prova di trazione, non corrisponde all'ultimo istante registrato, quindi tutti gli eventi successivi alla rottura non sono minimamente di interesse e per questo non vengono aggiunti nella selezione.[Figura 3.4]

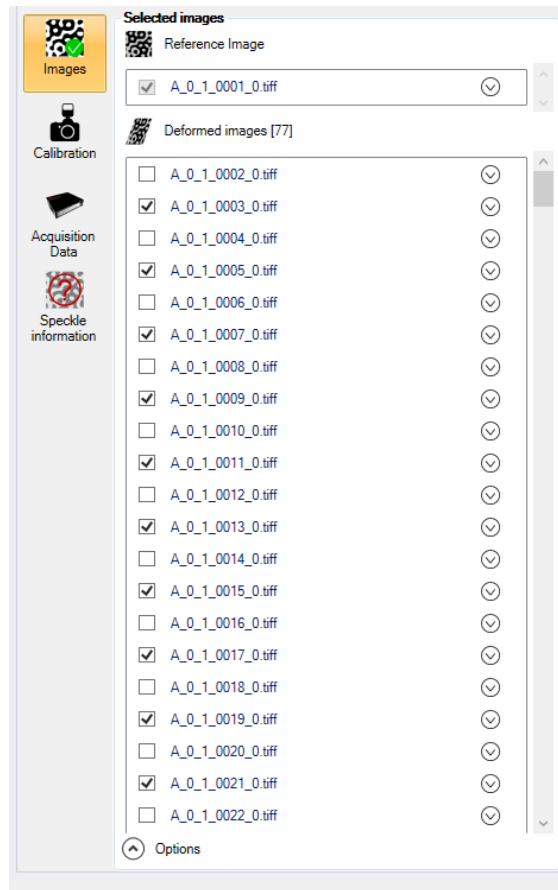


Figura 3.4: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per la selezione dei frame analizzati

È ora di passare al controllo delle "processing options", dove si andranno a limare tutte le opzioni per consentire una migliore e più veloce correlazione. Di seguito vengono riportate solamente le modifiche ai parametri di default, che si sono ritenute importanti all'interno della nostra elaborazione. Nella pagina "estimate" si porta il cursore, di norma settato a metà, nel campo delle grandi deformazioni[Figura 3.5].

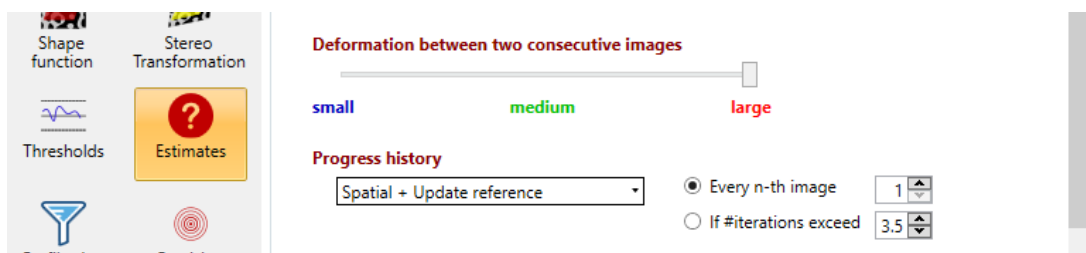


Figura 3.5: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per l'impostazione della grandezza delle deformazioni e del "Progress History"

Nel box "Progress history" si vanno a gestire le opzioni per l'avanzamento della correlazione; questo, di default, viene fatto basando il confronto solo con la prima immagine di riferimento. Selezionando, invece, il parametro "Spatial+Update

Reference”, si imporrà al programma di sfruttare anche le immagini precedenti come confronto. Ora il processo logico se non arriverà a convergenza rispetto all’immagine di riferimento, cercherà di effettuare la correlazione sfruttando le informazioni ottenute dalle immagini precedentemente analizzate.

Questa semplice, ma efficace tecnologia di aggiornamento del reference frame, riporta come ideologia al metodo di bisezione utilizzato per la ricerca degli zeri o delle radici, per tanto viene anche denominata “bisection searching”: cerca di rintracciare direttamente i punti del pattern a partire dal frame di riferimento, se fallisce dimezza il frame step e riprova la correlazione tra due immagini più vicine.[Figura 3.6]

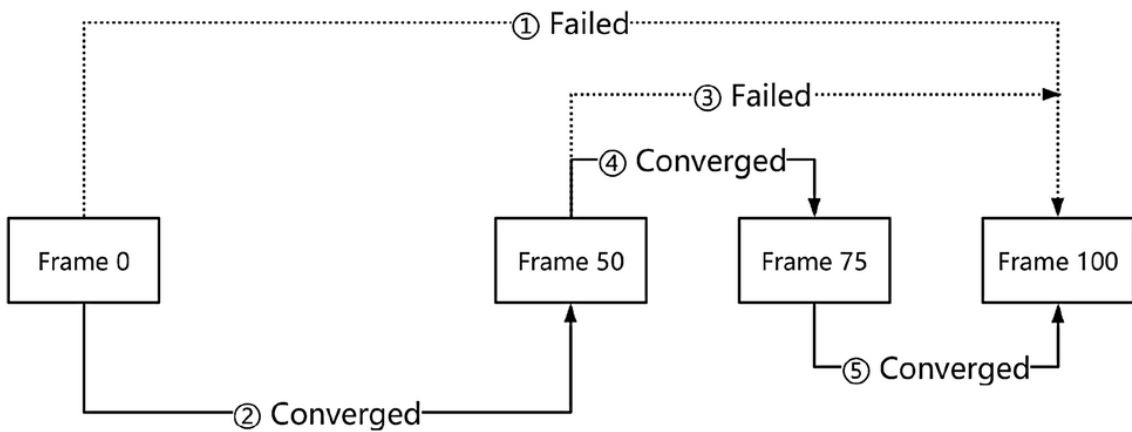


Figura 3.6: Schema logico del funzionamento del “bisection searching”

Infine l'ultimo parametro attenzionato è stato il valore di *correlation threshold*, che permette di regolare la precisione dei risultati della correlazione; si imposta, quindi, il minimo per il quale il programma riscontra un successo di correlazione, altrimenti il dato viene scartato e mai più utilizzato. Il valore di default è di 0,9, ma per consentire una più semplice correlazione al programma, si è deciso di diminuire tale parametro a 0,87. Nella stessa schermata si inserisce anche la spunta al "Missing data compensation" che consente di ricostruire i dati vicino ai bordi basandosi sulle "shape function" dei subsets impostati. [Figura3.7]

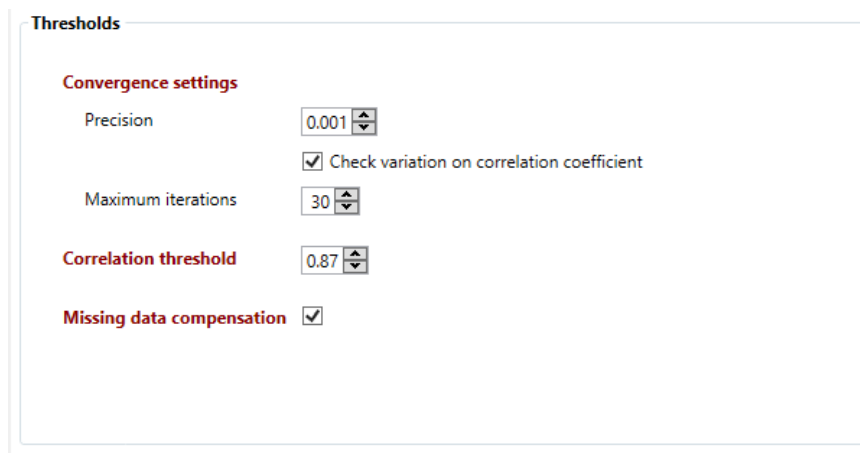


Figura 3.7: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per l'impostazione del "Correlation threshold" e del "Missing data compensation"

4. Estrazione dati elaborazione

4.1. Estrazione risultati di MatchID

Partendo con la correlazione delle immagini per i provini del materiale A e del materiale B, ci si è resi conto dell'onere computazionale imposto dalle telecamere ad alta risoluzione, nel calcolo degli spostamenti. Per esigenze tempistiche, si è quindi preferito continuare l'indagine processando solo i dati dei primi due materiali, mantenendo, però, tutti i fotogrammi delle altre prove, per poter in futuro riprendere lo studio in un modo sicuramente più completo.

Terminata la correlazione delle immagini, bisogna andare a rielaborare i risultati prodotti da MatchID, per poterli integrare in uno script Matlab e ricavarne i parametri ingegneristici.

Prima di esportare i dati dell'analisi, si richiede a MatchId di calcolare le deformazioni a partire dagli spostamenti calcolati. L'interfaccia grafica del programma permette quindi di settare le opzioni per il calcolo delle deformazioni, variando i parametri in figura.

[Figura 4.1]

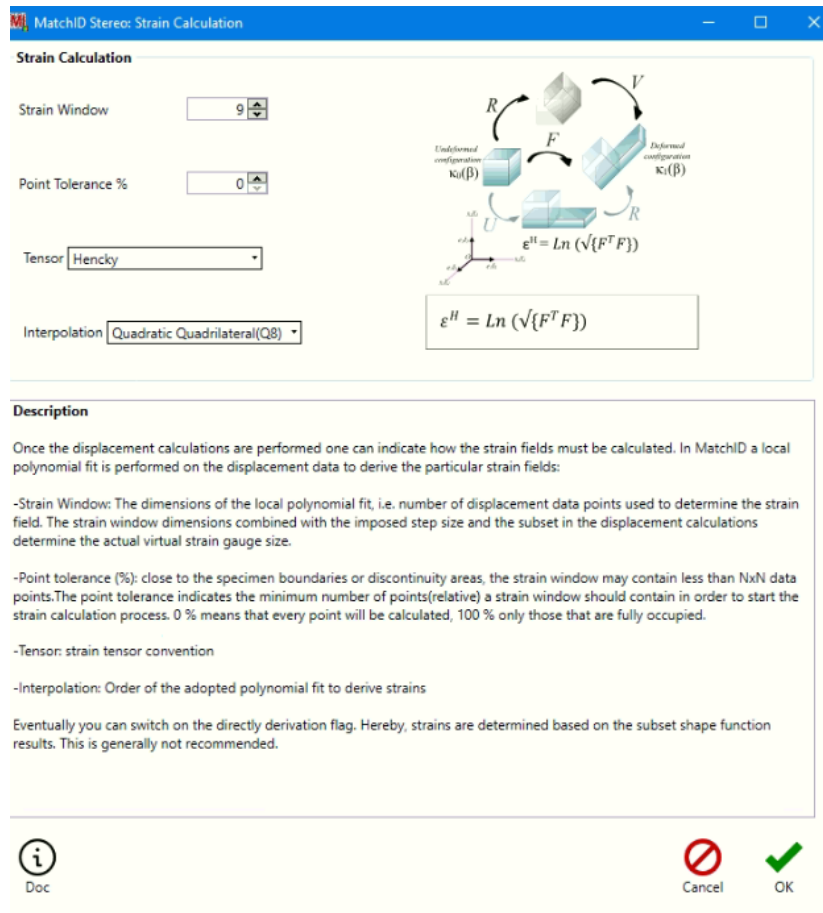


Figura 4.1: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per il calcolo delle deformazioni

La "Strain Window" è la dimensione di quanti punti spostamento utilizzare per determinare la deformazione, di default viene impostato a 9. Il "point tolerance", invece, indica la percentuale di dati che ogni punto deve avere affinché, il programma, calcoli la deformazione: impostando il parametro a 0% si spinge sempre ad effettuare la misura. Questo per noi è più che accettabile, in quanto la nostra area di interesse, non arriva in punti con assenza di dati quali bordi o zone incerte di luce e ombra. Il tensore di Hencky è stato scelto per calcolare le deformazioni, utilizzando la formulazione in alto a destra. A grandi linee, il modello di Hencky è un modello di elasticità finita isotropa, che lega il tensore delle tensioni di Kirchoff, al tensore delle deformazioni di Hencky, tramite la relazione lineare logaritmica riportata anche in figura. L'interpolazione viene lasciata di default e dando l'ok il programma si calcolano le deformazioni pronte per essere esportate.

Il comando "export data" permette quindi di estrarre i risultati. Come output il programma genera una cartella per ogni parametro richiesto, dove all'interno sono

allocati tanti files quante le immagini selezionate nella correlazione. A ogni frame appartiene quindi un file in ogni cartella, questi contengono tutti matrici riportanti il parametro indagato per ogni singolo punto. I risultati esportati sono stati quindi: le posizioni assolute X [mm] Y [mm] Z [mm], gli spostamenti relativi U [mm], V [mm], W [mm], le deformazioni E_{xx} , E_{yy} , E_{xy} , le massime e le minime deformazioni principali E_1 e E_2 . [Figura 4.2]

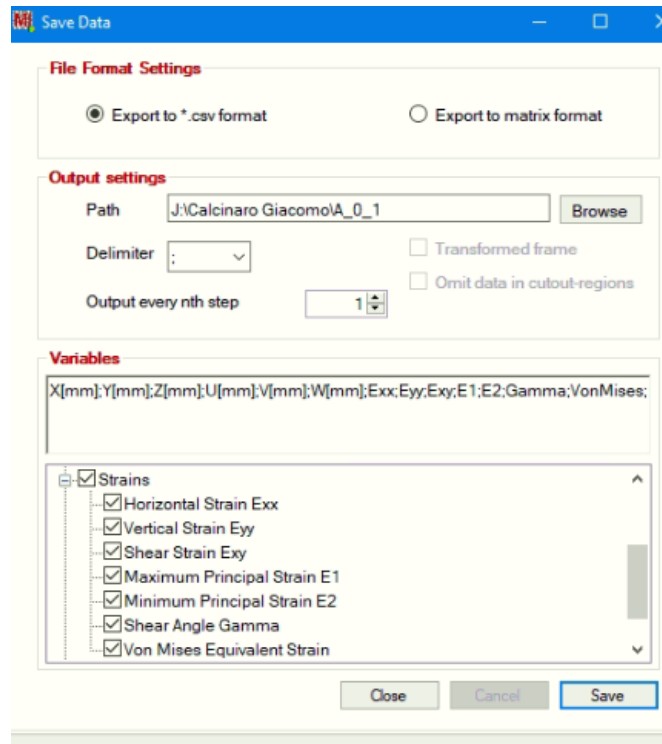


Figura 4.2: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per l'esportazione dei risultati in forma matriciale, selezione in particolare dell'albero delle deformazioni

4.2. Script "Export_data"

Per poter rendere organizzati e usufruibili i files estratti, si è generato uno script "export_data.m", un codice Matlab realizzato per unire i risultati, precedentemente organizzati in cartelle, in un unico file .mat. Il codice è organizzato per prendere in input i dati di MatchID, in formato matriciale, ed iniziare un ciclo *for* [Figura 4.3] per andare a ricreare i valori X, Y, Z, E_1 , E_2 , E_y , E_x , E_{xy} , U, V, W, tanti quanti erano le cartelle, inserendovi all'interno tante matrici quanti i frame analizzati. Ad esempio, per il provino A_0_1, del quale sono stati selezionati 78 frame, analizzati con una matrice 33x33, il codice

“export_data” genererà un valore per ogni parametro misurato, contenente 33x33x78 celle.

```

export_data.m x +
51 - ind = 0;
52 - jj = 0;
53 - P0(:, :, 1) = importdata([folderRES '\X[mm]\ ' csvNameX00{1}], ', ');
54 - [dimensioneriga, dimensionecolonna] = size(P0);
55 - for ii=1:Nfiles
56 -     % if ii==911
57 -     %     break
58 -     % end
59 -     clear tempdata index
60 -     P1 = [];
61 -     P1(:, :, ii) = importdata([folderRES '\X[mm]\ ' csvNameX00{ii}], ', ');
62 -     [k, j, w] = size(P1);
63 -     if ind == 0
64 -         if jj == w-1
65 -             jj = w;
66 -         else
67 -             jj = w-1;
68 -         end
69 -     else
70 -         if jj == w-1
71 -             jj = w-1;
72 -         end

```

```

export_data.m* x +
74 -     if [k, j] == [dimensioneriga, dimensionecolonna]
75 -         X0(:, :, jj) = importdata([folderRES '\X[mm]\ ' csvNameX00{w}], ', ');
76 -         Y0(:, :, jj) = importdata([folderRES '\Y[mm]\ ' csvNameY00{w}], ', ');
77 -         Z0(:, :, jj) = importdata([folderRES '\Z[mm]\ ' csvNameZ0{w}], ', ');
78 -         UX(:, :, jj) = importdata([folderRES '\U[mm]\ ' csvNameUX{w}], ', ');
79 -         UY(:, :, jj) = importdata([folderRES '\V[mm]\ ' csvNameUY{w}], ', ');
80 -         UZ(:, :, jj) = importdata([folderRES '\W[mm]\ ' csvNameUZ{w}], ', ');
81 -         EX(:, :, jj) = importdata([folderRES '\Exx\ ' csvNameEX{w}], ', ');
82 -         EY(:, :, jj) = importdata([folderRES '\Eyy\ ' csvNameEY{w}], ', ');
83 -         EXY(:, :, jj) = importdata([folderRES '\Exy\ ' csvNameEXY{w}], ', ');
84 -         E1(:, :, jj) = importdata([folderRES '\E1\ ' csvNameE1{w}], ', ');
85 -         E2(:, :, jj) = importdata([folderRES '\E2\ ' csvNameE2{w}], ', ');
86 -         F11(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F11\ ' csvNameF11{w}], ', ');
87 -         F12(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F12\ ' csvNameF12{w}], ', ');
88 -         F13(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F13\ ' csvNameF13{w}], ', ');
89 -         F21(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F21\ ' csvNameF21{w}], ', ');
90 -         F22(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F22\ ' csvNameF22{w}], ', ');
91 -         F23(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F23\ ' csvNameF23{w}], ', ');
92 -         F31(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F31\ ' csvNameF31{w}], ', ');
93 -         F32(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F32\ ' csvNameF32{w}], ', ');
94 -         F33(:, :, jj) = importdata([folderRES '\F33\ ' csvNameF33{w}], ', ');
95 -         n0 = str2num(csvNameEX{w}(7:end-15));
96 -         numeri(jj) = n0;
97 -         ind = 0;
98 -     else
99 -         ind = 1;
100 -     end
101 - end
102 - numeri = (numeri)';
103 - save data_B_0_1.mat X0 Y0 Z0 UX UY UZ EX EY EXY E1 E2 F11 F12 F13 F21 F22 F23 F31 F32 F33 numeri Nfiles

```

Figura 4.3: Schermate dello script "export_data" per l'unione dei dati di MatchID

4.3. Script Curva

Dopo aver raggruppato i dati si passa all'elaborazione vera e propria per ricavare i parametri ingegneristici di interesse. Questo è stato fatto con il codice Matlab "Curva.m", uno script che prevede in input:

- 1) I file della prova di trazione
- 2) Il file temp dell'acquisizione dei fotogrammi ottenuti dalla misurazione DIC
- 3) Il file data generato con lo scrip precedente

Del file generato dalla macchina di trazione, risultano di nostro interesse, solo la colonna inerente al tempo e quella del carico nominale, registrato dalla cella di carico.

Il codice è suddiviso in cinque parti per facilitarne la lettura: la prima parte serve per importare i dati della misurazione DIC e dalla macchina di trazione. La seconda parte chiamata "Matrice Dati", estrapola l'andamento della forza e delle deformazioni andando a sincronizzare i tempi delle due acquisizioni. Come detto nel capitolo 2.6, le due prove presentano un certo sfasamento temporale, con questa parte di codice, si vanno quindi a sincronizzare i due grafici, interpolando i punti delle curve forza e deformazione.

```
%% MATRICE DATI
data=A.data;
[dimensioneriga,dimensionecolonna]=find(data(:,<0); %elimino
valori minori di zero
data(dimensioneriga,:)=[];
[N_misure,N_colonne] = size(data);
zero_standard_force = data(1:length(data),4) - data(1,4);% diff.
valori standard force trazione
time_sigma = data(1:length(data),1) - data(1:1); %i valori test
time trazione
i = 1;
zero_strain = eps_x(i:length(eps_x)) - eps_x(i); % pone lo zero
zero_strainy = eps_y(i:length(eps_y)) - eps_y(i);
numeri = numeri(i:length(numeri));
numeri = numeri';
time_strain = B(numeri,2) - B(i,2)
```

```
%Interpolazione
```

```
N_punti = data(end,1)/(data(end,1)+10000);
```

```
time = [0:N_punti:data(end,1)]';
```

```
interp_strain =  
interp1(time_strain,zero_strain,time,'linear','extrap');
```

```
interp_strainy =  
interp1(time_strain,zero_strainy,time,'linear','extrap');
```

```
interp_force =  
interp1(time_sigma,zero_standard_force,time,'linear','extrap');
```

La terza parte, chiamata "CALCOLO SIGMA - EPSILON ingegneristica e vera", tratta del calcolo della σ e della ϵ vere e ingegneristiche; tramite queste informazioni si risale inoltre al modulo di Young e il coefficiente di Poisson. L'input di questa sezione è dato dai valori di larghezza e spessore del provino analizzato (a_0 e b_0), il codice di seguito riporta:

```
epsilon_vera = interp_strain; %calcolata nella sezione precedente
```

```
epsilon = exp(epsilon_vera)-1; %formula in letteratura
```

```
sigma = interp_force/(a0*b0); %forza/area
```

```
sigma_vera=sigma.*(epsilon+1); %formula in letteratura
```

```
%Coefficiente di poisson
```

```
ni = -eps_y./eps_x; %formula coefficiente v
```

```
ni = mean(ni(15:55)); %da cambiare dov'è costante il coeff.  
Poisson
```

```
Young_modulus_ris = []; %crea valore vuoto
```

```
for i = 1:8 %misura 8 valori nel tratto indicato e
```

```
    index=find(epsilon>i*0.00001 & epsilon<(i*0.00001+0.003) &  
    sigma>0.2); %da sostituire per individuare tratto elastico,  
    sigma limita
```

```
    eps_linear=epsilon(index); sigma_linear=sigma(index);
```

```
    linearCoefficients = polyfit(eps_linear, sigma_linear, 1);  
    %trova I coeff. del polinom(eps) grado 1 che meglio fitta  
    sigma_linear
```

```
    Young_modulus = linearCoefficients(1,1);
```

```
    Young_modulus_ris(i) = Young_modulus; %scrive 8 moduli di Young
```

```
end
```

```
Young_modulus = mean(Young_modulus_ris); %media dei moduli di  
young trovati
```

Dello script riportato se ne vanno ora a specificare alcuni punti salienti. Oltre alle ovvie formulazioni matematiche per il calcolo di tensioni, deformazioni e parametri ingegneristici, il codice utilizza accorgimenti fondamentali per realizzare risultati attendibili.

Nel calcolo del coefficiente di Poisson, rapporto negativo tra le deformazioni y e x , viene considerato soltanto l'intervallo dove il coefficiente viene rilevato costante. Prendendo ad esempio il provino A_0_1, ν assume il seguente andamento [Figura 4.4]

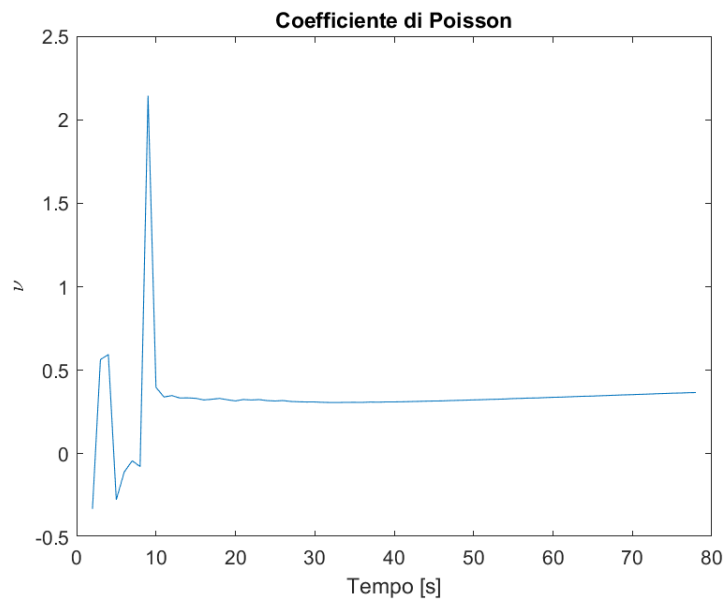


Figura 4.4: Grafico con andamento del coefficiente di Poisson ne tempo, stazionario tra i 15-55 sec

Come si vede questo rapporto giunge a convergenza dopo qualche istante, in quanto le deformazioni nei primi secondi tendono ancora ad avere andamenti non perfettamente lineari. L'intervallo selezionato in questo caso è tra 15 e 55 sec. Di questi valori ne viene poi effettuata una media, fino a trovare il valore definitivo di ν .

Altra accortezza viene fatta per il calcolo del modulo di Young, che segue un ragionamento simile. Nel primo tratto lineare della curva σ - ϵ , il valore E funge da legame costitutivo tra tensioni e deformazioni, partendo da questo presupposto, viene ricercato, tramite il comando "polyfit", il coefficiente lineare del polinomio di primo grado, $\epsilon^1 \cdot E$, che meglio ricalca l'andamento di σ . Di fatti nel primo tratto della curva vale la legge di Hooke $\sigma = \epsilon \cdot E$. Si introduce un ciclo *for* per andare a trovare almeno otto valori in un range prestabilito, per effettuarne una media e individuare il modulo di Young del materiale.

Tabella 4-1: Moduli di taglio calcolati con ciclo "for" su otto punti. Valori costanti denotano un tratto di analisi opportunamente scelto

| E ₁ | E ₂ | E ₃ | E ₄ | E ₅ | E ₆ | E ₇ | E ₈ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 14885 Mpa | 14863 Mpa | 14835 Mpa | 14815 Mpa | 14802 Mpa | 14789 Mpa | 14776 Mpa | 14756 Mpa |

Questi sono i valori ricavati dalle otto misurazioni lungo la curva, la loro media darà il modulo di Young del materiale A: E_A = 14815 Mpa.

Lo script consente inoltre di graficare gli andamenti delle tensioni e delle deformazioni vere ed ingegneristiche così da confrontarle e renderle esportabili per future analisi.

4.4. Normativa ASTM D-3518

Per il calcolo del modulo di taglio G, si è fatto ricorso alle indicazioni riportate dalla normativa ASTM D-3518 "Standard Test Method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by Tensile Test of a ±45° laminate".

La norma propone le linee guida, per andare a studiare, il comportamento di un materiale composito, costituito da una matrice polimerica, con fibre inclinate a 45°. Partendo dalle misurazioni tramite prova di trazione, misurata con metodo DIC, la D-3518 propone il calcolo del modulo di taglio come segue:

$$G_{12} = \frac{\Delta\tau_{12}}{\Delta\gamma_{12}} \quad (4.1)$$

Nella formula (4.1) viene indicato il modulo di taglio come: il rapporto tra la differenza dello sforzo di taglio, calcolato tra due punti deformati a taglio, e la deformazione a taglio tra gli stessi due punti. Per il calcolo di τ_{12} , la norma impone di usare la seguente relazione:

$$\tau_{12} = \frac{P}{2A} \quad (4.2)$$

Nella (4.2) con P si intende il carico massimo [N] sul punto, A è invece l'area della sezione trasversale, data dal prodotto tra spessore e larghezza del provino.

La deformazione a taglio γ viene calcolata come segue:

$$\gamma_{12} = \epsilon_x - \epsilon_y \quad (4.3)$$

Nella (4.3) con ϵ_x si intende la deformazione longitudinale e con ϵ_y la deformazione trasversale.

Le considerazioni appena viste trovano corrispondenza, andando ad osservare i cerchi di Mohr dello stato tensionale e delle deformazioni, che si vengono a generare in una prova di trazione monoassiale. [Figura 4.5]

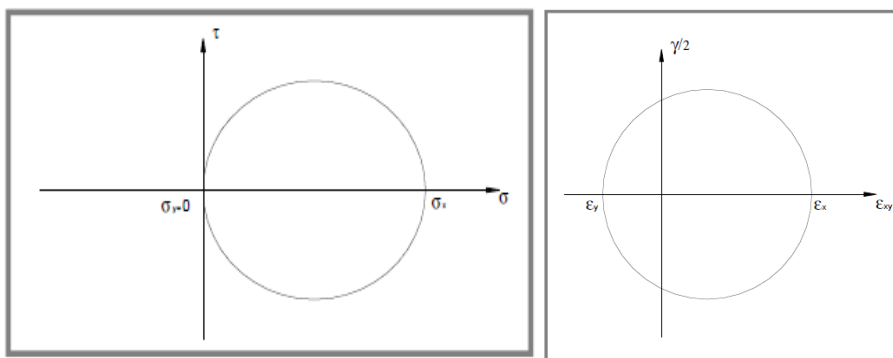


Figura 4.5: Cerchi di Mohr per un provino sottoposto a trazione monoassiale, a sinistra il cerchio per lo stato tensionale, a destra quello per lo stato delle deformazioni

La prima considerazione dalle tensioni, è che il valore massimo dello sforzo a taglio è dato dal raggio del cerchio. Questo è uguale alla metà del valore di σ_x , che a sua volta, è definito dal carico nominale fratto l'area del provino. Questo ragionamento riporta esattamente alla (4.2).

Nel cerchio delle deformazioni, invece, si vede come la deformazione a taglio, per una prova di trazione monoassiale, sia pari al raggio della circonferenza, quindi alla metà della differenza tra le due deformazioni longitudinali e trasversali, proprio come descritto dalla (4.3).

Le equazioni descritte in questo capitolo consentono di andare a ricavare il modulo di taglio del materiale. Si andrà quindi ad implementare lo script, in modo da generare come output anche G_{12} , in modo da avere una caratterizzazione completa del materiale. Di seguito viene riportata la tabella con i parametri ingegneristici calcolati per i materiali A e B.

Tabella 4-2: Riepilogo parametri ingegneristici materiale A e B

| | E | G | ν |
|-------------|----------|---------|-------|
| MATERIALE A | 1481 MPa | 260 MPa | 0.32 |
| MATERIALE B | 2261 MPa | 395 MPa | 0.24 |

5. Acquisizioni della geometria reale

5.1. Ricerca della geometria reale

Da precedenti studi fatti su questi centratori, era emerso, come risultato, una rigidità del materiale perfettamente simmetrica. Dall'esperienza e dalla letteratura sappiamo che questo non è il comportamento reale del centratore e, per questo, ci si è interrogati su quali potessero essere le discrepanze tra il modello ideale realizzato e l'effettivo comportamento.

Come prima causa si è pensato ad una difformità tra la geometria ideale ricercata e quella effettivamente prodotta con il processo di termoformatura. Il modello CAD [Figura 5.1] si basa di fatti su misurazioni ideali, esenti da tolleranze, che ricreano un centratore perfettamente assialsimmetrico, in quanto realizzato come rivoluzione dell'onda di sezione intorno all'asse centrale, giustificando il comportamento riscontrato nel modello precedentemente realizzato.

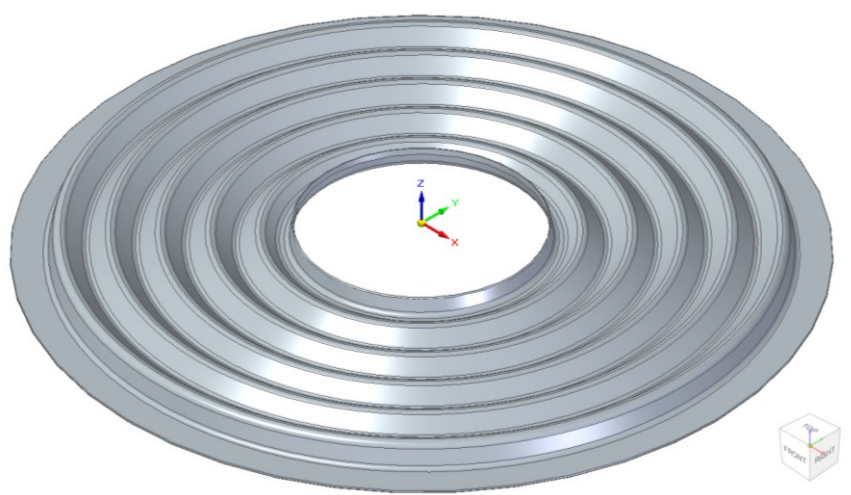


Figura 5.1: Vista isometrica del centratore CAD realizzato per rivoluzione del profilo

Il primo step è stato dunque quello di misurare manualmente possibili differenze tra il “centratore_CAD” e alcuni centratori reali.

Usando un software di visualizzazione 3D, è stato quotato l'elemento ideale andando a misurare in particolare tre parametri caratteristici quali:

- 1) I raggi di curvatura delle creste e delle valli
- 2) La distanza tra le creste e le valli
- 3) L'altezza delle creste e delle valli a partire dal piano

Nelle possibili differenze tra il modello ideale e reale, si è pensato subito alla possibilità di non riuscire, per diversi motivi, a ricreare con precisione gli avvallamenti tramite processo di stampaggio. Questi parametri vanno di fatti a caratterizzare interamente le gole e le creste dell'onda del centratore. Viene riportata di seguito una tabella riepilogativa delle misurazioni effettuate sulla geometria CAD e un'immagine indicativa del processo di quotatura.[Figura 5.2]

Tabella 5-1: Riepilogo dei dati ricavati dalla quotatura del disegno CAD del centratore. Riportano le tre misurazioni caratteristiche: curvatura, distanza, altezza delle creste e delle valli del profilo

| | Curvatura CAD | Distanza CAD | Altezza CAD |
|-------|---------------|--------------|-------------|
| Crete | R=1,13mm | 7,15mm | 4,03mm |
| Valli | R=1,13mm | 7,15mm | 1,59mm |

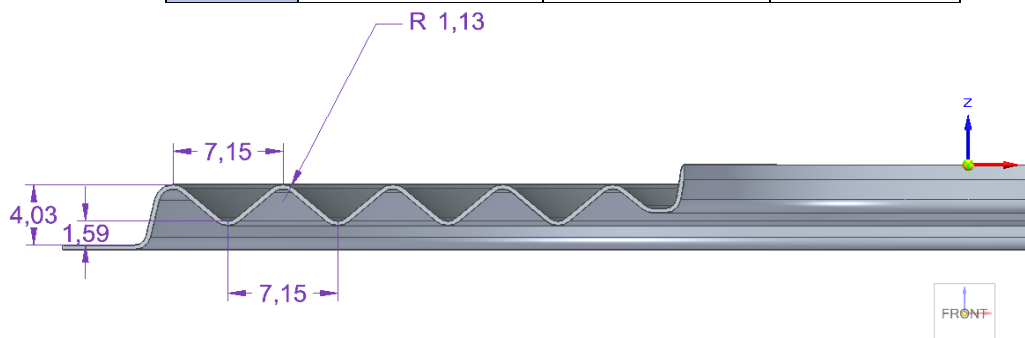


Figura 5.2: Sezione frontale del centratore CAD con quotatura delle grandezze caratteristiche del profilo

Dato che sarà la superficie superiore ad essere acquisita tramite la scansione ottica, si è ritenuto opportuno effettuare le misurazioni rispetto a questa e non al profilo interno.

La particolare geometria del pezzo non permette però un'agevole misurazione, quindi si è sfruttata la nuvola di punti acquisita nel processo con lo scanner ottico e su di quella si sono svolte le medesime misurazioni per maturarne un confronto.

5.2. Acquisizione con Scanner Ottico

Tramite l'attrezzatura presente nel laboratorio di Reverse Engineering del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche si sono quindi scansionati i centratori al fine di ottenerne la geometria reale.

Lo scanner in dotazione all'università è il Go!SCAN 3D, questa è la versione manuale, compatta per poter effettuare scansioni ad altissima precisione senza contatto.[Figura 5.3]



Figura 5.3: Rappresentazione dello scanner Go!SCAN 3D in dotazione al laboratorio di Reverse Engineering dell'Università Politecnica delle Marche

Di seguito ne vengono elencate le caratteristiche al fine di giustificare la bontà della scansione e la sua affidabilità.

Tabella 5-2: Riepilogo delle caratteristiche dello scanner Go!SCAN 3D utilizzato

| | |
|--------------------------------|-------------------------|
| Accuratezza | Fino a 0.05 mm |
| Accuratezza volumetrica | 0.05 mm+0.150 mm/m |
| Risoluzione | 0.100 mm |
| Velocità di misurazione | 1500000 misurazioni/sec |
| Range di dimensioni componenti | 0.1 - 4 m |

Il processo di acquisizione si basa sull'emissione da parte dello scanner di fasci di luce intermittenti che, catturando la rifrazione dell'oggetto tramite il comparto sensoristico, individuano la superficie bersaglio.

Il vantaggio di questo strumento, rispetto ad altre tecnologie di reversal engineering, è il fatto di essere particolarmente intuitivo nell'utilizzo in quando il software assiste costantemente l'utilizzatore durante tutto il processo di acquisizione. Il manico dello scanner, ad esempio, presenta led luminosi che cambiano colore dal verde al rosso, in base alla corretta inclinazione e vicinanza al componente. Per la sua affidabilità, velocità di misurazione e facilità di utilizzo, è stata quindi la scelta migliore per i nostri scopi.

Il set-up della macchina è immediato e veloce: si posiziona su un piano una lastra con dei target al fine di individuare un piano di riferimento per lo scanner. [Figura 5.4]



Figura 5.4: Tavola nera, marcata con target bianchi, utilizzata per la calibrazione dello scanner e come piano di appoggio per la scansione dei centrotori

Si passa quindi alla taratura della macchina andando ad inquadrare i target con inclinazioni differenti dello scanner.

Svolta l'analisi spaziale si può passare quindi alla scansione del componente. Per far sì che il centratore potesse essere scansionato in modo più pratico, è stato appoggiato su di un tassello circolare in acciaio e posizionato sulla tavola. La scansione viene fatta al massimo dell'accuratezza, andando ad acquisire la nuvola di punti rappresentativa della superficie esterna del centratore; per portare un esempio, per rappresentare la superficie del centratore A vengono utilizzati 604229 triangoli.

Come visibile nell'immagine [Figura 5.5] il processo di acquisizione, viene sempre coadiuvato dal software "VX element", che consente di visualizzare in tempo reale il risultato della scansione, in modo tale da individuare subito possibili zone non correttamente rilevate. Di fatti mediante più "passate" dello scanner si possono di volta in volta acquisire più punti così da poter correggere zone lacunose e andare a colmare tutte le possibili zone vuote.

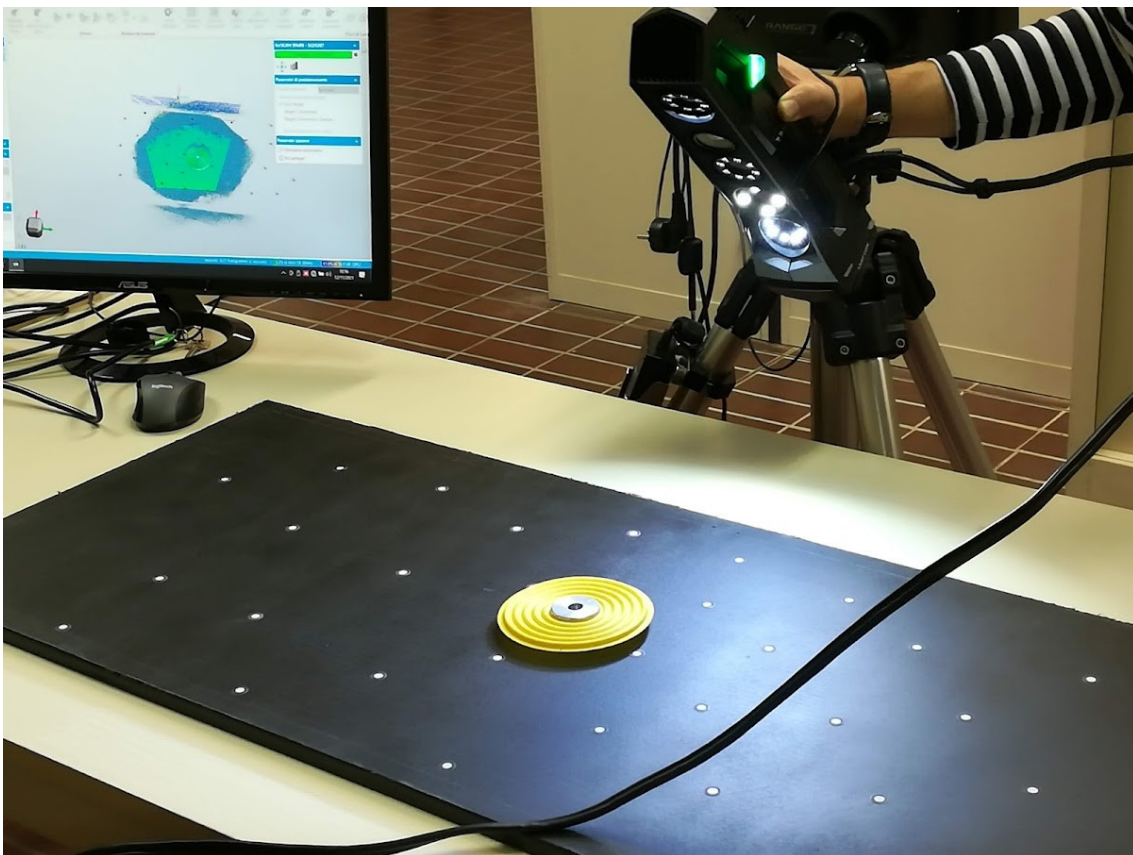


Figura 5.5: Processo di acquisizione della scansione su di un centratore

Il risultato che si ottiene, dopo l'ottimizzazione dell'immagine effettuata dal programma di acquisizione, è una nuvola di punti in formato .stl rappresentate l'intera geometria del pezzo.

5.3. Elaborazione nuvola di punti

Per poter inserire la geometria reale all'interno del modello di ABAQUS e poter effettuare misurazioni geometriche per confrontarle con il modello CAD, si deve passare da una nuvola di punti ad una superficie.

Questo processo è stato interamente realizzato su CatiaV5 che presenta moduli sia per la gestione di file .stl, che di reverse engineering per la modellatura di superfici a partire da una nuvola di punti.

La situazione di partenza era quindi quella riportata in figura [Figura 5.6] dove si possono vedere i singoli nodi generare la forma del centratore.

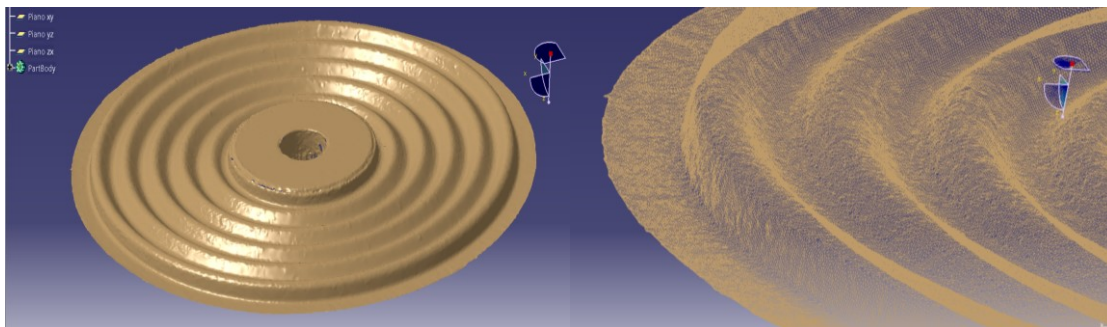


Figura 5.6: A sinistra nuvola di punti acquisita dalla scansione, a destra dettaglio della nuvola con focus sulla densità dei nodi

L'immagine è stata per prima cosa importata nel software tramite il modulo "Shape/Digitalized Shape Editor". Naturalmente non è stata in alcuno modo alterata la distribuzione dei punti mantenendo scale 1:1 e acquisendo tutti i punti.

Questo modulo consente immediatamente di lavorare con la nuvola e di andare a selezionare tutte le aree non utili, come il cilindro in acciaio presente nel centro del centratore, usato in fase di acquisizione della scansione. Pulito quindi dei punti superflui, si è ottimizzata la nuvola andando a rimuovere tutti i punti al di fuori del piano del centratore, andando ad eliminare o congiungere o spezzare, là dove necessario, i lati dei triangoli della mesh problematici. Questo passaggio è stato fondamentale in quanto, in

fase di generazione della superficie, il programma mostrava molta difficoltà nel ricreare la geometria, finendo sempre per interrompere il processo. La pulizia della mesh è stata effettuata anche attraverso il comando “Mesh Cleaner” che ha permesso di andare a risolvere problematiche come vertici e lati non-manifold, triangoli isolati e angoli troppo ridotti. [Figura 5.7]

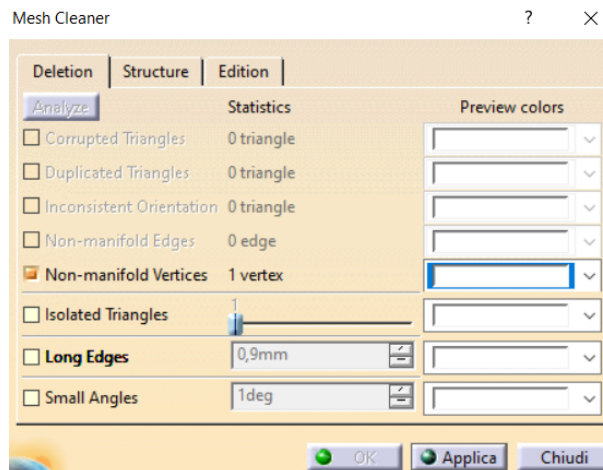


Figura 5.7: Interfaccia grafica di CatiaV5 per la riparazione della mesh

La rielaborazione della mesh è stato un passo cruciale, più volte ripetuto andando a riparare mano a mano tutte le imperfezioni assicurandosi di non modificare la geometria e non falsare l’acquisizione.

Pulita quindi di ogni imperfezione, la mesh è stata spostata nel modulo “Shape/Quick Surface Reconstruction” dove, tramite il comando “Automatic Surface” è stata creata la superficie riportata in figura. [Figura 5.8]

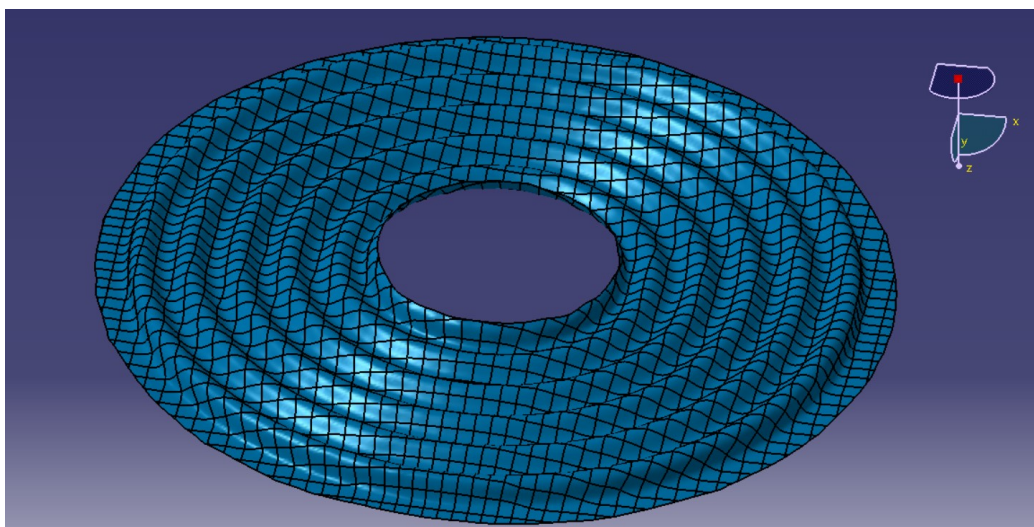


Figura 5.8: Superficie del centratore B realizzata tramite CatiaV5

La superficie così realizzata ricalca in modo estremamente preciso la nuvola di punti tanto che, anche sul centratore B, con uno spessore minore rispetto a gli altri, ma una trama più fitta, rimane sensibile alle variazioni imposte dalla matrice polimerica.[Figura 5.9]

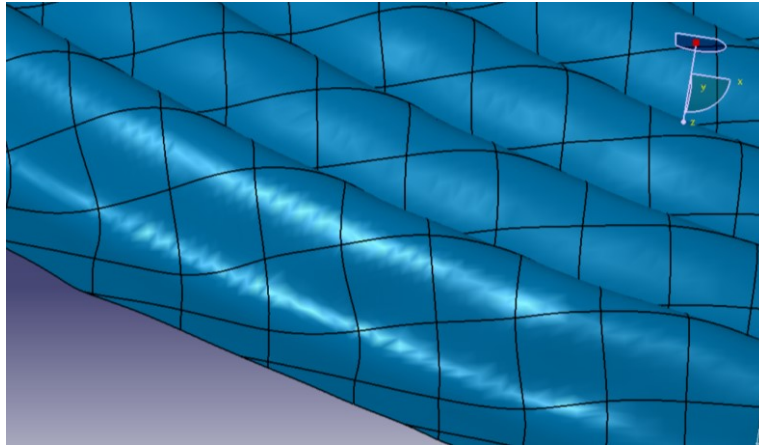


Figura 5.9: Dettaglio della superficie del centratore B realizzata con CatiaV5

Tale risultato è stato ottenuto andando ad impostare 7000 superfici, generate tramite regular stream lines, imponendo un discostamento minimo di 0,02 mm. La superficie così ottenuta è poi stata convertita in un file .stp, estensione universale per l'interscambio dati dei programmi 3D e leggibile dal software ABAQUS. Settare il numero di superfici ottimale è stato quindi un passaggio iterativo, si è aumentato il numero di elementi, in modo progressivo, per ottenere l'andamento più fedele possibile, valutando come il programma riuscisse a ricalcare l'oggetto. Quindi in base alla qualità della trama del centratore, alla sua densità e allo spessore, si è scelto di aumentare questo parametro, per ottenere il risultato più aderente possibile.

6. Confronto geometria CAD e superficie acquisita

6.1. Quotatura dei centratori reali

La geometria ricavata dalla scansione in formato .step è stata importata nel visualizzatore 3D SolidEdge per essere misurata e quotata.

Essendo il centratore CAD realizzato per rivoluzione del profilo ondulato, è bastato effettuare la quotatura in un qualsiasi punto della rivoluzione, al fine di conoscere le dimensioni dell'intera geometria. Questo non è stato sufficiente per i centratori reali, in quanto la non simmetria della geometria, non consente tale semplificazione.

Per andare quindi ad indagare le dimensioni in vari punti della geometria, si è pensato di andare ad effettuare la quotatura dei centratori su due diametri caratteristici: si è scelto quindi di sezionare il centratore con piani rispettivamente XZ e YZ. Tramite l'intersezione della geometria e il piano di sezione, sono state individuate le curve rappresentanti l'andamento della superficie nei quattro diametri. [Figura 6.1]

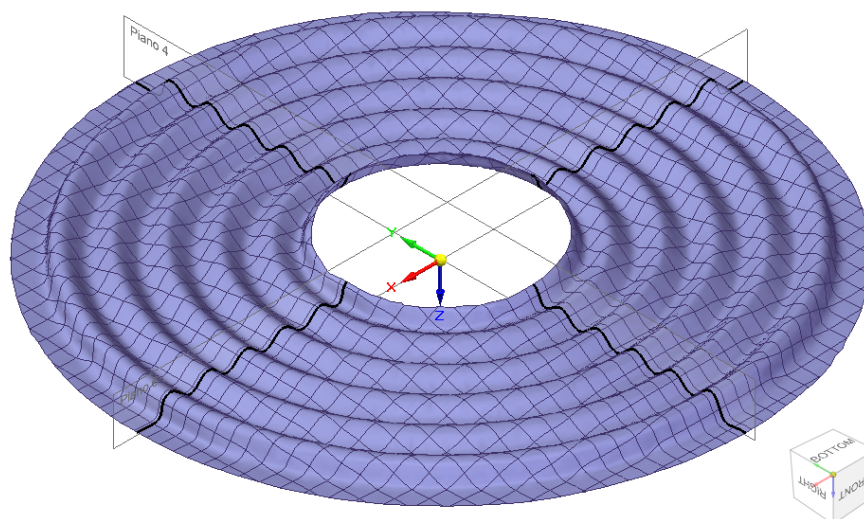


Figura 6.1: Individuazione dei piani di taglio e dei profili quotati del centratore A

Il passaggio da superficie a curva è stato molto utile per permettere al programma di calcolare automaticamente i raggi di curvatura.

Per andare invece a misurare le altezze delle creste e delle valli, e le distanze tra di esse, si è ricorsi ad un escamotage: il punto massimo di curvatura delle creste, e il minimo delle valli, vengono individuati tramite la tangente alla curva inclinata di 0° rispetto al piano XY; così facendo il programma riesce ad individuare i punti notevoli quali vertici e centri di curvatura e riuscire nella quotatura. Vengono riportate ora immagini solo inerenti al centratore A, precisando che le medesime procedure di misurazione sono state riproposte anche per il centratore B. [Figura 6.2]

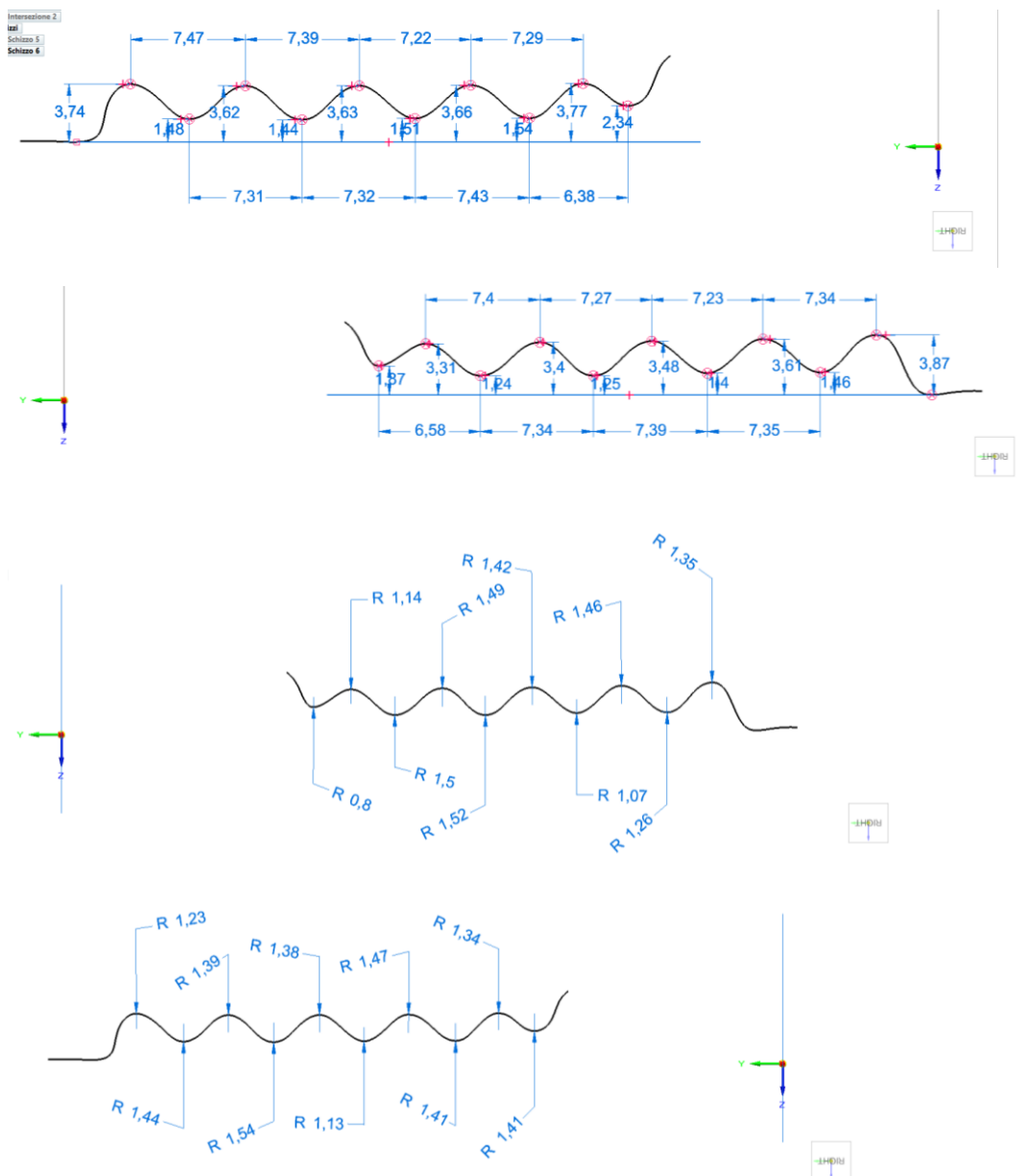


Figura 6.2: Processo di quotatura dei profili del centratore A, distanza, altezza, curvatura della geometria

Per ogni diametro sono state individuate una curva per la parte destra e la parte sinistra, quindi, per ogni sezione, vengono indagati due raggi. Si è pensato che, avere una media

dei valori presi su più punti, invece di una singola misurazione, avrebbe di sicuro portato ad un valore più attendibile nel confronto diretto con la geometria CAD.

6.2. Confronto misurazioni centratore CAD, centratore A e centratore B

Nel corso della quotatura dei centrori reali, spesso si è incontrata una distribuzione non molto costate dei valori indagati. Questo ha confermato l'idea che la superficie non avesse un andamento costante, non solo in tutta l'onda della sezione, ma anche tra le singole creste e le singole valli ruotate di 90°, la geometria non presenta di fatti una significativa ricorrenza.

Vengono ora riportate le tabelle riepilogative delle singole misurazioni per il centratore A.

Tabella 6-1: Riepilogo della quotatura del centratore A: altezza creste

| Centratore A misurazione altezza creste | | | | | | | |
|---|----|------------------|----|----------------|----|------------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | |
| 3,37 | mm | 3,75 | mm | 3,74 | mm | 3,87 | mm |
| 3,51 | mm | 3,7 | mm | 3,62 | mm | 3,61 | mm |
| 3,35 | mm | 3,62 | mm | 3,63 | mm | 3,48 | mm |
| 3,32 | mm | 3,58 | mm | 3,66 | mm | 3,4 | mm |
| 3,3 | mm | 3,7 | mm | 3,77 | mm | 3,31 | mm |
| 3,37 | mm | 3,67 | mm | 3,684 | mm | 3,534 | mm |

Tabella 6-2: Riepilogo della quotatura del centratore A: altezza valli

| Centratore A misurazione altezza valli | | | | | | | |
|--|----|------------------|----|----------------|----|------------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | |
| 1,36 | mm | 1,47 | mm | 1,48 | mm | 1,46 | mm |
| 1,23 | mm | 1,5 | mm | 1,44 | mm | 1,4 | mm |
| 1,2 | mm | 1,47 | mm | 1,51 | mm | 1,25 | mm |
| 1,21 | mm | 1,5 | mm | 1,54 | mm | 1,24 | mm |
| 1,84 | mm | 2,13 | mm | 2,34 | mm | 1,87 | mm |
| 1,368 | mm | 1,614 | mm | 1,662 | mm | 1,444 | mm |

Tabella 6-3: Riepilogo della quotatura del centratore A: distanza creste

| Centratore A misurazione distanza creste | | | | | | | |
|--|----|------------------|----|----------------|----|------------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione Destra | | Sezione sinistra | | Sezione Destra | | Sezione sinistra | |
| 7,51 | mm | 7,25 | mm | 7,47 | mm | 7,31 | mm |
| 7,32 | mm | 7,41 | mm | 7,39 | mm | 7,23 | mm |
| 7,23 | mm | 7,44 | mm | 7,22 | mm | 7,27 | mm |
| 7,34 | mm | 7,31 | mm | 7,29 | mm | 7,4 | mm |
| 7,35 | mm | 7,3525 | mm | 7,3425 | mm | 7,3025 | mm |

Tabella 6-4: Riepilogo della quotatura del centratore A: distanza valli

| Centratore A misurazione distanza valli | | | | | | | |
|---|----|------------------|----|----------------|----|------------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione Destra | | Sezione sinistra | | Sezione Destra | | Sezione sinistra | |
| 7,26 | mm | 7,39 | mm | 7,31 | mm | 7,35 | mm |
| 7,32 | mm | 7,22 | mm | 7,32 | mm | 7,39 | mm |
| 7,43 | mm | 7,27 | mm | 7,43 | mm | 7,34 | mm |
| 6,59 | mm | 6,76 | mm | 6,38 | mm | 6,58 | mm |
| 7,15 | mm | 7,16 | mm | 7,11 | mm | 7,165 | mm |

Tabella 6-5: Riepilogo della quotatura del centratore A: curvatura creste

| Centratore A raggi di curvatura creste | | | | | | | |
|--|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 1,22 | mm | 1,25 | mm | 1,35 | mm | 1,23 | mm |
| 1,48 | mm | 1,59 | mm | 1,46 | mm | 1,39 | mm |
| 1,2 | mm | 1,4 | mm | 1,42 | mm | 1,38 | mm |
| 1,61 | mm | 1,47 | mm | 1,49 | mm | 1,47 | mm |
| 1,15 | mm | 1,37 | mm | 1,14 | mm | 1,34 | mm |
| 1,332 | mm | 1,416 | mm | 1,372 | mm | 1,362 | mm |

Tabella 6-6: Riepilogo della quotatura del centratore A: curvatura valli

| Centratore A raggi di curvatura valli | | | | | | | |
|---------------------------------------|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 1,51 | mm | 1,37 | mm | 1,26 | mm | 1,44 | mm |
| 1,32 | mm | 1,61 | mm | 1,07 | mm | 1,54 | mm |
| 1,44 | mm | 1,16 | mm | 1,52 | mm | 1,13 | mm |
| 1,63 | mm | 1,58 | mm | 1,15 | mm | 1,41 | mm |
| 1,11 | mm | 1,3 | mm | 0,8 | mm | 1,41 | mm |
| 1,402 | mm | 1,404 | mm | 1,16 | mm | 1,386 | mm |

Per il centratore B sono stati utilizzati gli stessi parametri di indagine e allo stesso modo se ne riportano i risultati raccolti in tabella:

Tabella 6-7: Riepilogo della quotatura del centratore B: altezza creste

| Centratore B misurazione altezza creste | | | | | | | |
|---|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 3,79 | mm | 3,77 | mm | 3,71 | mm | 3,75 | mm |
| 3,69 | mm | 3,73 | mm | 3,6 | mm | 3,62 | mm |
| 3,69 | mm | 3,72 | mm | 3,54 | mm | 3,56 | mm |
| 3,71 | mm | 3,72 | mm | 3,55 | mm | 3,57 | mm |
| 3,69 | mm | 3,72 | mm | 3,53 | mm | 3,6 | mm |
| 3,714 | mm | 3,732 | mm | 3,586 | mm | 3,62 | mm |

Tabella 6-8: Riepilogo della quotatura del centratore B: altezza valli

| Centratore B misurazione altezza valli | | | | | | | |
|--|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 1,55 | mm | 1,52 | mm | 1,43 | mm | 1,5 | mm |
| 1,56 | mm | 1,57 | mm | 1,42 | mm | 1,42 | mm |
| 1,59 | mm | 1,62 | mm | 1,43 | mm | 1,44 | mm |
| 1,66 | mm | 1,67 | mm | 1,47 | mm | 1,51 | mm |
| 2,29 | mm | 2,35 | mm | 2,1 | mm | 2,27 | mm |
| 1,73 | mm | 1,746 | mm | 1,57 | mm | 1,628 | mm |

Tabella 6-9: Riepilogo della quotatura del centratore B: distanza creste

| Centratore B misurazione distanza creste | | | | | | | |
|--|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 7,37 | mm | 7,52 | mm | 7,42 | mm | 7,52 | mm |
| 7,37 | mm | 7,28 | mm | 7,37 | mm | 7,34 | mm |
| 7,36 | mm | 7,41 | mm | 7,33 | mm | 7,34 | mm |
| 7,26 | mm | 7,42 | mm | 7,3 | mm | 7,36 | mm |
| 7,34 | mm | 7,4075 | mm | 7,355 | mm | 7,39 | mm |

Tabella 6-10: Riepilogo della quotatura del centratore B: distanza valli

| Centratore B misurazione distanza valli | | | | | | | |
|---|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| Piano XZ | | | | Piano YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 7,34 | mm | 7,37 | mm | 7,34 | mm | 7,34 | mm |
| 7,34 | mm | 7,34 | mm | 7,32 | mm | 7,34 | mm |
| 7,38 | mm | 7,32 | mm | 7,38 | mm | 7,3 | mm |
| 6,67 | mm | 6,58 | mm | 6,63 | mm | 6,55 | mm |
| 7,1825 | mm | 7,1525 | mm | 7,1675 | mm | 7,1325 | mm |

Tabella 6-11: Riepilogo della quotatura del centratore B: curvatura creste

| Centratore B curvatura creste | | | | | | | |
|-------------------------------|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| XZ | | | | YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 1,39 | mm | 1,51 | mm | 1,25 | mm | 1,89 | mm |
| 1,5 | mm | 1,48 | mm | 1,39 | mm | 1,52 | mm |
| 1,51 | mm | 1,25 | mm | 1,54 | mm | 1,51 | mm |
| 1,22 | mm | 1,27 | mm | 1,27 | mm | 1,3 | mm |
| 1,66 | mm | 1,57 | mm | 1,5 | mm | 1,33 | mm |
| 1,456 | mm | 1,416 | mm | 1,39 | mm | 1,51 | mm |

Tabella 6-12: Riepilogo della quotatura del centratore B: curvatura creste

| centratore B curvatura creste | | | | | | | |
|-------------------------------|----|----------------|----|------------------|----|----------------|----|
| XZ | | | | YZ | | | |
| Sezione sinistra | | Sezione destra | | Sezione sinistra | | Sezione destra | |
| 1,24 | mm | 1,24 | mm | 1,44 | mm | 1,21 | mm |
| 1,42 | mm | 1,63 | mm | 1,42 | mm | 1,26 | mm |
| 1,27 | mm | 1,47 | mm | 1,32 | mm | 1,52 | mm |
| 1,33 | mm | 1,56 | mm | 1,41 | mm | 1,2 | mm |
| 0,91 | mm | 0,88 | mm | 0,96 | mm | 0,89 | mm |
| 1,234 | mm | 1,356 | mm | 1,31 | mm | 1,216 | mm |

Nelle tabelle riportate l'ultima riga presenta la funzione "media" dei valori precedenti, andando ad individuare quattro valori per ogni diametro. Per ogni misurazione effettuata si è quindi ricavato il valore medio, così da poterci porre in condizioni di confronto con la geometria CAD. I risultati del confronto tra Centratore A, Centratore B e Centratore CAD, sono riportati nella seguente tabella.

Tabella 6-13: Confronto valori medi per i centratori A, B e centratore CAD

| | Curvatura Media | Distanza Media | Altezza Media |
|-----------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| Creste A | 1,371 (1,13) | 7,337 (7,15) | 3,565 (4,03) |
| Valli A | 1,338 (1,13) | 7,146 (7,15) | 1,522 (1,59) |
| Creste B | 1,443 (1,13) | 7,373 (7,15) | 3,66 (4,03) |
| Valli B | 1,279 (1,13) | 7,159 (7,15) | 1,66 (1,59) |

L'osservazione che si può ricavare da questa analisi è che i valori ottenuti dalle geometrie scansionate, non ricalcano in maniera significativa i valori del modello CAD. L'indagine, quindi, avvalorata la tesi che, il modello cad tenda ad avere un andamento simmetrico della rigidità, in quanto caratterizzato da una geometria ideale. Il comportamento asimmetrico potrebbe quindi essere imputabile ad una geometria non fedelmente riprodotta in fase di stampaggio. Ha senso, perciò, ipotizzare che nella realtà i centratori abbiano un andamento non simmetrico, in quanto non perfettamente simmetrici. Da qui quindi la necessità di andare a realizzare sia un modello FEM basato sulla geometria CAD, sia un modello con le superfici ottenute dalle scansioni, così da generare un andamento più fedele della rigidità del centratore e confrontare la diversità tra la situazione ideale e quella reale.

7. Analisi agli elementi finiti tramite ABAQUS

7.1. Panoramica software

ABAQUS è un software per l'analisi agli elementi finiti prodotto da Dassault System. Tra la vastità di possibili studi effettuabili da questo programma, è stato di nostro interesse solo il modello "ABAQUS standard" per la modellazione di componenti sottoposti a carichi meccanici.

Per poter realizzare un modello fedele dei vari centratori, si faranno ricorso a tutte le informazioni finora ottenute quali:

1. Geometria reale dei centratori o geometria CAD
2. Utilizzo di un materiale ortotropo
3. Parametri ingegneristici del materiale (E , G , ν)

Questi parametri andranno utilizzati, nel corso della modellazione, all'interno dei vari moduli del programma, nello specifico all'interno del modulo Part e del modulo Materials.

Al fine di consentire una più lineare modellazione, il programma assiste l'utilizzatore tramite un albero logico [Figura 7.1], che guida passo passo nell'inserimento delle informazioni. Basta infatti modificare a cascata i moduli di interesse, così da ottenere un modello eseguibile esente da errori.

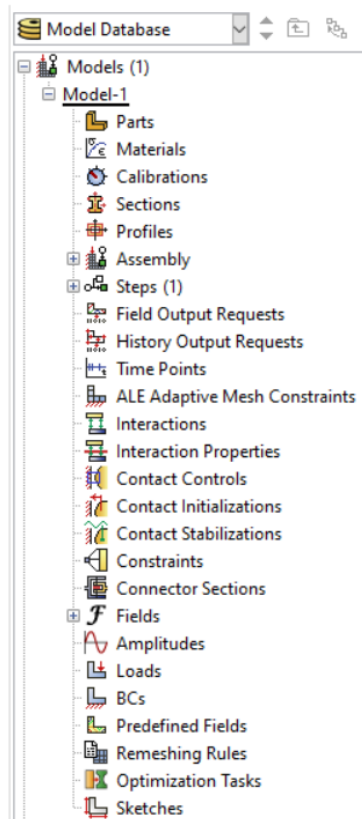


Figura 7.1: Albero logico di "ABAQUS" riportante i vari moduli da compilare per la simulazione

Nella nostra analisi sono stati di interesse, e quindi compilati, i seguenti moduli:

- Part: viene inserita la geometria e generata la mesh
- Property: modella il materiale e la sezione dell'oggetto
- Assembly: consente di integrare tra di loro più parts
- Step: vengono inseriti i vincoli e gestiti gli output del programma

Nel seguente capitolo si andrà a descrivere il processo logico sviluppato per l'analisi del centratore CAD, ricordando che questo varia dai modelli per i centratori reali solo per valori numerici quali: spessore e parametri ingegneristici del materiale. Questi verranno di volta in volta aggiornati al fine di avere un confronto tra il comportamento della geometria reale e del CAD nelle stesse condizioni.

7.2. Impostazione modello

Per generare il modello CAD, si è in primis inserita la geometria. Spostandoci poi sull'albero fino al ramo "sections" si è impostata la tipologia di sezione voluta; questo

equivale a specificare se l'elemento sarà un solido omogeneo, una membrana o un liquido. In questo step si è impostata una sezione "shell homogeneous", con lo spessore che andrà aggiornato in base a quale centratore staremo confrontando. Questa sezione può essere utilizzata quando l'oggetto presenta una dimensione, nel nostro caso lo spessore, significativamente più piccola rispetto alle altre. Il modello verrà quindi analizzato andando a considerare solo la superficie di riferimento [Figura 7.2], nel nostro caso quella superiore, e andando ad integrare la soluzione sullo spessore impostato dall'utente.

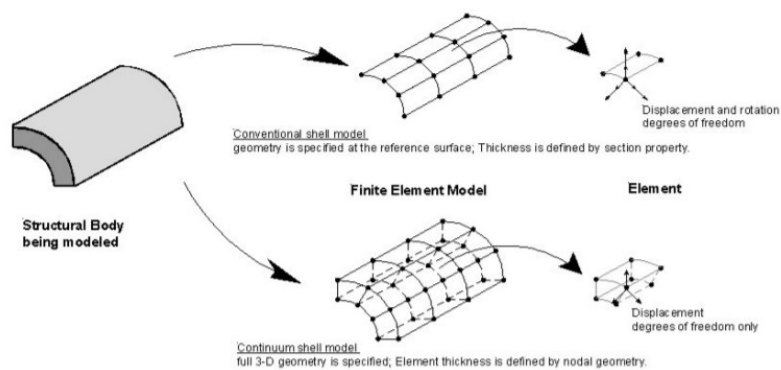


Figura 7.2: Rappresentazione del modello "Conventional Shell"

Si passa ora a definire la Mesh, nell'omonimo modulo, per andare a discretizzare il corpo dell'analisi. Per prima cosa si vanno a porre i seeds, ovvero i nodi che formeranno in seguito la mesh, andando a definirne la posizione e la distanza. Di quest'ultima, una dimensione minore porterà ad utilizzare un maggior numero di seeds per discretizzare l'oggetto infittendo la mesh. [Figura 7.3]

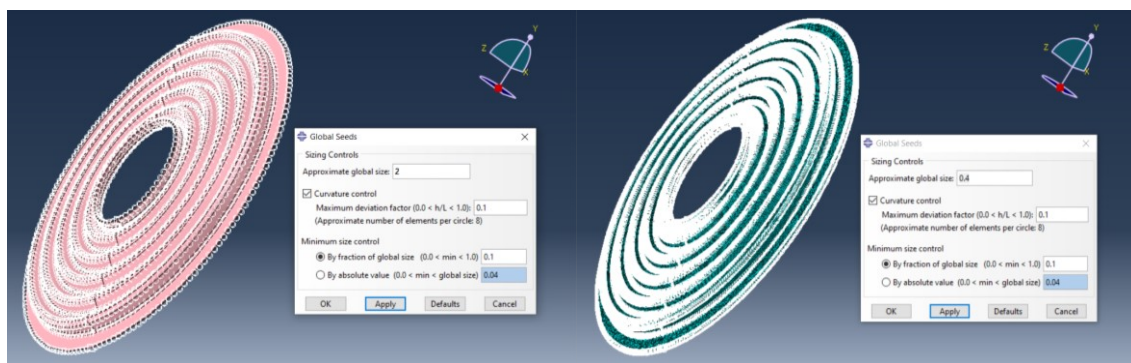


Figura 7.3: Confronto tra l'utilizzo, a sinistra, di una lunghezza tra i seeds di 2mm e, a destra, 0,4mm

Per scegliere quanti seeds posizionare, si è cercato di seguire la moda delle prove svolte sui centratori reali. Avendo visto che un risultato apprezzabile, sulle geometrie reali,

veniva raggiunto, per lunghezze del decimo di millimetro, si è cercato di avere una certa coerenza e discretizzare il centratore CAD con una lunghezza di 0,4. Interagendo infine tramite il tool Query, sono stati contati gli elementi e i nodi della nostra mesh:

- Total number of nodes: 220200
- Total number of elements: 220642
- 219758 linear quadrilateral elements of type S4R
- 884 linear triangular elements of type S3

La scelta della tipologia degli elementi, una volta scelta la geometria shell, viene imposta dal programma automaticamente. Gli elementi usati sono quindi triangoli e quadrilateri come riportati in figura [Figura 7.4]

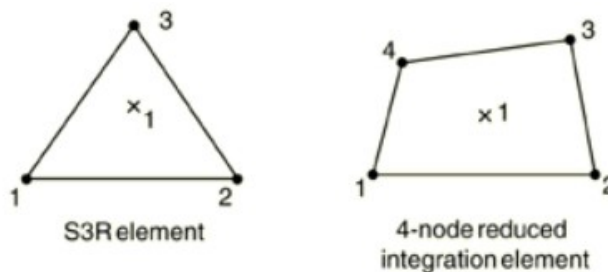


Figura 7.4: Elementi S3R e S4R usati per modellare la geometria Shell

Tramite le considerazioni fatte nel Capitolo 1.3, si è optato per modellare la tela come un materiale ortotropo, con isotropia trasversale. All'interno della finestra materiale, nella sezione Mechanical, sotto la voce Elasticity, è stato selezionato un materiale Elastic di tipo Lamina. Il software richiede dunque di inserire i valori per E_1 , E_2 , G_{12} , G_{13} , G_{23} , ν che nel nostro caso, sono valori variabili in base al materiale che andremo a confrontare con il modello reale.

Si passa ora all'inserimento della geometria nel modulo Assembly, anche se unico componente presente all'interno dello studio, il programma prevede di creare un insieme per proseguire nell'analisi. In questo modulo però si possono andare a definire una serie di sets, ovvero di punti notevoli, che ci aiuteranno in seguito nell'inserimento dei vincoli. Vengono quindi creati rispettivamente i sets CILINDRO e BORDO mostrati in figura [Figura 7.5], andando a raggruppare separatamente tutte le features sul bordo esterno, dove avviene il fissaggio del centratore al cestello, e tutte le features del cilindro interno, dov'è inserita la bobina.

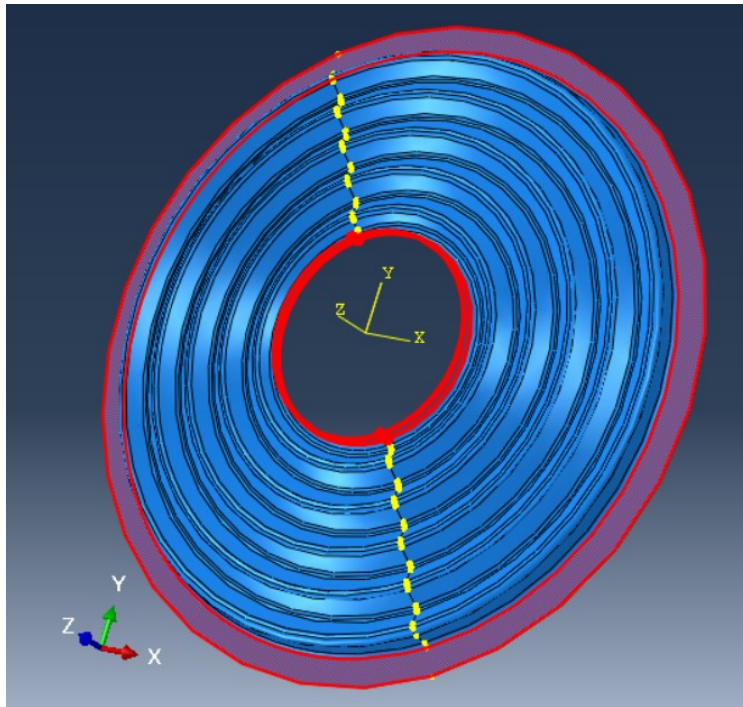


Figura 7.5: Geometria CAD del centratore con evidenziati i due "sets" realizzati BORDO e CILINDRO

Si possono quindi inserire i vincoli. Questi andranno a simulare le condizioni meccaniche in cui il centratore andrà a trovarsi: vengono impostati due diversi tipi di vincolo

1. Incollaggio: presente sul BORDO del centratore per vincolarlo al cestello
2. Spostamento: la movimentazione del CILINDRO a seguito dell'eccitazione della bobina

Il primo è quindi un vincolo meccanico, imposto dall'inizio della prova, che prevede un incastro geometrico sia di traslazione, che di rotazione. Il secondo invece, simula il movimento indotto dalla bobina eccitata che, con un'escursione massima di 12mm in direzione verticale, trascina il cilindro interno del centratore.

Quando si inserisce una condizione di spostamento, ABAQUS di default impone un ingresso a rampa, andando ad aumentare linearmente fino ad arrivare al valore impostato. Nel nostro caso, per rimanere più fedeli alla reale movimentazione del centratore, si è preferito generare un ingresso sinusoidale, in modo da indagare sia l'escursione in positivo che in negativo.

Il vincolo spostamento è stato quindi inserito nello step, appositamente creato, chiamato "Load". In questa fase, il programma, consente di andare a definire il tipo di carico, nel nostro caso un tipo "static", ma soprattutto andare a specificare se, in quello

step, si presenteranno o meno geometrie non lineari. Nel nostro caso è presente la non linearità dovuta ai grandi spostamenti, quindi si necessita di questa impostazione.

In una prima fase di realizzazione, il modello non considerava geometrie non lineari, quindi la risposta della simulazione era un andamento della forza perfettamente simmetrico, tra la fase di spostamento positiva e negativa. Questo è stato il primo sentore di allarme per la possibilità che, il modello CAD, fosse troppo ideale. Come spiegato più avanti, l'opzione "Nlgeom on" permetterà di correggere questo andamento, ma senza ancora avvicinarsi alle curve presenti in letteratura.

Con la creazione dello step "Load" si sono anche generati gli insiemi di output Field e History. Dei tanti parametri indagabili a noi serviranno solamente gli spostamenti e le forze di reazione nella parte di cilindro vincolata. Per l'acquisizione di tali dati si è introdotto un Time Points, così da discretizzare la prova in 400 step e ottenere più punti sui grafici, con meno interpolazione da parte del programma.

7.3. Analisi e risultati dei modelli

Impostato il modello si può avviare la simulazione che, in base alla densità della mesh, il numero di step imposti, impiegherà più o meno tempo nel calcolo.

Le mappe di spostamento così ottenute sono un ottimo primo modo per controllare la correttezza dello svolgimento della prova: la U3, infatti, identifica lo spostamento richiesto senza coinvolgere in alcun modo la parte incastrata al bordo.

Si passa quindi all'estrapolazione delle informazioni di interesse. Tramite il tool "XY Data", il software permette di organizzare dati in grafici x-y per l'esportazione come file di testo. Bisogna quindi ricavare le forze risultanti agenti sul CILINDRO, e andare a estrarre lo spostamento di uno di questi punti, sempre in direzione U3. Tramite il tool "operate on XYdata" sono state sommate, tramite formula $\text{sum}((A,A,...))$, le reaction force lungo Z, in modo da ottenere la reazione risultate, questa presenterà un andamento come in figura [Figura 7.6]. È giustamente sinusoidale in quanto risponde allo spostamento imposto.

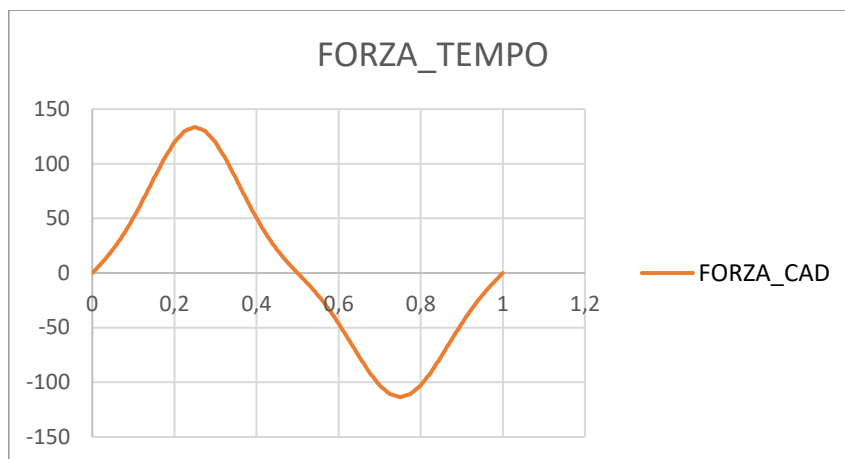


Figura 7.6: Grafico dell'andamento della forza applicata al CILINDRO interno del centratore CAD

Per arrivare poi a graficare l'andamento della forza in funzione dello spostamento, si è utilizzata la funzione combine (X, X). Questa funzione prende i valori sull'asse Y di una funzione, nel nostro caso la forza risultante, e li grafica con i valori sull'asse Y di un'altra, l'andamento dello spostamento del punto nel tempo. Questo consente di ottenere la classica curva a "esse" caratteristica dei centratori. [Figura 7.7]

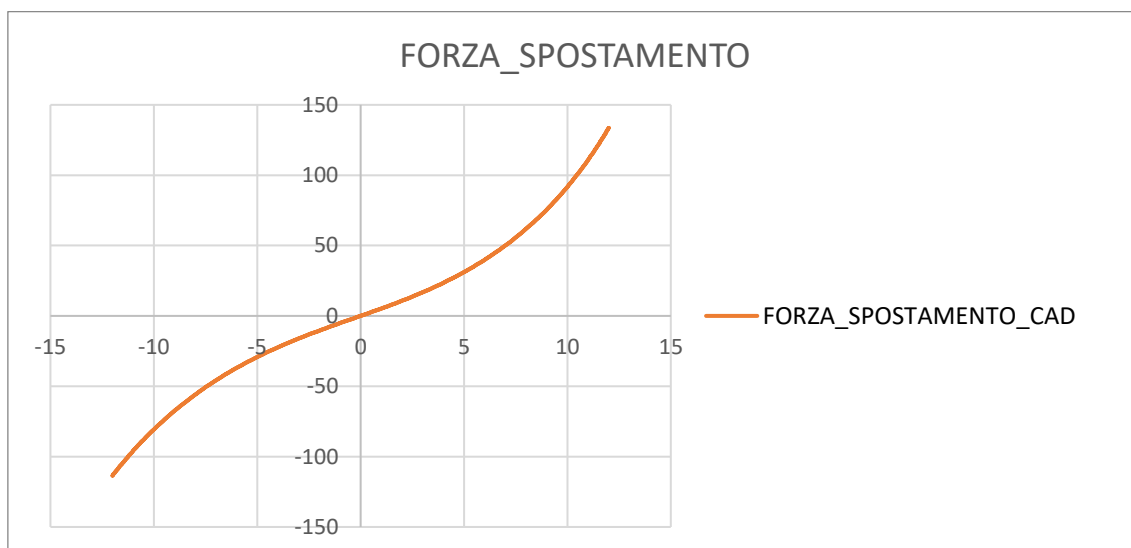


Figura 7.7: Grafico dell'andamento della forza, in funzione dello spostamento, applicata nel CILINDRO centrale del centratore CAD

Tramite l'andamento della forza risultante e lo spostamento imposto, si può andare a definire la rigidezza di un centratore, come $KMS = F/X$. Tale parametro, una volta graficato, porta nella situazione reale, ad una risposta fortemente non simmetrica. Questa asimmetria, che dovrebbe essere spiccatamente marcata, sembra non risultare dal modello realizzato e ciò porta quindi a realizzare l'indagine di questo elaborato. In figura si riporta l'andamento del KMS per il centratore CAD: anche se non sia presente

una simmetria perfetta, l'andamento risulta essere troppo simile tra le deformazioni negative e positive. [Figura 7.8]

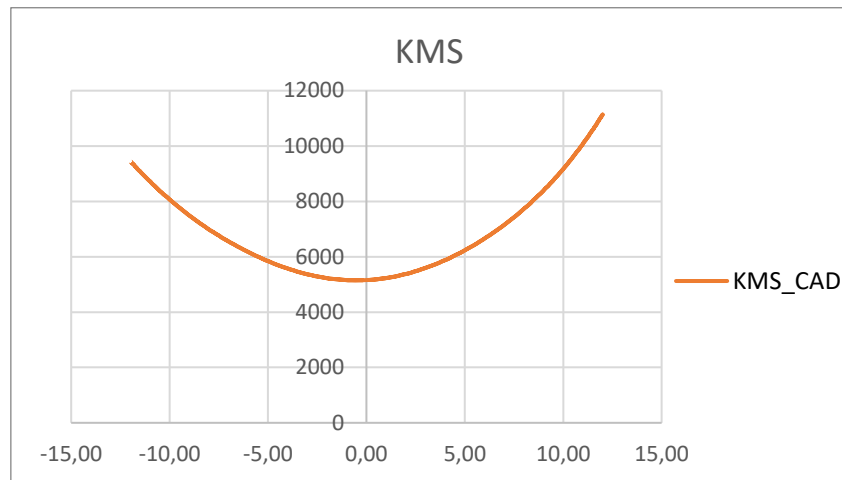


Figura 7.8: Andamento della rigidezza (KMS) del centratore con geometria CAD

Con lo stesso modello ABAQUS, descritto e analizzato nel capitolo 7.3, si vanno ora a generare i modelli per i centratori reali. La differenza sostanziale tra i due modelli sono:

- La geometria del centratore, viene caricata la superficie ricavata dalla scansione
- Lo spessore del materiale, che viene modificato di volta in volta anche nel modello CAD
- Le caratteristiche del materiale, che vengono modificate di pari passo sul modello CAD

Tramite queste accortezze si ricavano modelli perfettamente confrontabili con la geometria CAD.

Si introduce ora una veloce panoramica sulle caratteristiche più importanti dei modelli reali come: il tipo di geometria caricato, la lunghezza caratteristica dei seeds utilizzata, il conteggio della mesh e il tipo di elementi usati.

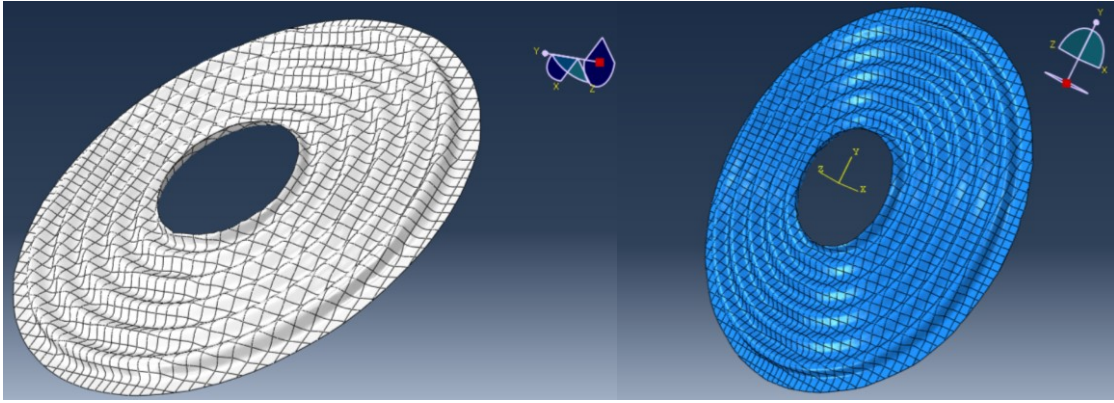


Figura 7.9: Dettaglio della superficie realizzata tramite scansione ottica del centratore A (sinistra) e B (destra)

Da come si evince dall'immagine [Figura 7.9] il centratore A sulla sinistra presenta una superficie caratterizzata da meno elementi, rispetto al centratore B, questo in virtù del processo realizzativo spiegato nel capitolo 5.3.

Per quanto riguarda gli elementi della mesh, vengono riportati, come per il centratore CAD, i valori della distanza tra i seeds, il numero di elementi e la loro tipologia.

Per il centratore A, la mesh realizzata viene impostata come segue:

- Dimensione seeds 0,22
- Total number of nodes: 266456
- Total number of elements: 265804
- 264879 linear quadrilateral elements of type S4R
- 925 linear triangular elements of type S3

Il centratore B, viene discretizzato come segue:

- Dimensione seeds 0,22
- Total number of nodes: 266456
- Total number of elements: 265804
- 262490 linear quadrilateral elements of type S4R
- 1056 linear triangular elements of type S3

La volontà di tenere omogenea la quantità di elementi, consente di definire mesh simili tra loro. Ciò è importante per un confronto tra modelli dato che, diminuire il numero di elementi, tende a irrigidire e sovrastimare la risposta del materiale. Questo avviene in quanto, il programma, interpola linearmente tra i vari elementi della mesh; distanze

elevate tra i nodi, quindi, costringono il software ad ipotizzare l'andamento della deformazione, dove non calcolabile per assenza di nodi. Per evitare che la nostra analisi venga limitata dalla poca quantità di informazioni, si è adattata tutta l'analisi al modello più gravoso, impostando le mesh come descritto.

Dall'analisi del centratore A emerge che:

1. La curva KMS risulta decisamente più bassa rispetto al modello CAD
2. L'andamento è decisamente asimmetrico tra lo spostamento positivo e negativo

Il grafico riporta infatti la curva KMS del centratore A. [Figura 7.10]

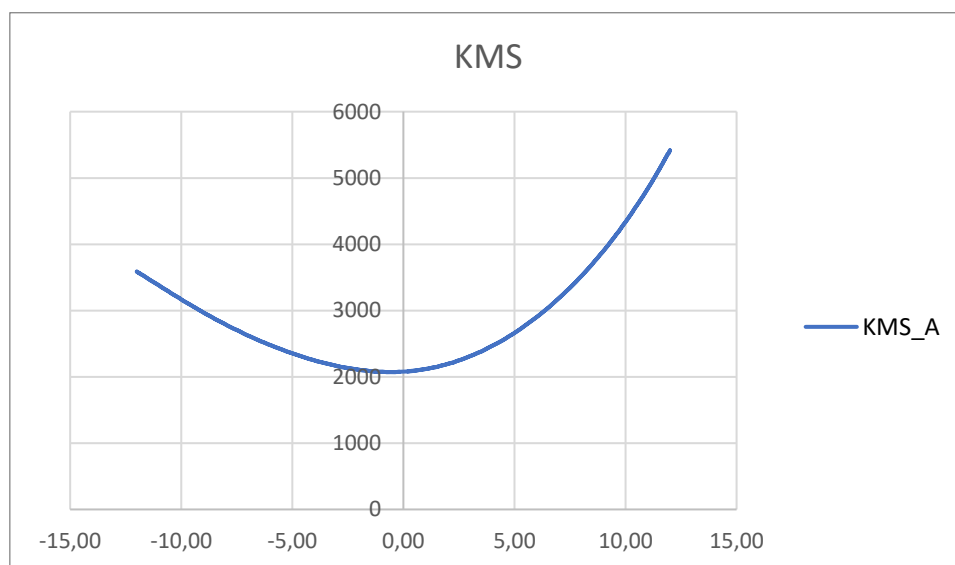


Figura 7.10: Grafico andamento del KMS per il centratore A

L'asimmetria si percepisce anche con l'andamento della forza in funzione dello spazio, che porta alla formazione di una curva ad "esse" molto meno pendente e con evidente asimmetria. [Figura 7.11]



Figura 7.11: Grafico andamento della forza risultante, agente sul cilindro centrale, in funzione dello spostamento per il centratore A

Per quanto riguarda i risultati del centratore B, quest'ultimo si presenta più simile all'andamento del centratore A, che del modello a geometria CAD. Il grafico KMS risulta, si più stretto rispetto al KMS_A, ma comunque non simmetrico e nettamente più basso rispetto al centratore CAD. [Figura 7.12]

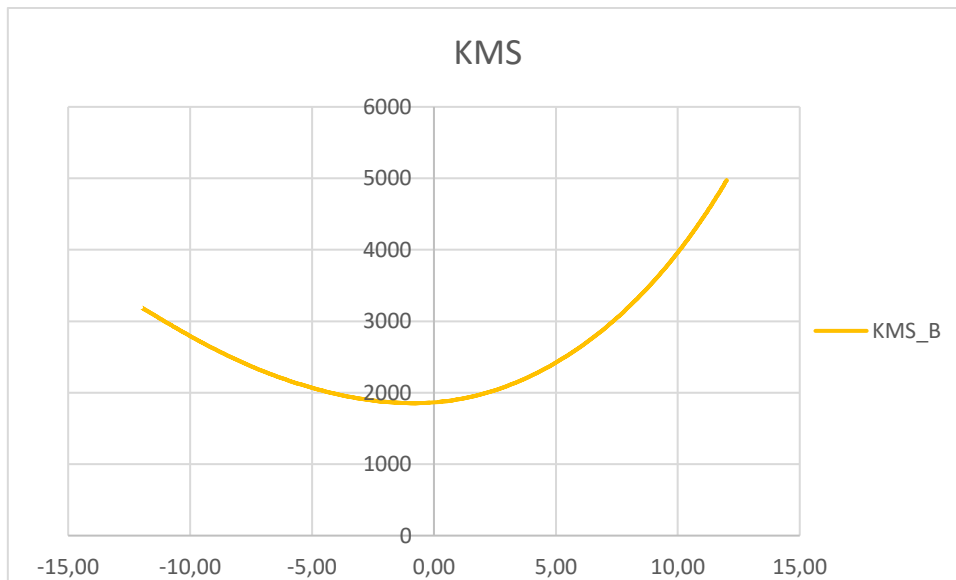


Figura 7.12: Grafico andamento KMS per il centratore B

Anche nel graficare l'andamento della forza, rispetto allo spostamento, si riesce a percepire l'asimmetria della risposta del materiale, con la propensione ad irrigidire per spostamenti positivi del cilindro centrale.[Figura 7.13]

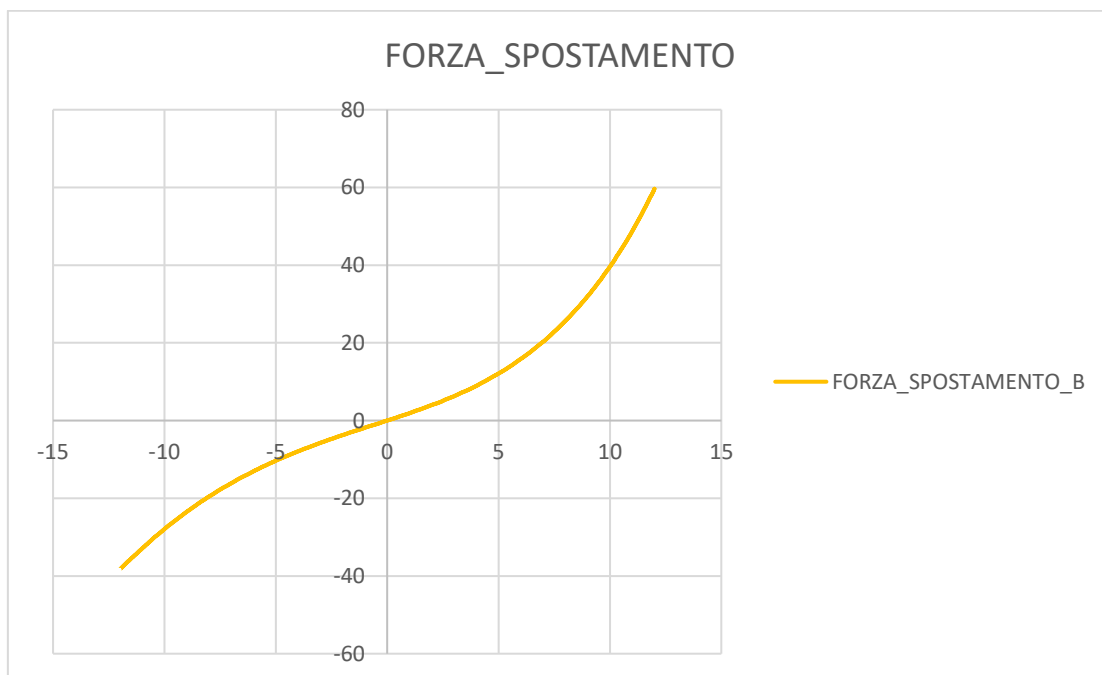


Figura 7.13: Grafico andamento della forza risultante, agente sul cilindro centrale, in funzione dello spostamento per il centratore B

8. Confronto tra modello CAD, centratori A e B

Si vanno di seguito ad accorpare i risultati ottenuti dalle analisi FEM e a descriverne gli aspetti di maggior interesse. Come anticipato nel capitolo 7.4, per il centratore CAD vengono realizzate due analisi distinte: una effettuata con il materiale A ($E_1 = E_2 = 1481$ MPa; $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 260$ MPa; $\nu = 0,32$) e spessore del modello di 0,36mm, l'altra effettuata con il materiale B ($E_1 = E_2 = 2261$ MPa; $G_{12} = G_{13} = G_{23} = 395$ MPa; $\nu = 0,23$) e spessore di 0,34mm. Questo per fa sì che il confronto tra i modelli sia solo in termini geometrici e non fisici.

Partendo dall'analisi svolta con il centratore A, e confrontata con il centratore CAD similare, si ottengono i grafici KMS, FORZA_SPOSTAMENTO, FORZA_TEMPO, riportati di seguito. [Figura 8.1-8.2-8.3]

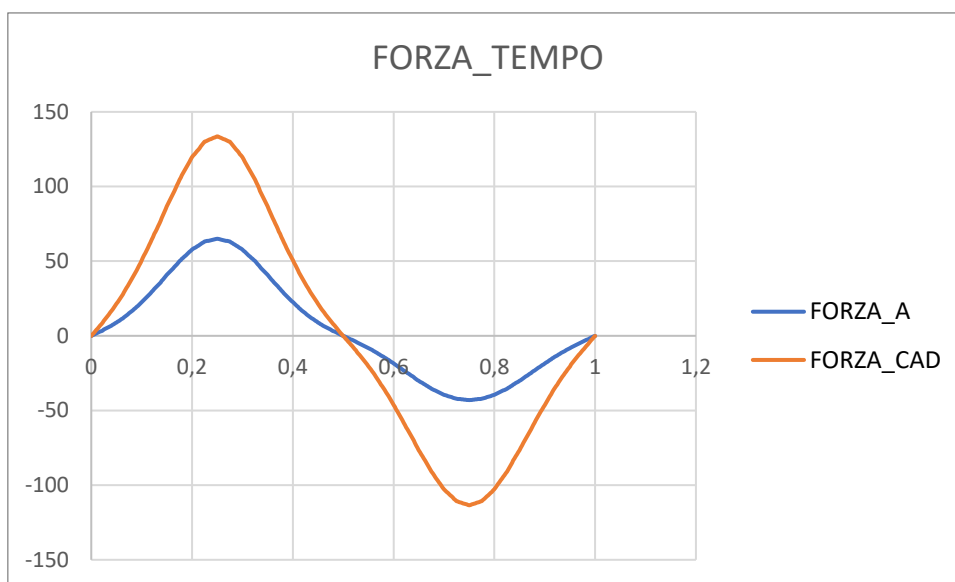


Figura 8.1: confronto FORZA_TEMPO tra geometria CAD e centratore A

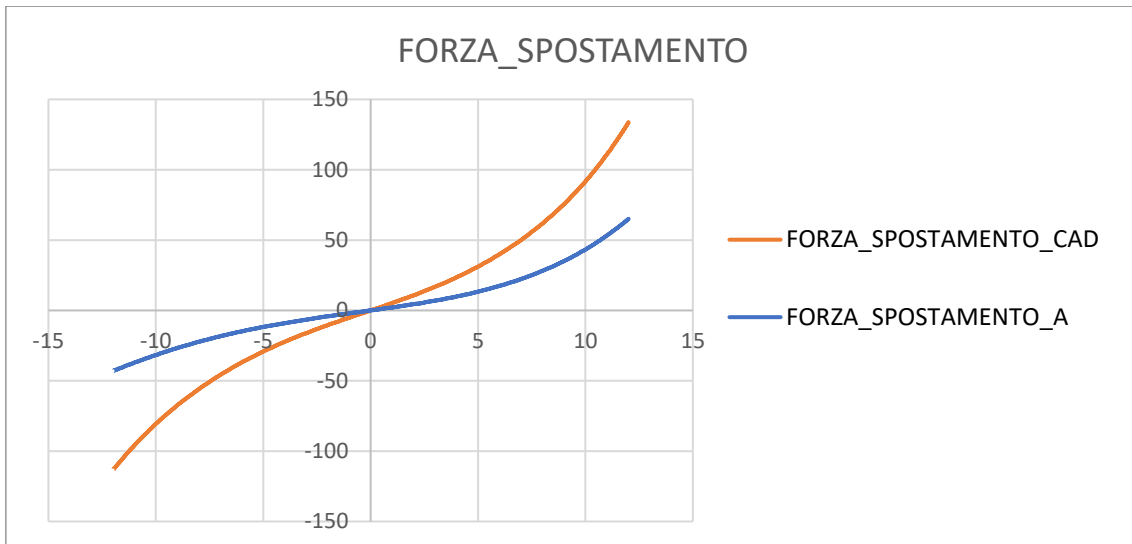


Figura 8.2: confronto FORZA_SPOSTAMENTO tra geometria CAD e centratore A

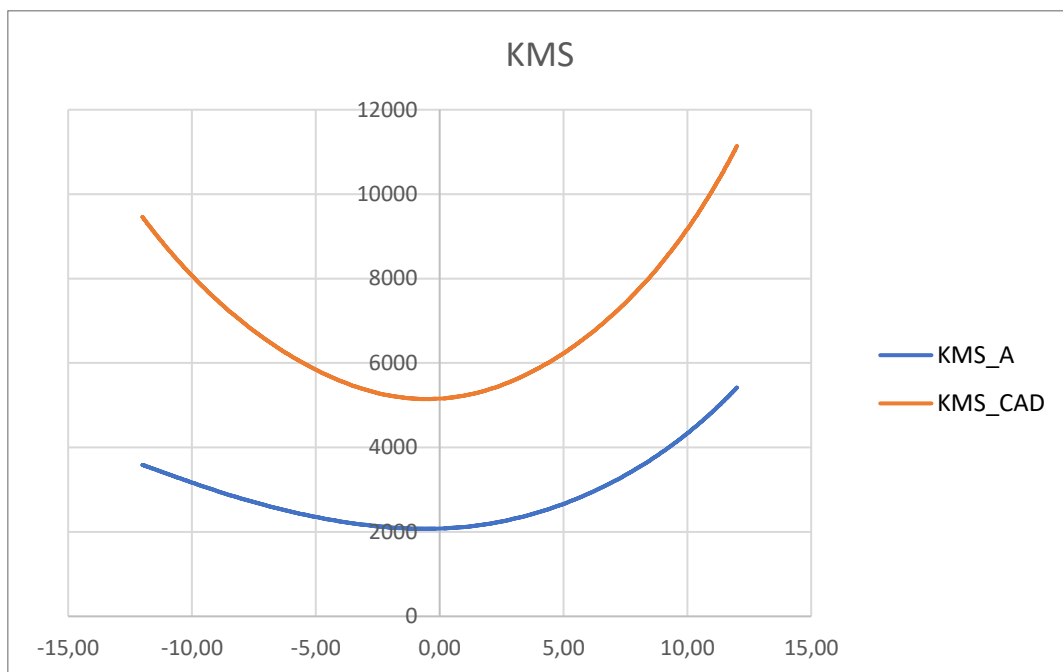


Figura 8.3: confronto KMS tra geometria CAD e centratore A

Sin dal primo grafico ci si rende conto di come le risposte dei modelli, con geometria CAD e geometria A, risultino sostanzialmente diversi sia in termini qualitativi, che quantitativi. Mentre nel centratore CAD risulta presente un andamento quasi simmetrico tra gli spostamenti positivi e negativi, tale correlazione si perde completamente nel modello A. Focalizzando l'attenzione nei primi millimetri di deformazione, si osserva come il comportamento simmetrico venga mantenuto, dal centratore CAD, per almeno due millimetri, finendo con una differenza, tra il massimo spostamento positivo e negativo, di 1678 N/mm, pari al 15% della rigidezza massima. Per quanto riguarda il centratore A, non riesce a mantenere una simmetria per più di

0,5mm, generando una differenza nello spostamento massimo, positivo e negativo, di 1830 N/mm, pari al 33% della rigidezza massima del centratore. Di seguito si riportano due grafici riguardanti il confronto tra: la parte positiva dei KMS e la parte negativa, col fine di evidenziare la mancata simmetria e la differenza di valori riportata. [Figura 8.4]

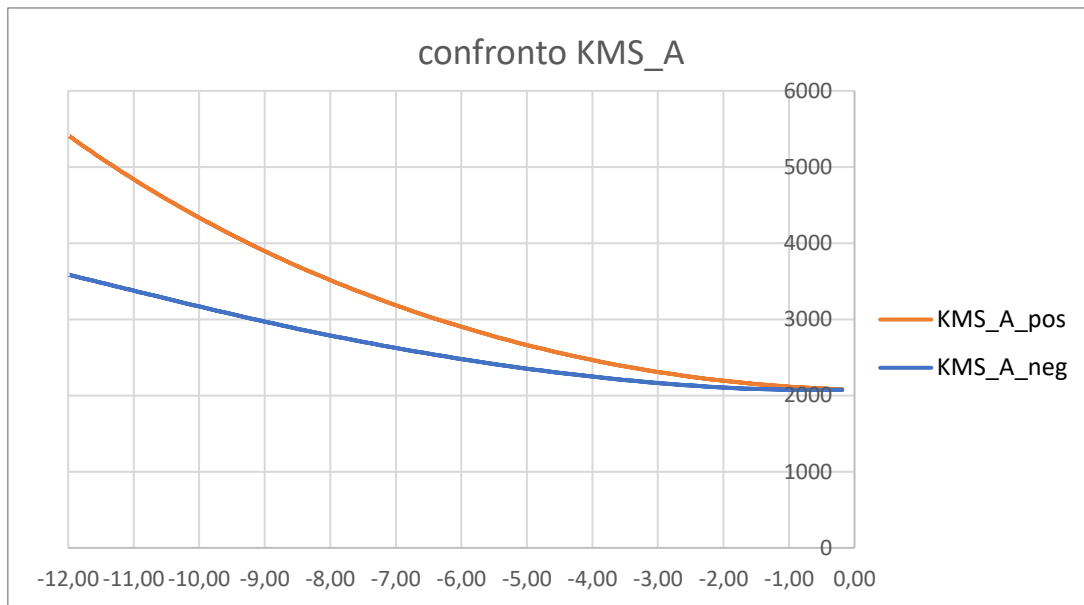


Figura 8.4: confronto tra la rigidezza calcolata con spostamenti negativi e positivi per il centratore A

Questa differenza di andamenti viene riscontrata anche negli altri due grafici, dove in particolare, il focus viene spostato sulla forza di reazione esercitata sul cilindro centrale. Mentre per il modello CAD, il grafico forza-tempo tende ad assumere un andamento quasi sinusoidale, il modello del centratore A accenna solamente tale comportamento. Il grafico per la geometria A non mantiene, di fatti, alcuna simmetria, ne di forma ne di valori massimi, evidenziando ancor di più l'asimmetria del KMS. Invece la più spiccata rigidezza del centratore CAD, viene evidenziata dalla differenza di forza massima riscontrata nei due grafici forza-tempo, forza-spostamento.

Per il centratore B possono essere fatte, in sintesi, le stesse considerazioni del confronto tra modello CAD e modello A. L'aver modificato il materiale e lo spessore usato, portano i risultati ad assumere un diverso andamento senza però modificarne sostanzialmente il comportamento. Il grafico assume quindi la forma riportata in figura. [Figura 8.5]

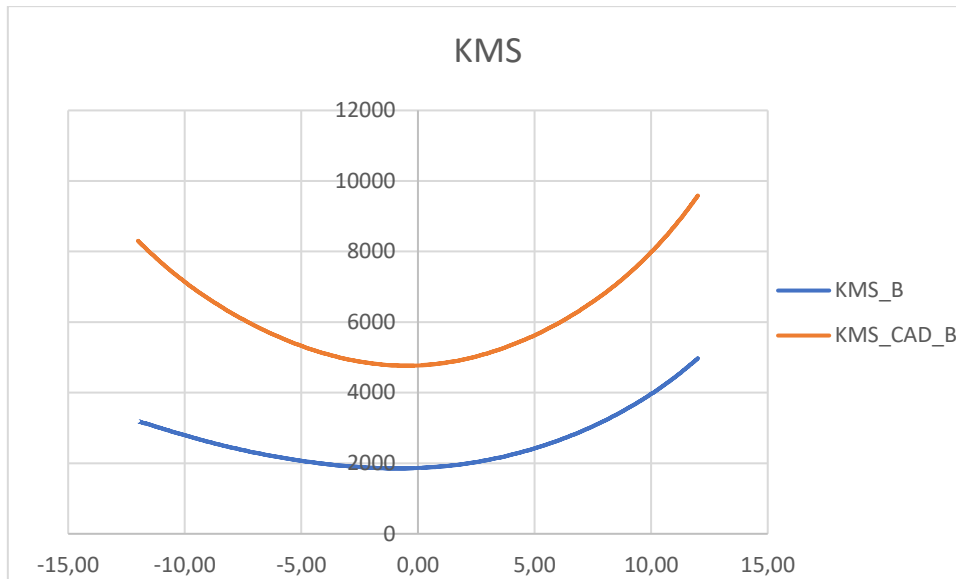


Figura 8.5: confronto KMS tra geometria CAD e centratore B

L'andamento del KMS risulta, per il centratore con geometria CAD, quasi simmetrico come accadeva con l'analisi svolta per il materiale A. La curva non simmetrica viene invece generata con la geometria del centratore B, questo presenta, come nel primo caso, una spiccata asimmetria e una maggior rigidità per spostamenti positivi. Anche qui, sovrapponendo le mezze curve KMS, si possono riscontrare le differenze di comportamento tra la rigidità negli spostamenti positivi e negativi.

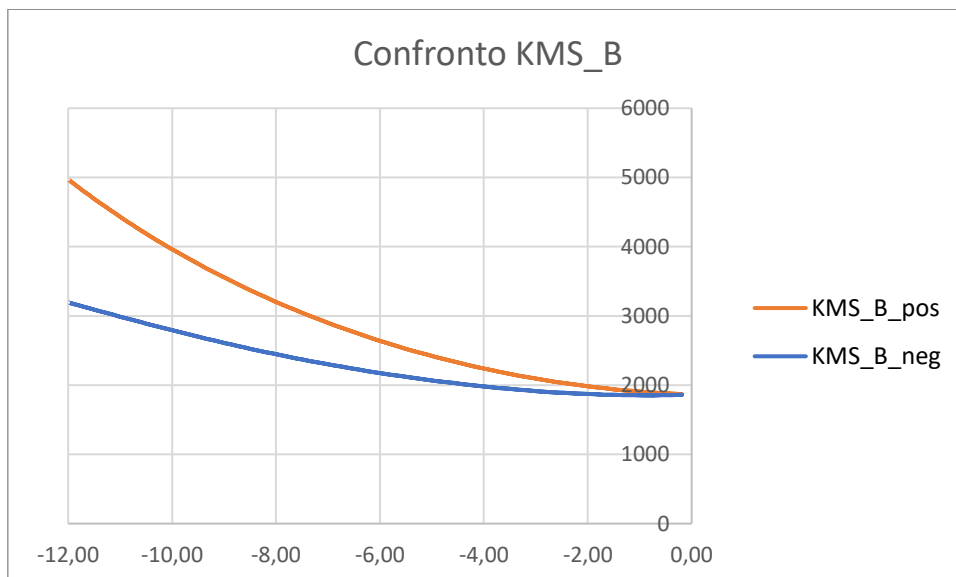


Figura 8.6: confronto tra la rigidità calcolata con spostamenti negativi e positivi per il centratore B

Nella [Figura 8.6] si possono svolgere le medesime considerazioni già fatte per il centratore A, andando ad osservare l'assenza di simmetria dopo 1 mm di deformazione

e valutando il distacco tra le due curve di 1778 N/mm, pari al 35% della rigidità massima del centratore B.

Osservando infine i grafici di [Figura 8.6-8.7] è possibile notare l'andamento della forza quasi sinusoidale per la geometria CAD, mentre un andamento meno simmetrico e più caratteristico per la geometria B. Questo evidenzia e giustifica ancor più, il comportamento asimmetrico della curva KMS per la geometria reale.

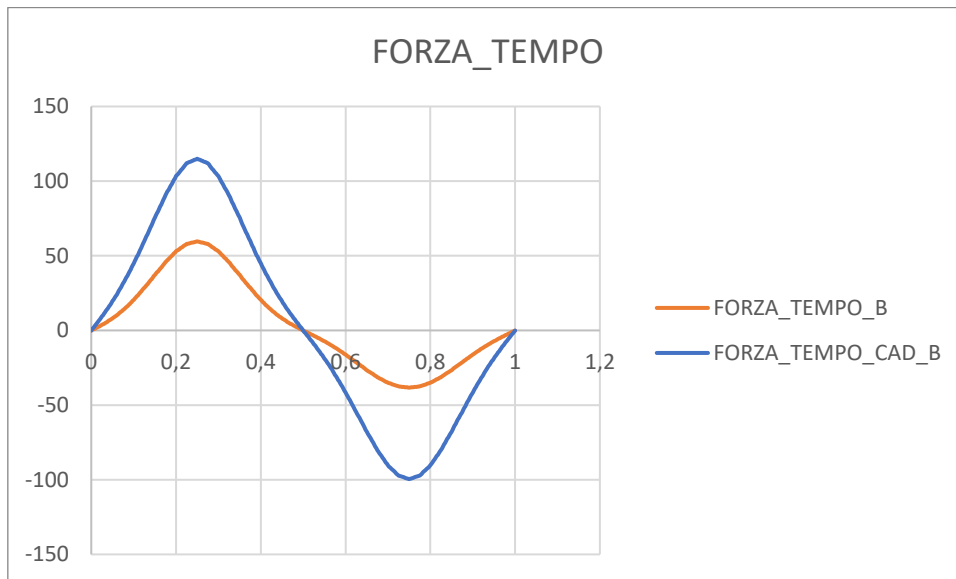


Figura 8.7: confronto FORZA_TEMPO tra geometria CAD e centratore B

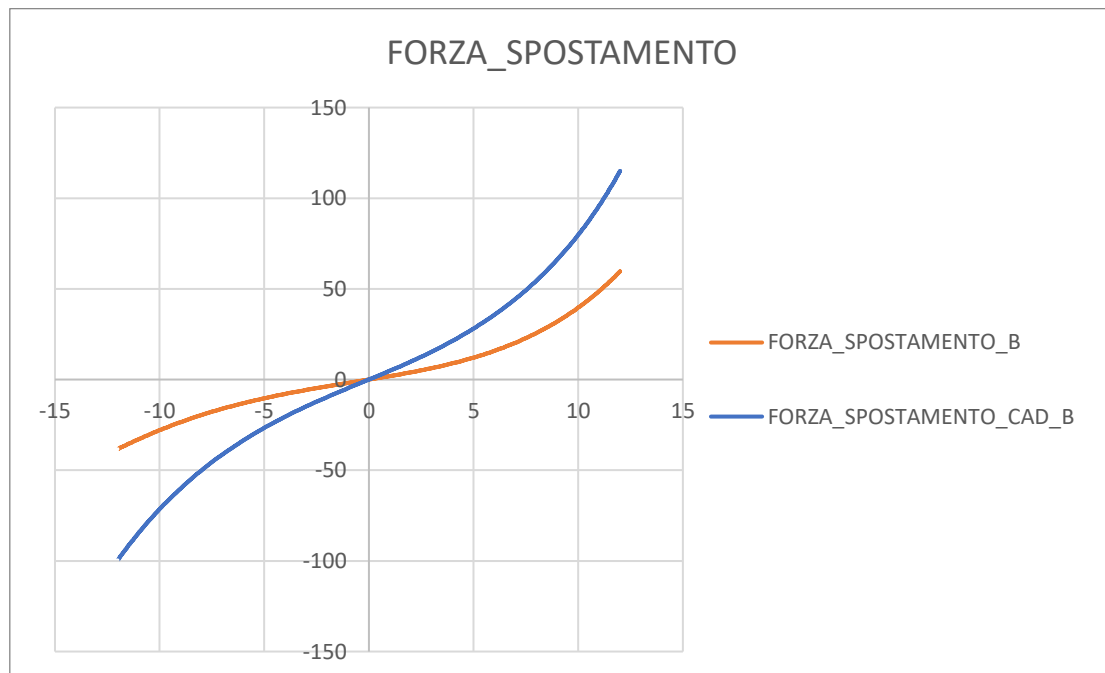


Figura 8.8: confronto FORZA_SPOSTAMENTO tra geometria CAD e centratore B

9. Conclusioni

Partendo dalla caratterizzazione della tela composita costituente i nostri centratori, è stato possibile ipotizzare un modello FEM, che predicesse la rigidezza dell'elemento. Sapendo da fonti in letteratura e da esami precedenti che, i centratori acustici in esame, avrebbero dovuto avere un andamento asimmetrico, e, sapendo che il modello assialsimmetrico, con materiale isotropo, generava curve simmetriche, si è pensato di utilizzare un materiale ortotropo per modellare l'elemento.

Questa ipotesi si è ritenuta soddisfacente in quanto, anche le curve ricavate dall'analisi con la geometria CAD del centratore, risultano essere asimmetriche. L'asimmetria rimane comunque non corrispondente al reale andamento della rigidezza dei centratori; si è quindi ipotizzata una causa diversa, come la differenza geometrica tra il centratore ideale e l'effettiva geometria.

Da acquisizioni tramite scanner e da quotatura tramite software 3D, si è riscontrata una notevole differenza di misura tra il modello reale e la geometria CAD, specialmente sulle curvature e sull'altezza delle creste e delle valli dei profili dei centratori. Per essere sicuri che non vi fosse alcuna periodicità nelle misurazioni, queste sono state effettuate su due piani di sezione, al fine di avere anche un valore medio delle singole misurazioni. La differenza si aggira, per le curvature, al decimo di millimetro, mentre, per le altezze, si instaura sull'ordine del millimetro. Questa di fatto sembra essere la motivazione del diverso comportamento tra i centratori ideali e reali.

Dall'analisi ne deriva quindi che, per lo studio dell'effettivo comportamento di un qualunque centratore, sia indispensabile possedere le effettive misurazioni della sua geometria, in quanto, anche piccole variazioni, possono portare a sensibili differenze nella risposta del componente. Per ogni materiale utilizzato, sarebbe quindi opportuno generare un modello FEM con la geometria reale, senza affidarsi a generalizzazioni portate dal modello CAD. Si sconsiglia quindi di utilizzare analisi basate su geometrie ideali, in quanto, il processo di formazione per stampaggio, genera forti discostamenti dal disegno iniziale, variando sostanzialmente il risultato finale.

Si riconosce però la bontà dell'analisi eseguita sulle geometrie basate su acquisizioni tramite scanner ottico, in quanto queste riescono a produrre risultati simili a quelli attesi e riscontrati in letteratura.

Naturalmente il modello così strutturato risente ancora di alcune imprecisioni dovute, ad esempio, alla cedevolezza dei vincoli di incollaggio e alla possibilità di avere comportamenti inaspettati, a seguito di cicli di carico. Questi aspetti andrebbero maggiormente indagati andando a valutare le effettive condizioni di lavoro dei centratori, modellando l'analisi in termini dinamici e analizzando dunque il comportamento a fatica del componente. Per la caratterizzazione del materiale sarebbe anche opportuno indagare, tramite prove cicliche, possibili andamenti di isteresi, così da avere una situazione completa, di come il materiale risponda in fase di carico.

Indice delle figure

| | |
|---|----|
| Figura 1.1: A sinistra sezione schematica di un altoparlante, a destra altoparlante parzialmente assemblato con centratore in vista | 3 |
| Figura 1.2:Centratore per altoparlanti con bobina incollata | 5 |
| Figura 1.3: Schema dei due processi di termoformatura, a sinistra il Vacuum Bag forming, a destra Pressure-Bag forming | 6 |
| Figura 1.4: Le quattro tipologie di centratori A, B, C, D (partendo in alto a sinistra) | 7 |
| Figura 1.5: Dettaglio della trama di un centratore | 8 |
| Figura 1.6: Deformazione di lamina ortotropa con carico secondo una direzione principale (a) e deviato (b) | 9 |
| Figura 2.1: Processo logico di correlazione effettuato dalla tecnica DIC | 12 |
| Figura 2.2: Funzionamento stereovisione per il tracciamento di punti nello spazio | 13 |
| Figura 2.3: Tela 150x150 del materiale composito polimerico B | 15 |
| Figura 2.4: Schematizzazione delle dimensioni degli speckle, rapportate al pixel, che la procedura riesce a tracciare | 16 |
| Figura 2.5: Sintesi del processo di realizzazione dello speckle pattern, dalla delimitazione dell'area di verniciatura, alla realizzazione del pattern | 17 |
| Figura 2.6: esempi di densità dello speckle per permettere una corretta correlazione dei punti | 18 |
| Figura 2.7: Primo set-up di misurazione con telecamere in stereoscopia, sull'afferraggio è montato il provino di calibrazione | 19 |
| Figura 2.8: Set-up definitivo usato per tutte le prove, telecamere in stereoscopia montate verticalmente, faretto alogeno per l'illuminazione del target, provino afferrato in fase di trazione | 20 |
| Figura 2.9: A sinistra la telecamera montata sul cavalletto con l'obiettivo da 50mm, al centro particolare dell'obiettivo, a destra caratteristiche tecniche dell'obiettivo | 21 |
| Figura 2.10: Esempio di provino di calibrazione montato su vetrino piano | 22 |
| Figura 2.11: Processo di calibrazione, successione delle movimentazioni del target per calibrare il sistema, inquadratura della camera bassa | 23 |
| Figura 2.12: Primario di calibrazione utilizzato con pattern 9x12 con 4mm di spaziatura. Da notare i dots bianchi di riferimento per gli assi X e Y | 24 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.13: Interfaccia grafica del programma scritto in LabView per l'acquisizione delle immagini, a sinistra l'inquadratura della CAM0, a destra la CAM1 e in alto la plancia dei comandi | 26 |
| Figura 3.1: Area di interesse nello studio delle deformazioni, in giallo i subsets inseriti posizionati in zone ad alto contrasto | 29 |
| Figura 3.2: Correlazione tra subset size e step size | 30 |
| Figura 3.3: Interfaccia "MatchID Stereo" con la scelta del subset size e step size | 31 |
| Figura 3.4: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per la selezione dei frame analizzati | 32 |
| Figura 3.5: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per l'impostazione della grandezza delle deformazioni e del "Progress History" | 32 |
| Figura 3.6: Schema logico del funzionamento del "bisection searching" | 33 |
| Figura 3.7: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per l'impostazione del "Correlation threshold" e del "Missing data compensation" | 34 |
| Figura 4.1: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per il calcolo delle deformazioni | 36 |
| Figura 4.2: Interfaccia grafica "MatchID Stereo" per l'esportazione dei risultati in forma matriciale, selezione in particolare dell'albero delle deformazioni | 37 |
| Figura 4.3: Schermate dello script "export_data" per l'unione dei dati di MatchID | 38 |
| Figura 4.4: Grafico con andamento del coefficiente di Poisson ne tempo, stazionario tra i 15-55 sec | 41 |
| Figura 4.5: Cerchi di Mhor per un provino sottoposto a trazione monoassiale, a sinistra il cerchio per lo stato tensionale, a destra quello per lo stato delle deformazioni | 43 |
| Figura 5.1: Vista isometrica del centratore CAD realizzato per rivoluzione del profilo | 45 |
| Figura 5.2: Sezione frontale del centratore CAD con quotatura delle grandezze caratteristiche del profilo | 46 |
| Figura 5.3: Rappresentazione dello scanner Go!SCAN 3D in dotazione al laboratorio di Reverse Engeneering dell'Università Politecnica delle Marche | 47 |
| Figura 5.4: Tavola nera, marcata con target bianchi, utilizzata per la calibrazione dello scanner e come piano di appoggio per la scansione dei centratori | 48 |
| Figura 5.5: Processo di acquisizione della scansione su di un centratore | 49 |
| Figura 5.6: A sinistra nuvola di punti acquisita dalla scansione, a destra dettaglio della nuvola con focus sulla densità dei nodi | 50 |
| Figura 5.7: Interfaccia grafica di CatiaV5 per la riparazione della mesh | 51 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8: Superficie del centratore B realizzata tramite CatiaV5 | 51 |
| Figura 5.9: Dettaglio della superficie del centratore B realizzata con CatiaV5 | 52 |
| Figura 6.1: Individuazione dei piani di taglio e dei profili quotati del centratore A | 53 |
| Figura 6.2: Processo di quotatura dei profili del centratore A, distanza, altezza, curvatura della geometria | 54 |
| Figura 7.1: Albero logico di "ABAQUS" riportante i vari moduli da compilare per la simulazione | 61 |
| Figura 7.2: Rappresentazione del modello "Conventional Shell" | 62 |
| Figura 7.3: Confronto tra l'utilizzo, a sinistra, di una lunghezza tra i seeds di 2mm e, a destra, 0,4mm | 62 |
| Figura 7.4: Elementi S3R e S4R usati per modellare la geometria Shell | 63 |
| Figura 7.5: Geometria CAD del centratore con evidenziati i due "sets" realizzati BORDO e CILINDRO | 64 |
| Figura 7.6: Grafico dell'andamento della forza applicata al CILINDRO interno del centratore CAD | 66 |
| Figura 7.7: Grafico dell'andamento della forza, in funzione dello spostamento, applicata nel CILINDRO centrale del centratore CAD | 66 |
| Figura 7.8: Andamento della rigidezza (KMS) del centratore con geometria CAD | 67 |
| Figura 7.9: Dettaglio della superficie realizzata tramite scansione ottica del centratore A (sinistra) e B (destra) | 68 |
| Figura 7.10: Grafico andamento del KMS per il centratore A | 69 |
| Figura 7.11: Grafico andamento della forza risultante, agente sul cilindro centrale, in funzione dello spostamento per il centratore A | 69 |
| Figura 7.12: Grafico andamento KMS per il centratore B | 70 |
| Figura 7.13: Grafico andamento della forza risultante, agente sul cilindro centrale, in funzione dello spostamento per il centratore B | 70 |
| Figura 8.1: confronto FORZA_TEMPO tra geometria CAD e centratore A | 71 |
| Figura 8.2: confronto FORZA_SPOSTAMENTO tra geometria CAD e centratore A | 72 |
| Figura 8.3: confronto KMS tra geometria CAD e centratore A | 72 |
| Figura 8.4: confronto tra la rigidezza calcolata con spostamenti negativi e positivi per il centratore A | 73 |
| Figura 8.5: confronto KMS tra geometria CAD e centratore B | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 8.6: confronto tra la rigidezza calcolata con spostamenti negativi e positivi per il centratore B | 74 |
| Figura 8.7: confronto FORZA_TEMPO tra geometria CAD e centratore B | 75 |
| Figura 8.8: confronto FORZA_SPOSTAMENTO tra geometria CAD e centratore B | 75 |

Indice delle tabelle

| | |
|--|----|
| Tabella 2-1: Riepilogo delle caratteristiche geometriche per i provini di materiale A e B, vengono riportati i nomi aziendali, le dimensioni, la numerazione | 25 |
| Tabella 2-2: Riepilogo delle caratteristiche geometriche per i provini di materiale C e D, vengono riportati i nomi aziendali, le dimensioni, la numerazione | 25 |
| Tabella 4-1: Moduli di taglio calcolati con ciclo "for" su otto punti. Valori costanti denotano un tratto di analisi opportunamente scelto | 42 |
| Tabella 4-2: Riepilogo parametri ingegneristici materiale A e B | 44 |
| Tabella 5-1: Riepilogo dei dati ricavati dalla quotatura del disegno CAD del centratore. Riportano le tre misurazioni caratteristiche: curvatura, distanza, altezza delle creste e delle valli del profilo | 46 |
| Tabella 5-2: Riepilogo delle caratteristiche dello scanner Go!SCAN 3D utilizzato | 48 |
| Tabella 6-1: Riepilogo della quotatura del centratore A: altezza creste | 55 |
| Tabella 6-2: Riepilogo della quotatura del centratore A: altezza valli | 55 |
| Tabella 6-3: Riepilogo della quotatura del centratore A: distanza creste | 56 |
| Tabella 6-4: Riepilogo della quotatura del centratore A: distanza valli | 56 |
| Tabella 6-5: Riepilogo della quotatura del centratore A: curvatura creste | 56 |
| Tabella 6-6: Riepilogo della quotatura del centratore A: curvatura valli | 56 |
| Tabella 6-7: Riepilogo della quotatura del centratore B: altezza creste | 57 |
| Tabella 6-8: Riepilogo della quotatura del centratore B: altezza valli | 57 |
| Tabella 6-9: Riepilogo della quotatura del centratore B: distanza creste | 57 |
| Tabella 6-10: Riepilogo della quotatura del centratore B: distanza valli | 58 |
| Tabella 6-11: Riepilogo della quotatura del centratore B: curvatura creste | 58 |
| Tabella 6-12: Riepilogo della quotatura del centratore B: curvatura valli | 58 |
| Tabella 6-13: Confronto valori medi per i centratori A, B e centratore CAD | 59 |

Bibliografia e sitografia

- [1] <http://www.audiovalvole.it/altoparlanti.html>
- [2] <http://www.giulianonicoletti.com/distorsioni-non-lineari.html>
- [3] <https://vehiclecue.it/materiali-compositi-tecniche-laminazione-automotive/26901/>
- [4] <https://imechanica.org/files/Cap4.pdf>
- [5] <https://digitalimagecorrelation.org/>
- [6] https://amslaurea.unibo.it/6436/1/palanca_marco_tesi.pdf
- [7] Zhang, Y., Yan, L., Karnati, S. et al. Bisection searching based reference frame update strategy for digital image correlation. *SN Appl. Sci.* 1, 588 (2019)
- [8] <https://www.fujifilm.com/it/it/business/optical-devices/mvlens/cfza1s>
- [9] <https://www.creaform3d.com/it/soluzioni-di-metrologia/scanner-3d-portatili-goscan-3d>
- [10] <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/SIMULIA/PDF/datasheets/simulia-abaqus-standard-datasheet.pdf>
- [11] <https://classes.engineering.wustl.edu/2009/spring/mase5513/abaqus/docs/v6.6/books/usi/default.htm?startat>
- [12] <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEEXCRefMap/simaexc-c-docproc.htm>
- [13] Xiao, H., Chen, L.S. Hencky's elasticity model and linear stress-strain relations in isotropic finite hyperelasticity. *Acta Mechanica* 157, 51–60 (2002).
- [14] ASTM D-3518-94: “Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate”
- [15] International Digital Image Correlation Society, Jones, E.M.C. and Iadicola, M.A. (Eds.) (2018). *A Good Practices Guide for Digital Image Correlation*. DOI: 10.32720/idics/gpg.ed1