

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Analisi FEM del comportamento meccanico a compressione di acini d'uva con il modello di Ogden.

Relatrice: Prof.sa Raffaella Sesana

Laureanda: Veronica Ternavasio

Matricola: 223262

Anno Accademico 2018-2019

“Quando puoi misurare ciò di cui stai parlando ed esprimerlo in numeri puoi affermare di saperne qualcosa. Se non puoi misurarlo o esprimerlo con i numeri la tua conoscenza sarà poca cosa. Sarà forse un inizio di conoscenza, tuttavia non abbastanza da far progredire il tuo pensiero fino allo stadio di scienza, qualsiasi possa essere l’argomento”

Lord William Thomson Kelvin

Ringraziamenti:

Un ringraziamento sentito è doveroso alla Prof.ssa Raffaella Sesana che con dedizione e professionalità mi ha accompagnata e consigliata nello studio dei temi presenti nell’elaborato.

Dedico questo traguardo a mia figlia Virginia che ha reso il termine di questo percorso speciale insegnandomi a non perdere l’entusiasmo nell’imparare dalle piccole cose e a credere nel valore dello studio e della perseveranza per raggiungere i propri obiettivi.

Sommario

1. Introduzione	5
2. Stato dell'arte	6
2.1. Cenni sulla classificazione dei materiali	7
2.2. Materiale generico	7
2.3. Materiale elastico ed iperelastico	7
2.4. Modelli basati sulla teoria Gaussiana e modelli su Base Invariante	8
2.5. Cenni sui modelli statistici	10
2.6. Modello di Arruda e Boyce	11
2.7. Modelli su base invariante	12
2.8. Cenni ai modelli Neo-Hookeoniano	12
2.9. Modello di Mooney-Rivlin	13
3 Normativa di riferimento ASAE 368	14
4 Prova TPA (Food Texture Profile Analysis)	17
5 Prove meccaniche	18
5.1 Caratteristiche dei macchinari di prova	18
5.2 Prove di compressione per la caratterizzazione del materiale	19
5.2.1 Cenni agli studi precedenti sulla compressione degli acini	20
6 Calibrazione del modello costitutivo	21
6.1 Curva caratteristica del materiale	22
6.2 Analisi con <i>Ansys Benchmark</i> e <i>Hyperfit</i> del modello costitutivo	23
6.3 Brevi richiami sul modello di Ogden	24
6.4 Simulazione delle prove sul materiale	26
6.4.1 Passaggi preliminari per la definizione dei parametri	26
6.4.2 Calibrazione dei modelli e calcolo dei coefficienti	27
6.4.3 mamb 1 (Moscato d'Amburgo acino 1)	27
6.4.4 mamb 2	31
6.4.5 mamb 3	34
6.4.6 mamb 4	35
6.4.7 mamb 5	37
6.5 Analisi e confronto dei coefficienti	39
7 Simulazione della compressione degli acini	42
7.1 Descrizione del modello FEM per la simulazione numerica	42

7.1.1	Geometria	42
7.1.2	Element type	42
7.1.3	Material properties.....	42
7.1.4	Mesh	43
7.1.5	Vincoli	43
7.1.6	Contatto	43
7.1.7	Analisi statica con Ansys APDL	44
8	Conclusioni	48
9	Codice Ansys	49
10	Bibliografia	58

1. Introduzione

Lo studio delle sostanze organiche negli ultimi anni ha subito un notevole sviluppo grazie alla crescente necessità del settore agroalimentare di possedere sistemi di lavorazione innovativi che necessitano di una più approfondita conoscenza delle proprietà meccaniche delle polpe di frutta e verdura al fine di ottimizzare i processi di produzione e diminuire i danni ai prodotti in fase di raccolta [2]. Nell'ambito dei sistemi di raccolta e stoccaggio è molto importante ridurre il più possibile la eventualità di danneggiare il prodotto, invece, nel caso di sistemi di spremitura, per ottimizzare la produzione è fondamentale conoscere le proprietà e la consistenza della polpa dei prodotti agroalimentari da spremere. Sono numerosi infatti i casi di studio di raccolta e stoccaggio dei meloni e di frutti a buccia dura, che in seguito al trasporto, evidenziano danni sulla buccia ed ammaccature nella polpa non sempre visibili dall'esterno come mostrato in Figura.1.

Per migliorare i processi di estrazione del succo, conoscere approfonditamente le caratteristiche reologiche del materiale è determinante, sono numerosi gli studi legati alla spremitura di frutti e verdure come uva e pomodori, dove, per massimizzare la produzione, è necessario conoscere il comportamento reologico dei materiali organici [3].

L'obiettivo di questa tesi è duplice: da un lato è quello di ricavare con prove sperimentali di compressione le caratteristiche meccaniche della polpa di acini d'uva ed in seguito, dall'altro, utilizzando il modello di Ogden per materiali iperelastici, ricavare i valori dei parametri di calibrazione del modello costitutivo del materiale iperelastico per simulare il comportamento degli acini sottoposti a una prova di compressione. Infine, dopo aver definito il modello FEM dell'acino, verificare la validità dei suddetti parametri al variare della dimensione dell'acino ed all'aumentare del grado di complessità del modello di Ogden. L'elaborato si presenta suddiviso in tre parti principali. La prima è la parte introduttiva dove si presenta la teoria matematica alla base del modello di Ogden utilizzato e la normativa di riferimento per le prove di compressione per la caratterizzazione del materiale; la seconda parte descrive le prove di compressione sugli acini, i due software *ANSYS workbench* ed *Hyperfit* utilizzati per le simulazioni numeriche ed i parametri di calibrazione ottenuti dalle prove sperimentali e la terza parte di analisi FEM con la simulazione delle prove sperimentali di compressione dell'acino con i parametri ricavati mediante le prove sperimentali. La tesi ha una struttura sperimentale e molto tempo è stato dedicato allo studio dei modelli di calcolo da utilizzare durante le prove e per la lettura e lo studio degli articoli presenti in letteratura sull'argomento.

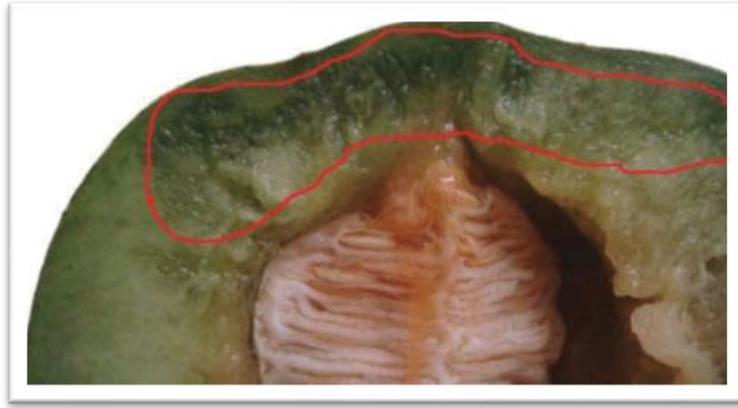


Figura 1: sezione di un melone danneggiato nella buccia [2]

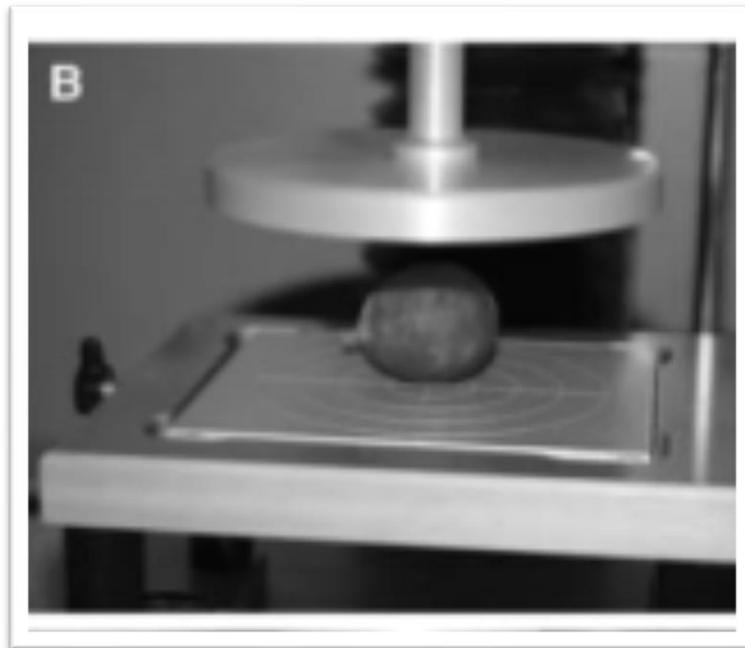


Figura 2: esempio di prova di compressione su un acino d'uva [3].

2. Stato dell'arte

Nel seguente paragrafo verranno analizzate le diverse tipologie di materiali approfondendo le caratteristiche dei materiali iperelastici, con i vari modelli studiati in letteratura e le ipotesi costitutive degli stessi.

2.1.Cenni sulla classificazione dei materiali

Da numerosi studi sperimentali sui materiali emerge la classificazione nelle seguenti categorie [7]:

- Materiale Generico;
- Materiale Elastico;
- Materiale Iperelastico.

Per ciascuna tipologia di materiale è possibile definire un legame costitutivo che ne definisca il legame sforzo-deformazione.

2.2.Materiale generico

Nel caso del *materiale generico* si evidenzia la dipendenza della deformazione del solido rispetto al tempo. Considerando un generico punto P appartenente al solido da comprimere, sottoponendo il corpo ad un tensore degli sforzi T e considerando un istante di tempo t la deformazione dipende dall'evolvere del gradiente di deformazione F_t nel tempo. Si possono esprimere le caratteristiche del materiale generico espresse sopra con la seguente espressione:

$$T(x,t) = T(F_t, X) \quad (1)$$

con :

- T tensore degli sforzi;
- x spostamento;
- t tempo;
- F_t gradiente di deformazione;
- X posizione dopo la deformazione.

2.3.Materiale elastico ed iperelastico

I materiali elastici ed iperelastici differiscono dai materiali definiti generici poiché lo stato di sollecitazione è funzione soltanto dello stato di deformazione rispetto alla configurazione nella quale si sta analizzando il materiale e non rispetto alla configurazione di riferimento del materiale stesso [6].

Si può definire pertanto un materiale di tipo iperelastico se esiste un funzionale del tensore delle deformazioni il cui gradiente è pari al tensore delle sollecitazioni [6].

In base alla definizione sopra citata definendo con $\phi(E)$ funzionale del tensore delle deformazioni si può scrivere:

$$S = \frac{\partial \phi(E)}{\partial E} = \text{grad} \phi = \nabla \phi \quad (2)$$

Con:

- S tensore delle deformazioni;
- E tensore delle sollecitazioni;
- $\phi(E)$ funzionale del tensore delle sollecitazioni;
- $\text{grad} \phi$ gradiente del tensore delle sollecitazioni.

Esiste inoltre un'ulteriore suddivisione della categoria dei materiali iperelastici utile alla trattazione che è la definizione di materiale iperelastico comprimibile o incomprimibile. La definizione di comprimibilità ed incomprimibilità del materiale è basata sulla variazione volumetrica, infatti se il materiale dal passaggio dalla configurazione iniziale a quella deformata presenta variazione volumetrica si definisce comprimibile, altrimenti incomprimibile.

2.4 Modelli basati sulla teoria Gaussiana e modelli su Base Invariante

Nella meccanica dei materiali lo studio dei materiali elastici si basa sulla relazione costitutiva di Hooke, che esprime una linearità tra la forza applicata ad un corpo e la sua corrispondente deformazione. Le formule che esprimono il fenomeno sono principalmente due:

La prima che è la formula per i corpi elastici come le molle che esprime la linearità tra spostamento e forza applicata:

$$F = -k \cdot x \quad (3)$$

Con:

- F forza applicata al corpo;
- k costante elastica del corpo;
- x deformazione del corpo.

La seconda che riguarda i corpi generici che esprime la linearità tra tensione e deformazione con il modulo elastico di Young:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

con:

- σ tensore delle deformazioni;
- E modulo elastico di Young;
- ε tensore delle deformazioni.

I materiali iperelastici presentano spesso una deformazione superiore al 100% della lunghezza iniziale quindi la teoria di Hooke, che è valida per deformazioni minori del 100% della lunghezza iniziale, risulta inadatta alla trattazione del fenomeno.

Essendo questa teoria non utilizzabile per spiegare il comportamento tipico dei materiali iperelastici non lineari, è necessario ricorrere a modelli matematici che meglio interpretino il comportamento del materiale. I materiali iperelastici presentano una curva di deformazione come quella di Fig.3.

Per semplificare la trattazione, vengono suddivisi in due gruppi:

- modelli basati sull'approccio statistico derivante dalla teoria Gaussiana;
- modelli di tipo fenomenologico o basati sugli invarianti (*invariant-based*).

I modelli che rappresentano la prima categoria sono quelli che vennero studiati per primi per approfondire la teoria gaussiana e per spiegare statisticamente l'isotropia e l'omogeneità dei materiali nella formulazione di nuove leggi costitutive. Appartengono a questa famiglia i modelli di Arruda e Boyce; Appartengono, invece, alla categoria dei fenomenologici i modelli formulati da Mooney, Rivlin, Gent ed Ogden [7].

La presente tesi si basa sullo studio delle variabili dei modelli di tipo fenomenologico in particolare sui modelli di Ogden e sull'analisi dei parametri che caratterizzano questo modello al variare della tipologia di polpa.

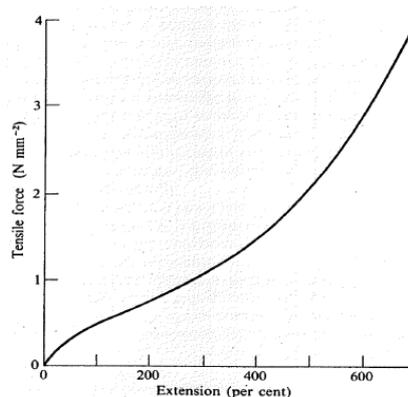


Figura 3:comportamento tipico di materiale non lineare

2.5 Cenni sui modelli statistici

Si presenta in questo paragrafo una breve trattazione della teoria alla base dei modelli statistici che sono i precursori dei modelli su base invarianti. Questi modelli sono definiti statistici perché il comportamento complessivo del materiale viene determinato come la somma statistica di tanti effetti rilevati sperimentalmente. L'ipotesi principale è quella di considerare il corpo discretizzato ad elementi finiti di volume come mostrato in Fig.4. Ciascun nodo dell'elemento si può considerare collegato da un sistema molla-smorzatore equivalente per simulare il comportamento non lineare Fig.5. L'insieme di molle e smorzatori viene definito "catena". La funzione delle catene è quella di non far variare il volume durante la deformazione [8].

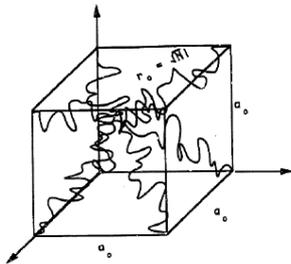


Figura 4: esempio di elemento con 8 catene [8]

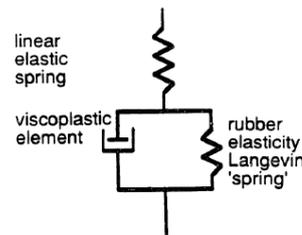


Figura 5: composizione della catena con molle e smorzatori [8]

Le ipotesi principali alla base della teoria statistica possono essere riassunte in cinque ipotesi principali [8]:

1. Le catene sono collegate trasversalmente da un numero di legami interni, il numero di legami è un numero intero e finito.
2. Ogni catena o segmento è collegato ad un'altra catena da un legame trasversale.
3. Incompressibilità dei legami trasversali.
4. Durante una deformazione, i punti di contatto tra le catene si muovono in modo che le componenti del vettore \mathbf{r} che li collega tra loro possano essere ottenute moltiplicando le stesse per la deformazione corrispondente come mostrato in figura 6.
5. L'entropia del reticolo complessivo soggetto a deformazione è pari alla somma dell'entropia di ogni singola catena.

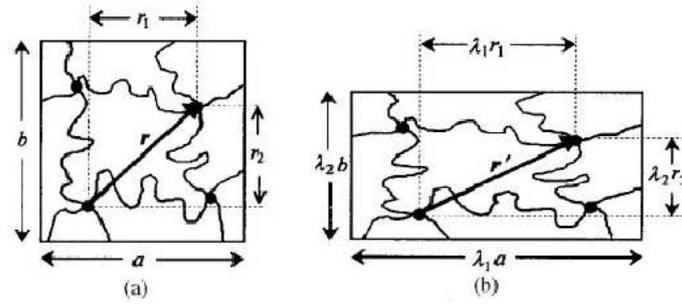


Figura 6:collegamenti delle catene nel reticolo

2.6 Modello di Arruda e Boyce

La prima evoluzione della teoria Gaussiana citata sopra è il modello studiato da Arruda e Boyce, quest'ultimo si basa sulla teoria statistica considerando gli elementi cubici con collegamenti a catene lineari lungo le diagonali principali, nel caso specifico si considerano 8 catene [9].

Si considera l'espressione della densità di energia di deformazione W del singolo elemento espressa nella formula 5:

$$W = Nk_B\theta\sqrt{n}[\beta\lambda_{catena} - \sqrt{m} \ln \frac{\sin\beta}{\beta}] \quad (5)$$

Con:

- N rappresenta il numero di segmenti che formano la catena;
- m è il numero delle catene della maglia;
- k_B rappresenta la costante di Boltzman;
- θ la temperatura assoluta;
- λ allungamenti principali.

Se si considerano uguali gli allungamenti principali si ottiene:

$$\lambda_{catena} = \sqrt{\frac{I_1}{3}}, \quad \sum_{i=1}^3 \lambda_i^2 = I_1 \quad (6)$$

Invece β si calcola utilizzando la funzione di Langevin:

$$\beta = L^{-1}\left(\frac{\lambda_{catena}}{\sqrt{m}}\right) \quad (7)$$

2.7 Modelli su base invariante

I modelli su base invariante sono nati in seguito ai modelli gaussiani con l'obiettivo di rappresentare le classi di materiali con comportamento fortemente non lineare. Differiscono dai modelli precedenti poiché non considerano le catene come degli equivalenti di elementi meccanici, ma si riferiscono direttamente alla legge di Hooke adattata per grandi deformazioni applicate a volumi finiti di materiale [6]. Nei modelli basati sulla meccanica statistica si fa riferimento al primo invariante del tensore delle deformazioni I_1 ; nel modello su base invariante si fa riferimento invece ai tre invarianti del tensore delle deformazioni C . Questa teoria venne formulata per la prima volta da Mooney e Rivlin definendo la densità di energia di deformazione come la combinazione dei primi due invarianti per il materiale iperelastico incomprimibile.

Nella formulazione di W per materiale incomprimibile si ha la seguente formula generale:

$$W_{M-R} = \sum_{i,j=0} C_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (8)$$

Questa formula è stata molto studiata adattandola con parametri e termini tenendo conto del coefficiente di comprimibilità oppure arrendandola al primo termine, tuttavia il modello che più interessa la trattazione della comprimibilità degli acini d'uva è il modello di Ogden che si presenta sempre su base invariante ed è uno tra i modelli più popolari nell'ambito dei materiali iperelastici poiché tratta deformazioni che arrivano sino al 700%.

$$W = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (9)$$

Dove N , α_p , μ_p sono le costanti che caratterizzano il materiale, come detto sopra i modelli di Ogden sono una rielaborazione del modello Neo-Hookoniano e del modello di Mooney-Rivlin infatti per $N=1$ ed $\alpha_1=2$ si ottiene esattamente il modello Neo-Hookoniano, per $N=2$, $\alpha_1=2$ e $\mu_1=-2$ si ottiene il modello di Mooney-Rivlin.

2.8 Cenni ai modelli Neo-Hookoniano

Come accennato nel capitolo precedente, il modello Neo-Hookoniano è un modello utilizzato per prevedere le grandi deformazioni nei materiali iperelastici e si basa principalmente sulla legge di Hooke. Contrariamente al nome si utilizza per materiali fortemente non lineari poiché la curva sforzo-deformazione è fortemente non lineare. La relazione tra lo sforzo applicato e la deformazione è lineare, ma a partire da una certa sollecitazione in poi la curva tensione-deformazione assumerà un massimo che rimarrà costante (plateau). Il modello neo-hookoniano non considera il fenomeno

dell'energia dissipata sotto forma di calore mentre si tende il materiale e si assume una perfetta elasticità durante tutte le fasi della deformazione. Questo modello si basa sulla termodinamica statistica ed è utilizzabile per materiali plastici e materiali simili alla gomma. Questo modello ha il limite di non prevedere un aumento del modulo elastico in caso di grandi deformazioni ed è accurato per deformazioni inferiori al 20%. Per le deformazioni bi-assiali non è adatto e si utilizza il modello di Mooney-Rivlin che verrà brevemente trattato nel paragrafo successivo.

Si presentano in seguito le principali formule del modello:

$$W = K_1(I_1 - 3) \quad (10)$$

Con:

W = energia di deformazione;

K_1 = costante elastica del materiale;

I_1 = primo invariante o traccia del tensore delle deformazioni;

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (11)$$

Con

λ_i^j tensioni principali

La densità dell'energia di deformazione per un materiale sottoposto a compressione il modello Neo-Hookeoniano si può esprimere come:

$$W = K_1 \cdot (I_1 - 3 - 2 \cdot \ln J) + D_1 \cdot (J - 1)^2 \quad (12)$$

Con:

$$J = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3$$

D_1 = costante del materiale dipendente dai legami tra le catene del materiale (si rimanda alla fig.4)

2.9 Modello di Mooney-Rivlin

Il modello di Mooney Rivlin è un'evoluzione del modello di Rivlin per materiali iperelastici e si utilizza negli stati di tensione bi-assiale [4]. La funzione della densità di energia di deformazione è una combinazione lineare dei due invarianti del tensore delle deformazioni di Cauchy-Green ed è espressa come segue:

$$W = C_1(N_1 - 3) + C_2(N_2 - 3) \quad (13)$$

Con:

C_1, C_2 costanti empiriche che dipendono dal materiale compresso;

$$N_1 = J^{-2/3} I_1$$

$$N_2 = J^{-4/3} I_2$$

Si considerano I_1 e I_2 gli invarianti del tensore

Si considera $J = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3$ con λ_i^j tensioni principali.

3 Normativa di riferimento ASAE 368

In questo capitolo si espone una breve trattazione della normativa di riferimento per test di compressione di alimenti di forma complessa.

Le prove di compressione forniscono un importante metodo di studio per poter effettuare controlli di qualità e definire i carichi massimi ammissibili per minimizzare i danni al prodotto. Per questo motivo sono largamente utilizzate nell'industria e necessitano di essere paragonabili e di fornire dati utilizzabili a prescindere dalle modalità in cui sono state svolte.

I risultati sono applicabili a carichi di tipo quasi-statico piuttosto che a carichi dinamici. Le equazioni che vengono utilizzate provengono da teorie di contatto tra superfici convesse di materiali elastici, anche se riferendosi al caso di studio degli acini d'uva, questi mostrano proprietà non lineari con deformazioni superiori al 5% circa. Questi test sono in grado di fornire informazioni che possono essere utilizzate per determinare quantitativamente le differenze causate da fattori come varietà, umidità, metodo di conservazione, grado di maturazione e tecniche di lavorazione. L'applicabilità delle analisi può essere confermata diagrammando in scala logaritmica la forza o il carico applicati in funzione della deformazione.

Fattori come la preparazione del campione prima di effettuare le prove e le geometrie e velocità di carico possono influenzare notevolmente i risultati di queste prove. E' preferibile standardizzare la prova le procedure da effettuare in modo da poter comparare diversi test sapendo che, se sono stati svolti seguendo le indicazioni della normativa, forniscono dati confrontabili [10].

Come si può vedere dalle curve carico deformazione di fig.6 si possono ricavare numerosi dati utili alla valutazione della qualità e delle caratteristiche del prodotto, essendo questo non omogeneo. Si possono ricavare:

-Modulo di elasticità apparente: il modulo E di materiali alimentari, che sono relativamente solidi e omogenei, si può stimare usando alcune equazioni basate sulla teoria di Hertz per forze di contatto

usate nella meccanica dei solidi. Le equazioni di Hertz assumono che le deformazioni siano molto piccole e che il materiale sottoposto a compressione sia elastico. In campo alimentare queste sono approssimazioni molto forti.

-*Punto di flesso*: una tipica curva sforzo-deformazione è prima convessa e poi concava; dalla matematica è noto che il punto in cui la derivata seconda si annulla è quello in cui si ha il cambio di pendenza, questo suggerisce che stia avvenendo qualche fenomeno strutturale. Quando si eseguono misure con l'intento di ottenere il modulo di elasticità e altre proprietà, le deformazioni devono essere mantenute nel primo tratto di curva, senza superare il punto di flesso.

-*Sforzo di contatto massimo*: massima forza scambiata tra macchina e campione, che si presenta al centro della superficie di contatto.

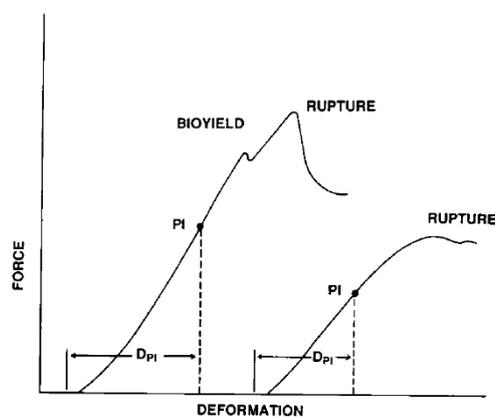


Figura 7: curva carico-deformazione [10]

Nel caso delle prove di compressione degli acini d'uva è stato scelto il tipo di contatto d presente nella figura 7 poiché ai fini della confrontabilità dei risultati delle prove era più opportuno ricavare dei campioni prismatici uguali vista sfericità e le differenze di diametro degli acini. La procedura che segue, coerente con la normativa di riferimento, riguarda la prima parte dello studio cioè la prova di compressione relativa alla caratterizzazione del materiale e delle sue caratteristiche, tuttavia le prove devono essere eseguite anche sul componente. Le prove che si eseguono sui cibi per determinarne le proprietà della struttura e della consistenza sono le prove TPA.

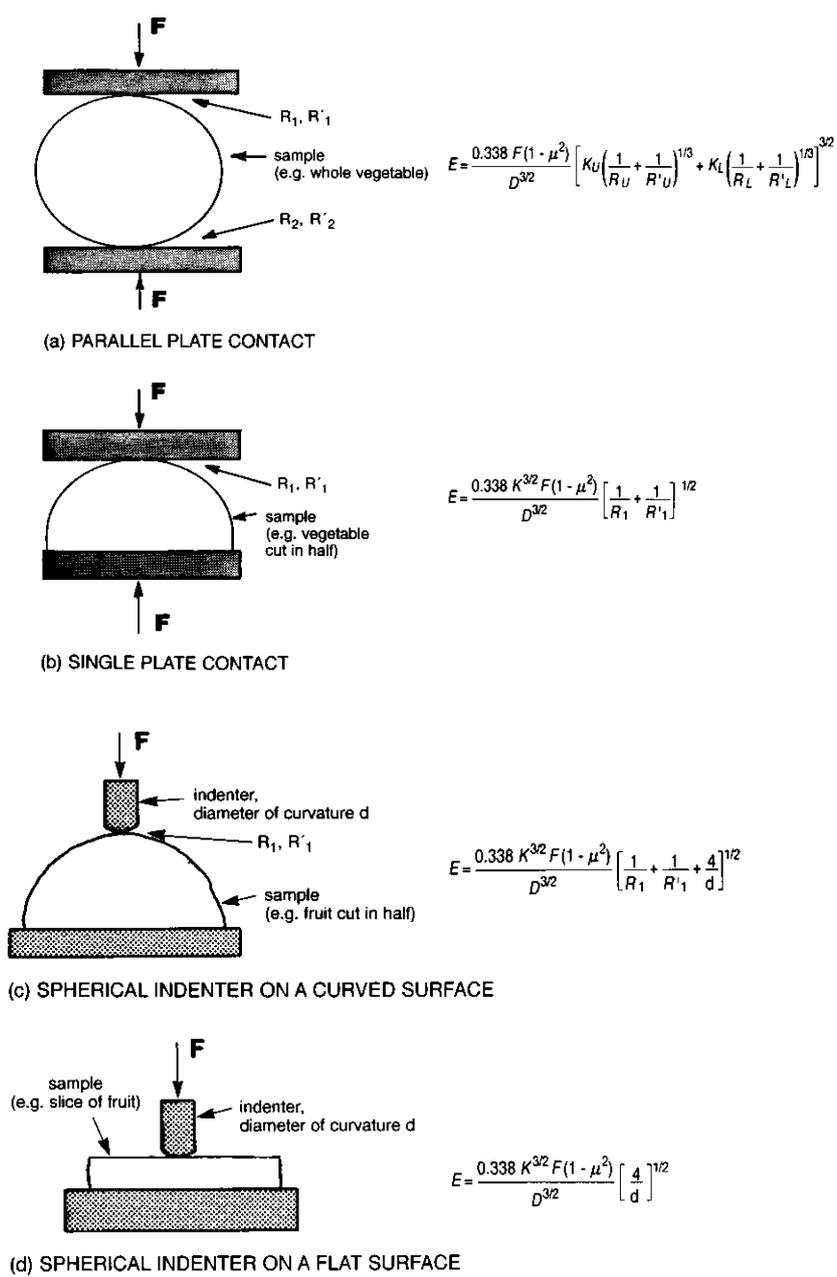


Figura 8: schema del contatto tra campione e pressa

Le formule espresse descritte in Fig.8 derivano dalla teoria del Contatto Hertziano in particolare il caso di contatto sfera-piano che è rappresentato in fig.8a ed il contatto piano-piano in riferimento alla fig.8d. Nel caso della fig. 8a la sfera è rappresentata dall'acino intero che viene compresso assialmente, come mostrato nella formula a fianco della figura il modulo di elasticità E è inversamente proporzionale alla somma dei raggi R_u e R_l . Nel caso della fig.8d, che rappresenta il caso delle prove eseguite in Laboratorio, l'area di contatto non è puntiforme tra sfera/acino e piano, ma è data da un rettangolo poiché il contatto è dato dalla sezione centrale del frutto e la piastra. In questo caso la formula del modulo E considera il diametro di curvatura del punzone d ed il diametro dell'acino che corrisponde alla larghezza della sezione stessa.

4 Prova TPA (Food Texture Profile Analysis)

In questo capitolo viene analizzata la prova TPA eseguita in Laboratorio per la caratterizzazione degli acini.

La prova TPA (*Texture Profile Analysis*) consiste in una prova di doppia compressione ed è utilizzata per determinare la consistenza dei cibi. Durante una prova TPA, i campioni sono compressi due volte utilizzando uno strumento capace di fornire informazioni sul comportamento interno del materiale durante la compressione e masticazione. Il test TPA viene chiamato anche “*two bite test*” in quanto viene imitata l’azione della masticazione.

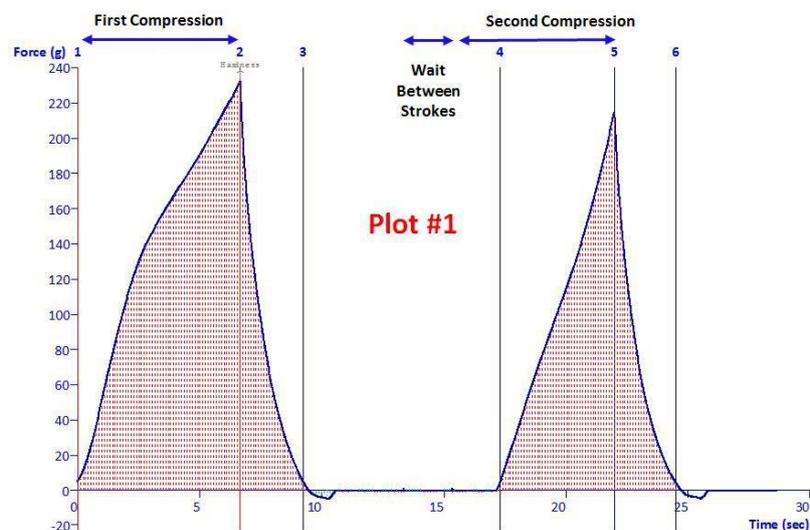


Figura 9: prova TPA

Le caratteristiche della polpa dei cibi difficilmente si riescono a esprimere mediante singole proprietà come durezza o compattezza poiché la struttura è variegata e non è sufficiente un singolo parametro per definirne tutte le caratteristiche. Il punto di forza del test TPA è proprio quello di riuscire a quantificare e fornire diversi parametri attraverso un solo esperimento. Per questo motivo la comunità scientifica le utilizza per ricavare le proprietà dei frutti in modo da poterli valutare oggettivamente.

La procedura *Texture Profile Analysis* (TPA) ha come riferimento la normativa UNI EN ISO 5492:2008, e si intende con “*texture*” l’insieme di tutte quelle proprietà che si percepiscono con i diversi sensi coinvolti come nel caso della masticazione. Dal momento che queste caratteristiche fanno riferimento a diversi sensi, si preferisce considerare delle “*textural properties*”, indicando in questo modo un gruppo di proprietà del materiale anziché il singolo parametro della texture. Questi parametri possono essere misurati empiricamente e permettono di correlare esperienze sensoriali a

dati oggettivi, costituendo un collegamento tra le richieste o le preferenze di un consumatore e le qualità della materia prima [11].

5 Prove meccaniche

In questo capitolo, dopo aver riassunto brevemente le caratteristiche delle macchine di prova secondo la normativa vigente, vengono analizzate le prove meccaniche eseguite in Laboratorio per la caratterizzazione degli acini.

5.1 Caratteristiche dei macchinari di prova

È necessario definire le procedure e i macchinari utilizzati per effettuare le prove di caratterizzazione del materiale:

-Macchina di prova e strumentazione utilizzata: è necessario avere un meccanismo guida in grado di impartire alla traversa una velocità costante rispetto alla base. La traversa deve poter ripetere il movimento con una precisione dell'1%. Servono inoltre una cella di carico in grado di acquisire il carico totale applicato al campione sottoposto alla prova e uno strumento in grado di registrare la variazione di posizione della traversa durante lo svolgimento della prova con un'incertezza dello 0,5% dell'unità di formato dello strumento.

- Punzone: L'utensile di compressione (Figura 8) deve essere anch'esso standardizzato e scelto in base alla tipologia di campione che si va a sottoporre a prova, ad esempio il pistone cilindrico da 8 mm è viene raccomandato nel caso di prove sulla frutta. Nel caso di campioni teneri, il frutto può essere tagliato a metà in modo che la deformazione della faccia inferiore si possa trascurare a causa della grande area di contatto. Se tagliare a metà il campione è impossibile, si può usare la prova a piani paralleli ("*parallel plates*").

-Campione da sottoporre alla prova: i campioni vengono sottoposti a prova nella loro forma e dimensione naturale dopo essere stati posti in appropriati supporti. Se devono essere effettuate misurazioni di forza e deformazione, è consigliato effettuare misurazioni di forma, dimensione, peso e colore e anche di contenuti in zuccheri e amido prima di effettuare le prove. Per prove più accurate è necessario misurare i raggi di curvatura dei campioni o qualora non sia possibile eseguire misure accurate con adeguati strumenti come proiettori di profili o profilometri è bene stimarli basandosi su modelli matematici idonei al tipo di materiale. Nella fig.10 si presenta un esempio di campione da sottoporre a compressione.



Figura 10: esempio di campione di prova

-Condizionamento: i campioni devono essere condizionati alla temperatura e umidità relativa desiderate prima di effettuare la prova. Frutta e verdura normalmente richiedono poche ore per adeguare la loro temperatura a quella dell'ambiente in cui si trovano. Sementi dure e cereali invece possono necessitare di giorni prima che il contenuto di umidità si adegui a quello richiesto. La misura essendo eseguita in ambiente controllato anche l'umidità del campione deve essere misurata.

-Numerosità del campione: ciascuna prova deve essere effettuata un numero di volte sufficiente a fornire un risultato statisticamente valido. Le variazioni di forma, dimensioni e invecchiamento normalmente sono tali da richiedere almeno che 20 campioni vengano sottoposti a prova per ciascuna caratterizzazione.

5.2 Prove di compressione per la caratterizzazione del materiale.

Per realizzare il modello FEM, che verrà presentato al termine dell'elaborato, sono state effettuate alcune prove di compressione in controllo di spostamento presso il Laboratorio di Meccanica del Politecnico di Torino. Le prove sono state effettuate su un campione di sei diversi acini di Moscato d'Amburgo, tre con la pelle e tre senza. Il campione è composto da acini con dimensione molto simile tra loro; ciascun acino è stato tagliato in tre parti parallelamente all'Equatore, per ottenere la parte centrale dell'acino prossima ad un cilindro dall'altezza ridotta come si può vedere in Fig.10. Il campione risulta ridotto rispetto ad un campione statisticamente significativo poiché la caratterizzazione del materiale si proponeva come conferma di dati già ottenuti in precedenza. Nel paragrafo successivo alcuni cenni agli studi ed ai dati ottenuti.

La macchina di prova presenta una traversa mobile in grado di controllare il movimento con una accuratezza dell'1%. La compressione è stata effettuata utilizzando una cella di carico idonea con un carico pari a 10 N e con una velocità di deformazione del punzone di 1 mm/min. Prima di sottoporre l'acino alla compressione, come si può vedere in Tab.1,2, è stato misurato con un calibro analogico il diametro iniziale $\phi_{iniziale}$ della porzione dell'acino e l'altezza h della sezione dello stesso. Al termine della compressione, prelevata la porzione di acino dalla macchina con lo stesso strumento è stato misurato il diametro finale ϕ_{finale} . La temperatura di svolgimento della prova è quella dell'ambiente del Laboratorio pari a 22°C. Gli acini sono rimasti in laboratorio in stabilizzazione per circa 1 ora prima della prova.

5.2.1 Cenni agli studi precedenti sulla compressione degli acini.

La letteratura sull'analisi di compressione di materiali organici presenta alcuni studi svolti sulla compressione degli acini con e senza pelle con il fine di determinarne la dimensione degli acini.

L'analisi delle texture è una tecnica analitica utilizzata nell'industria alimentare per la valutazione delle caratteristiche meccaniche e fisiche sia delle materie prime che dei prodotti finiti. Le proprietà meccaniche delle uve da tavola, acquisite utilizzando macchine di prova universali con sonde specifiche, possono essere di interesse nei settori della viticoltura e post-raccolta per riconoscere il potenziale di ciascuna varietà e contribuire a soddisfare le esigenze del mercato [3]. Tra i diversi parametri meccanici misurabili, lo spessore e la durezza della buccia di bacche.

La dimensione del campione viene calcolata con la seguente equazione:

$$N = \left[\frac{t_{n-1, \alpha} S}{L} \right]^2 \quad (14)$$

con:

- $t_{n-1, \alpha}$ è il valore della distribuzione t di Student (utilizzata per un piccolo campione);
- livello di confidenza $1-\alpha$ (con $K=2$ probabilità=95%)
- S è la deviazione standard del campione;
- L è la larghezza dell'intero intervallo di confidenza atteso;
- N è la dimensione del campione;

Un altro studio svolto presso il Politecnico di Torino è quello della stima del modulo elastico E dell'acino analizzando diverse tipologie di acini e sottoponendoli a prove di compressione, attraverso

un metodo di reverse engineering al fine di ottenere una correlazione tra sforzo e deformazione degli acini. Con una deformazione di circa 0,091 mm dell'acino si ottiene un E pari a 0,103 Mpa con una forza di circa 1N [13].

6 Calibrazione del modello costitutivo

In questo capitolo si descrive la calibrazione del modello e si espongono risultati ottenuti dalla prova di compressione.

Le seguenti tabelle raggruppano i parametri costitutivi dei campioni descritti nel precedente capitolo.

Acino	Φ_{iniziale} (mm)	Φ_{finale} (mm)	h(mm)	s_traversa (mm)
1	20	22	9.5	3.6
2	22	24	11	4.1
3	25	28	7	4.3

Tabella 1: prove di compressione acini senza pelle

Acino	Φ_{iniziale} (mm)	Φ_{finale} (mm)	h(mm)	s_traversa (mm)
4	26	27	9	3.5
5	26	26	8	3.1
6	24	26	7	3.6

Tabella 2: prove di compressione acini con la pelle

Confrontando i diametri delle sezioni ottenuti dopo la compressione si può vedere come nella tab.2 gli acini con la pelle abbiano subito a seguito della compressione un aumento di diametro più contenuto rispetto a quelli senza la pelle, questo dimostra l'importanza della stessa come margine contenitivo della polpa, pertanto tolta quest'ultima o danneggiata la polpa l'acino risulta più fragile ad urti o al deterioramento.

Nella Figura 11, che rappresenta una foto scattata durante le prove in laboratorio, si mostra come la porzione di acino sia compressa seguendo la normativa che consiglia per i frutti di utilizzare un punzone centrale agente su di una porzione il più possibile piatta di materiale.



Figura 11: sezione di acino da comprimere

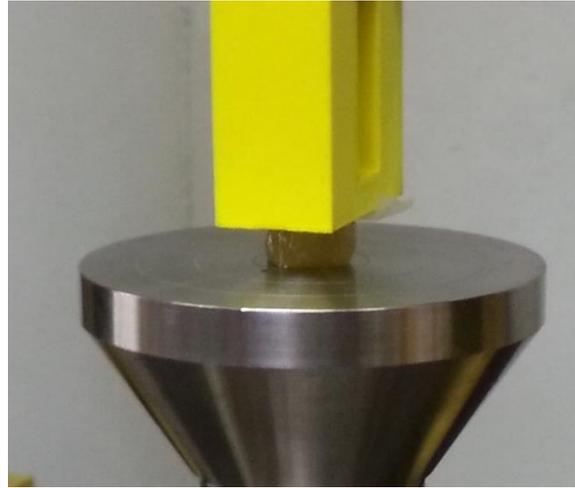


Figura 12: acino sottoposto a compressione

Dalla figura 13, che rappresenta l'acino compresso, si può notare che i semi presenti nella parte centrale dell'acino non siano stati rimossi per evitare che la struttura dello stesso si indebolisse ulteriormente rendendo la prova più difficile essendo l'acino già privato della pelle.



Figura 13: acino privo di pelle dopo la prova di compressione

6.1 Curva caratteristica del materiale

Dopo aver compresso il campione di acini e ricavato tutte i dati riassunti nelle tabelle del paragrafo precedente, utilizzando i dati ottenuti dalla macchina di prova, si è delineata la curva sperimentale di compressione. La fig.14 conferma l'ipotesi iniziale del comportamento non lineare del materiale e rappresenta le curve sperimentali forza-spostamento della traversa della macchina di prova per i provini esaminati. In figura si diagramma la deformazione degli acini in funzione del carico crescente.

Le curve 1 e 2 che rappresentano rispettivamente il primo ed il secondo acino hanno un andamento non lineare soprattutto verso il termine della prova con i carichi più elevati; per quanto riguarda gli altri acini e le altre curve, come la 5, è più difficile comprendere l'andamento subito crescente e quasi parabolico che si rappresenta un materiale con un comportamento non lineare o lineare a tratti ma ben differente da quello già citato di Fig.2. Le motivazioni di questo andamento potrebbero essere molteplici come la presenza dei semi, la consistenza di un acino con differente grado di maturazione o la forma del campione non del tutto regolare con facce non parallele vista la morfologia dell'acino stesso irregolare.

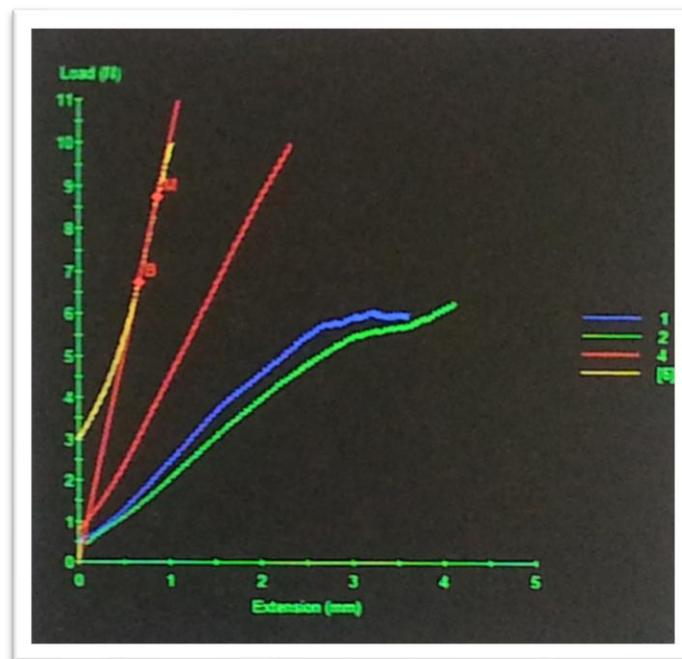


Figura 14: curve forza-spostamento traversa

6.2 Analisi con *Ansys Benchmark* e *Hyperfit* del modello costitutivo

La seconda parte dell'elaborato si articola con l'esecuzione delle prove sugli acini caratterizzati con la prova TPA. La curva tensione-deformazione ottenuta in laboratorio per ciascun acino viene in seguito analizzata con i softwares Ansys Benchmark e Hyperfit per ricavare dei parametri ottimizzati da inserire nell'equazione caratteristica del modello di Ogden per i materiali iperelastici. Si rimanda al seguente capitolo la trattazione del Modello di Ogden. La sequenza dei passaggi svolti al fine di ottenere tali valori validi e confrontabili per descrivere il comportamento della polpa degli acini è la seguente:

- Sottoporre gli acini alla prova di compressione
- Ricavare la curva forza-deformazione per ciascun acino

- Tracciare la curva Forza Deformazione sperimentale con il programma Hyperfit ed ricavare i primi parametri sperimentali dell'equazione del modello di Ogden;
- Analogamente al passaggio precedente tracciare la curva con il software Ansys Benchmark per ottenere i valori dei parametri dell'equazione di Ogden per poter effettuare un confronto;
- Analizzare e comparare i parametri ottenuti in funzione della dimensione degli acini
- Utilizzare i parametri ottenuti sopra per una simulazione FEM della compressione dell'acino.

La curva forza deformazione ottenuta in laboratorio, come si può vedere in fig.15, presenta due tratti: il primo con andamento quasi lineare è il tratto di compressione ed il secondo con un andamento parabolico è il tratto in scarico; l'area sottesa dalle due curve rappresenta l'energia dissipata durante la deformazione dell'acino.

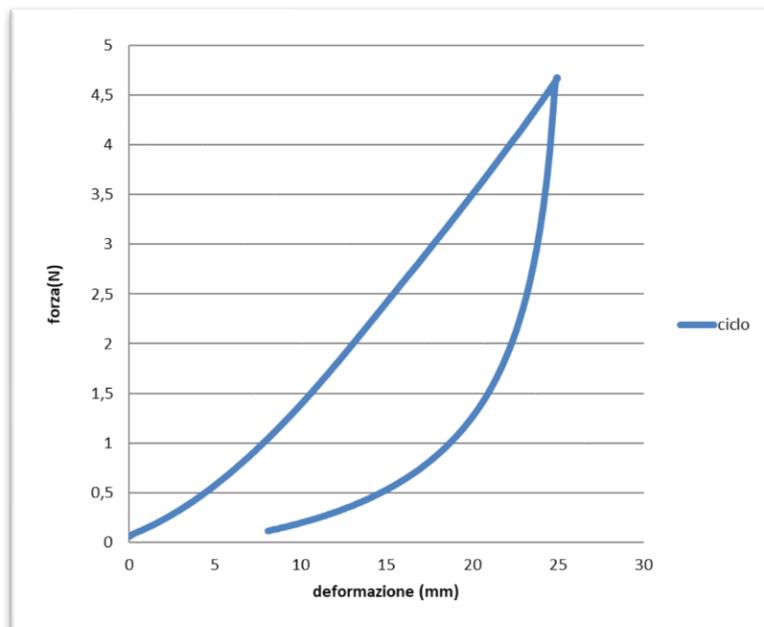


Figura 15: diagramma forza-deformazione

6.3 Brevi richiami sul modello di Ogden

I modelli utilizzati per descrivere il comportamento di un materiale iperelastico, si suddividono in base a come si interpreta la deformazione dello stesso, se dal punto di vista fenomenologico-statistico oppure dal punto di vista della deformazione micromeccanica del materiale (*invariant based*). Un metodo per scegliere il modello matematico più rappresentativo è quello di basarsi sulla deformazione percentuale del corpo, come descritto nel capitolo 2.8, non tutti i modelli che descrivono il

comportamento a trazione-compressione dei materiali sono adatti. Nel caso di materiali iperelastici la deformazione supera solitamente nelle prove sperimentali il 20% pertanto si deve ricorrere per lo studio della deformazione a modelli che contemplino una percentuale maggiore di deformazione. La deformazione che sperimentalmente è stata studiata in letteratura per i materiali iperelastici è espressa nel prossimo paragrafo e viene definita spesso come deformazione attesa, cioè quella che ci si aspetta di confrontare tra i modelli matematico-statistici e le prove sperimentali. In letteratura si considera una deformazione attesa per i modelli di Neo-Hookeiani sia nel caso di parziale compressibilità che incompressibilità del 30%, per i modelli Mooney-Rivlin e polinomiale del 200% e 300% rispettivamente e per il modello di Ogden del 700% [7].

Nei modelli costitutivi degli acini si deve considerare la non-linearità dei fenomeni di danneggiamento che si verificano durante il test di compressione. Poiché è complesso considerare un modello analitico per i materiali organici che non presentano deformazione elastica lineare, in letteratura questo problema è stato affrontato utilizzando due diversi modelli analitici: uno per la fase di compressione (modello *hyperfoam*) e l'altro relativo alle fasi di scarico-ricarica (effetto Mullins). L'analisi dell'effetto Mullins è stata effettuata per tutti gli acini, ma non viene riportata nell'elaborato perchè la differenza tra i parametri sperimentali ricavati dai due modelli è inferiore allo 0,1%. Al fine di utilizzare questi parametri per un modello FEM, che viene realizzato con una risoluzione dei parametri con al massimo 3 cifre decimali contro le 5 dei parametri dei modelli citati, si utilizza il modello di Ogden.

Il modello di Ogden viene utilizzato principalmente in casi in cui il materiale presenta una notevole deformazione come nel caso delle gomme, in letteratura son presenti diverse formulazioni del modello con diversi gradi di complessità tuttavia alla base di tutti c'è il concetto di potenziale energetico che viene descritto con la seguente formula:

$$U(\lambda_i) = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left[\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} (J^{el})^{-\alpha_i \beta_i} - 1 \right] \quad (15)$$

dove:

- N rappresenta la lunghezza del modello che varia da 1 a 4
- α e β sono parametri che dipendono dal materiale e dalla temperatura e sono adimensionali
- μ è un parametro del materiale ed è legato ai carichi ed è espresso in MPa
- J rappresenta il rapporto di deformazione elastica
- λ rappresentano le tensioni principali
- β rappresenta il grado di compressibilità

$$J^{el} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \quad (16)$$

Il rapporto di deformazione elastica J è dato dal prodotto delle tre tensioni principali agenti sul corpo.

$$\beta_i = \frac{\nu_i}{1-2\nu_i} \quad (17)$$

Il grado di compressibilità è dato dal rapporto dei coefficienti di Poisson; generalmente si impone un coefficiente di Poisson tra 0,45 e 0,49 per ottenere la convergenza. Nel caso di studio utilizzando Ansys APDL gli unici parametri richiesti sono stati α e μ in numerosità crescente a seconda del modello interpolato.

Le formule sopra descritte differiscono dalle formule (16) e (17) della parte introduttiva della tesi perché sono le formule utilizzate dai software per le interpolazioni. Queste ultime sono trasparenti all'utente il quale vede il risultato e sono una rielaborazione delle formule base della teoria di Ogden per il caso di studio specifico, cioè ricavare i coefficienti α e μ in grado di rappresentare il comportamento dell'acino sottoposto a compressione.

6.4 Simulazione delle prove sul materiale

In questo capitolo si presentano i risultati ottenuti, i grafici con le simulazioni delle prove e tutti i passaggi svolti con il software per ottenere le simulazioni adeguate. Al termine del capitolo si presentano i coefficienti ottenuti in forma tabellare e la valutazione della validità degli stessi.

6.4.1 Passaggi preliminari per la definizione dei parametri

Nella scelta dei parametri ottimali per l'approssimazione delle curve sperimentali sono stati utilizzati due differenti programmi di calcolo. I primi parametri sono stati ricavati con il programma *open source* Hyperfit che viene utilizzato per interpolare modelli iperelastici e viscoelastici. In questo caso si è scelto di interpolare i diagrammi tensione deformazione per cinque differenti acini con il modello di Ogden a due e tre termini. Con questo software è necessario interpolare in due differenti tratti la

curva di carico e di scarico. Si presentano in seguito i coefficienti ottenuti con Hyperfit che verranno confrontati con quelli ottenuti con Ansys Workbench in un secondo momento.

6.4.2 Calibrazione dei modelli e calcolo dei coefficienti

L'intero elaborato si basa sull'analisi di cinque acini di moscato d'Amburgo (sintetizzato in tabella come "Mamb") sottoposti a prova TPA. Si presentano in tabella 3 le dimensioni dei diametri degli acini; le dimensioni variano tra 18 mm e 20 mm di diametro e queste dimensioni sono importanti da correlare con l'errore normalizzato effettuato durante le calibrazioni dei modelli a partire dai dati sperimentali per ottenere i coefficienti α e μ .

Acino	Diametro (mm)
mamb1	19.00
mamb2	18.40
mamb 3	19.06
mamb 4	18.53
mamb 5	20.11

Tabella 3: dimensione acini analizzati

6.4.3 mamb 1 (Moscato d'Amburgo acino 1)

Il diagramma 1 rappresenta la curva forza deformazione ricavata sperimentalmente con la prova di compressione per il primo acino, in seguito, si presentano i diagrammi ottenuti con i corrispondenti coefficienti del modello di Ogden ottenuti con Hyperfit e Ansys workbench.

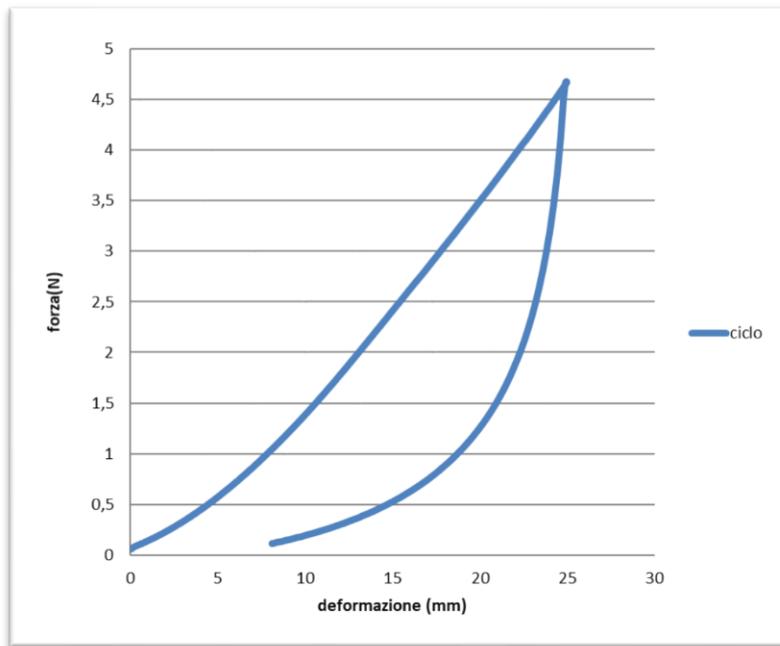


Diagramma 1: curva forza deformazione sperimentale *m-amb1*

Come prova preliminare, per la scelta del modello di Ogden più adeguato, è stato utilizzato un modello a due parametri. Il modello di Ogden espresso con la formula (15) può essere utilizzato con una numerosità di parametri variabili. All'aumentare di questi aumenta la complessità dell'interpolazione, trattandosi di una prova preliminare, si è scelto un modello a 2 parametri. È emerso già dal punto di vista grafico che dopo poche prove con i vari acini, che due soli parametri del modello non erano sufficienti per approssimare adeguatamente la curva del diagramma, come si può vedere nel diagramma 2 poiché la curva blu tracciata dal software per la calibrazione è visibilmente lontana dal sovrapporsi a quella rossa dei dati sperimentali, pertanto la calibrazione con due parametri non risulta adeguata.

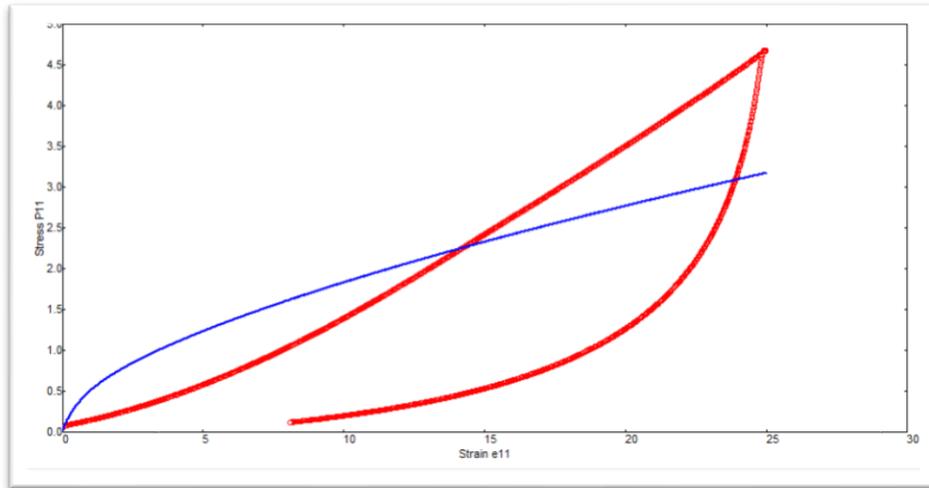


Diagramma 2: interpolazione *M-amb1* con Hyperfit

Si presenta in seguito il diagramma ottenuto con il modello a quattro parametri, la curva blu approssima ricalca maggiormente l'andamento della curva sperimentale.

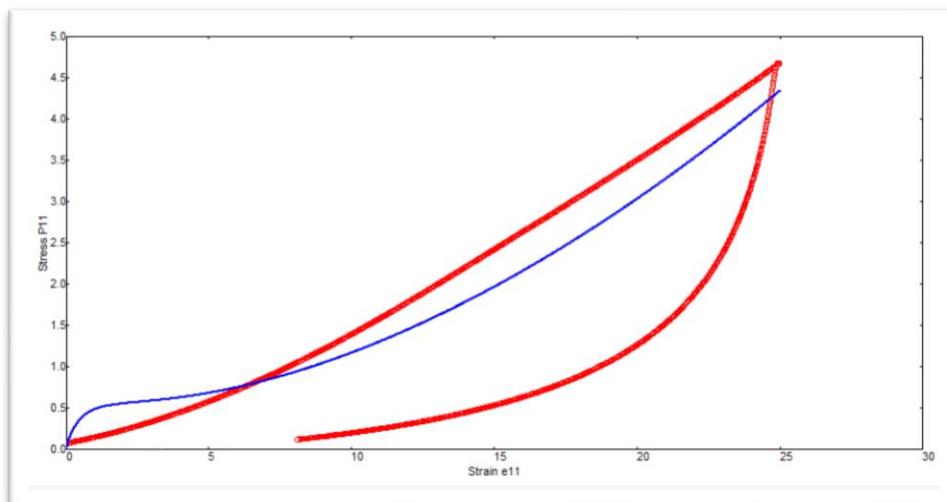


Diagramma 3: interpolazione con tre parametri

Verranno elencati più avanti i coefficienti ottenuti per i cinque acini con entrambi i programmi.

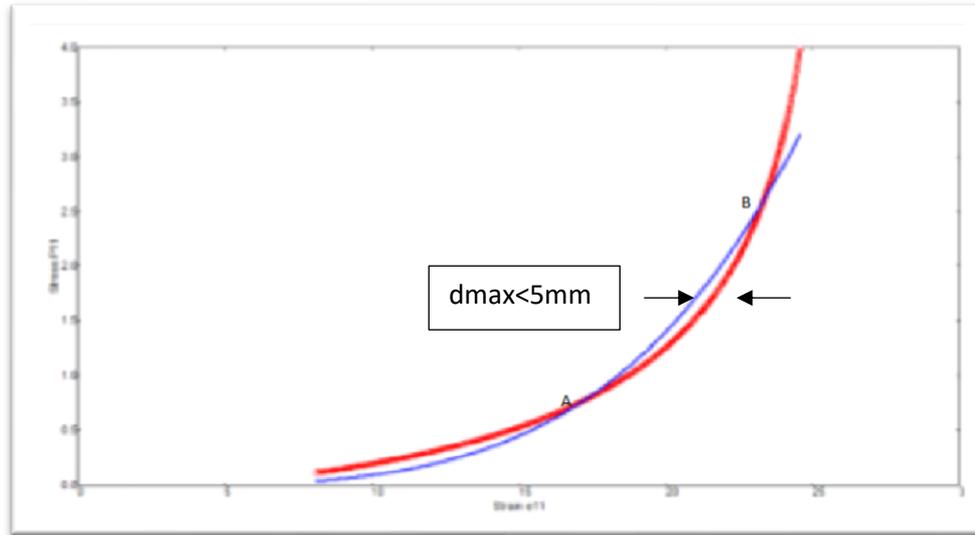


Diagramma 4: interpolazione tratto in scarico

Analizzando il tratto in scarico la curva blu interseca la curva rossa in due punti, è necessario definire un metodo per valutare se la curva di calibrazione con i parametri di Ogden è adeguata oppure non segue in modo soddisfacente l'andamento di quella rossa. Essendo i software trasparenti all'utente non è possibile definire un criterio numerico o quantitativo, si utilizza pertanto un criterio grafico sul digramma valutando le intersezioni tra le curve di calibrazione quella blu e quella dei dati sperimentali quella di colore rosso. Durante le simulazioni è emerso che le curve che sono visibilmente sovrapponibili sono quelle che si intersecano almeno in due punti (A e B in Diagramma 4). Riportando questo digramma su di un programma di disegno come Solidworks, calcolando la distanza massima tra le due curve tra i punti A, e B si può affermare che la sovrapposizione è adeguata se questa distanza non supera i 5mm.

Il diagramma 5 rappresenta invece l'interpolazione con il programma Ansys Workbench si considera la curva di scarico, il tratto blu più spesso rappresenta la curva sperimentale, invece il tratto più sottile rappresenta l'interpolazione, si evidenzia già graficamente una buona sovrapposizione delle curve, in questo caso non è stato necessario attuare alcun metodo grafico di validazione della sovrapposizione delle curve.

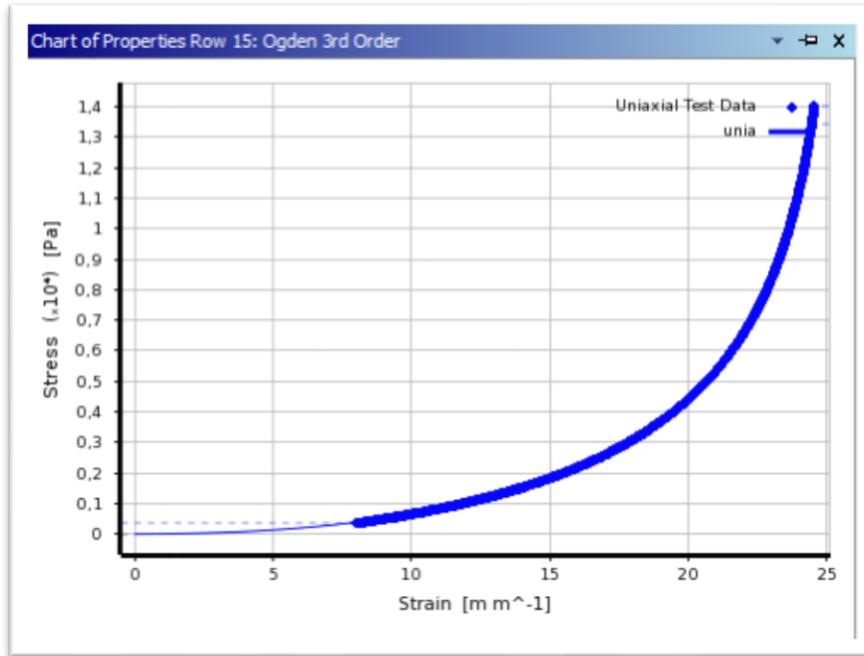


Diagramma 5: interpolazione *mamb1* con Ansys

Tabella riassuntiva dei parametri ottenuti:

mamb1	Hyperfit	Ansys
α_1	5.869	15.265
μ_1 (MPa)	0.000	0.000
α_2	0.310	4.624
μ_2 (Mpa)	0.443	0.022
α_3	0.061	3.461
μ_3 (Mpa)	2.870	1.463

Tabella 4: comparazione dei parametri ottenuti

6.4.4 mamb 2

Come per il primo acino si presentano in sequenza il diagramma sperimentale, la curva di scarico interpolata con Hyperfit e quella interpolata con Ansys, conclude il paragrafo la tabella comparativa dei coefficienti ottenuti.

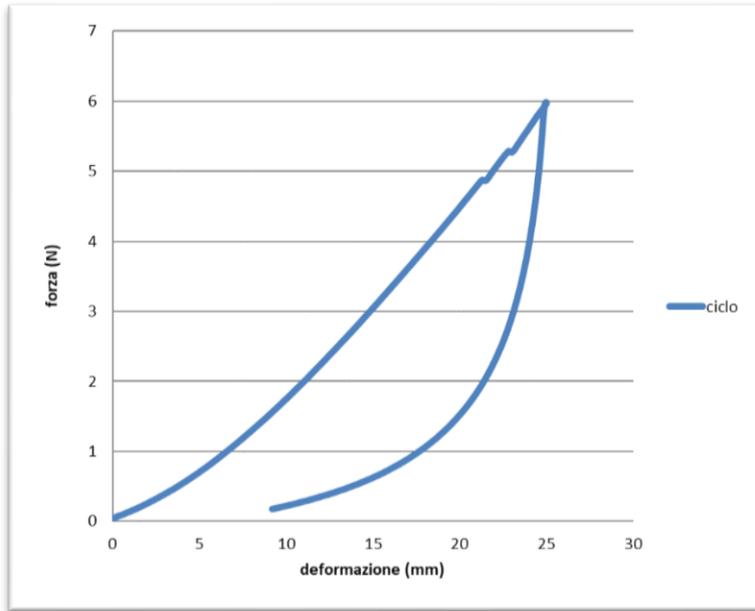


Diagramma 6: curva sperimentale

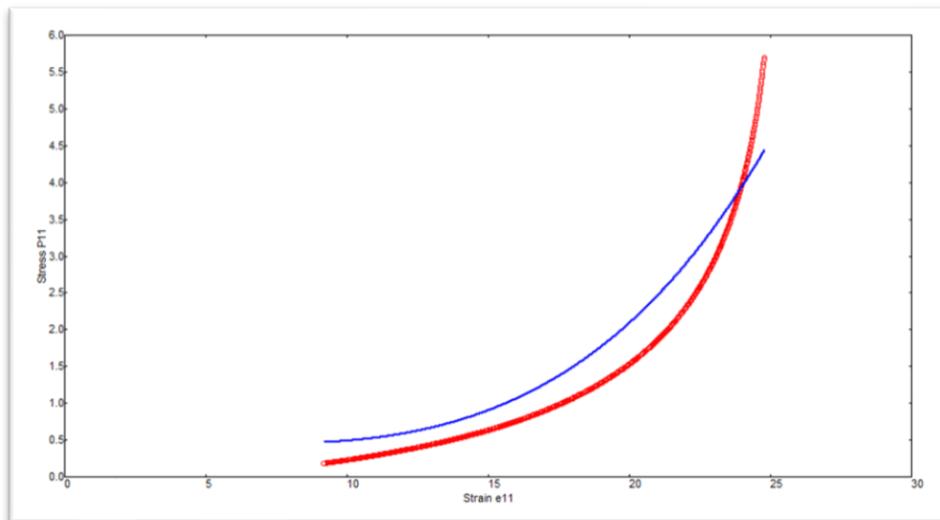


Diagramma 7: curva interpolata con Hyperfit

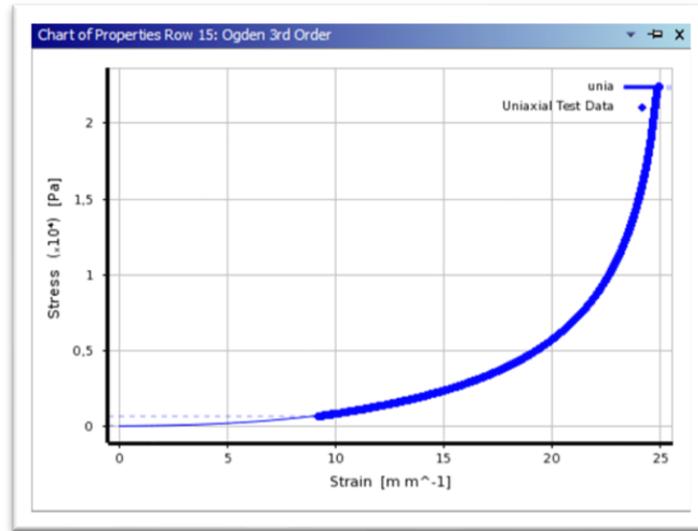


Diagramma 8: confronto tra curva simulata e sperimentale con Ansys

Tabella riassuntiva dei parametri:

mamb2	Hyperfit	Ansys
α_1	2,759	18,384
μ_1 (MPa)	0,015	0,000
α_2	1,600	5,381
μ_2 (Mpa)	-0,208	0,003
α_3	-0,015	3,359
μ_3 (Mpa)	31,190	2,536

Tabella 5: tabella coefficienti mamb 2

6.4.5 mamb 3

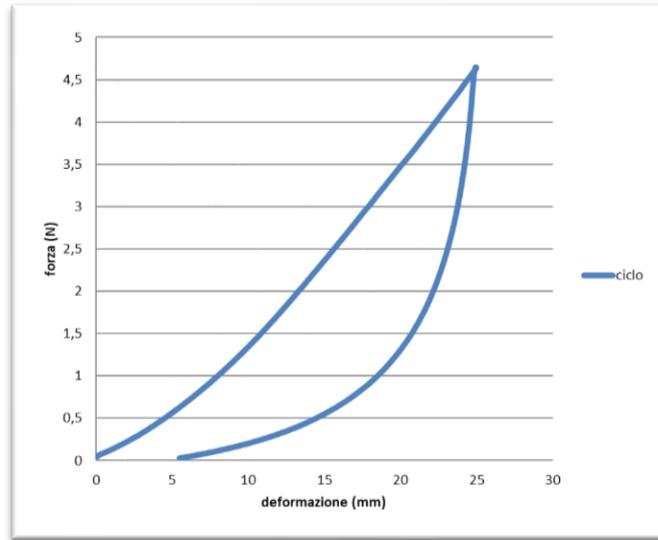


Diagramma 9: curva sperimentale mamb 3

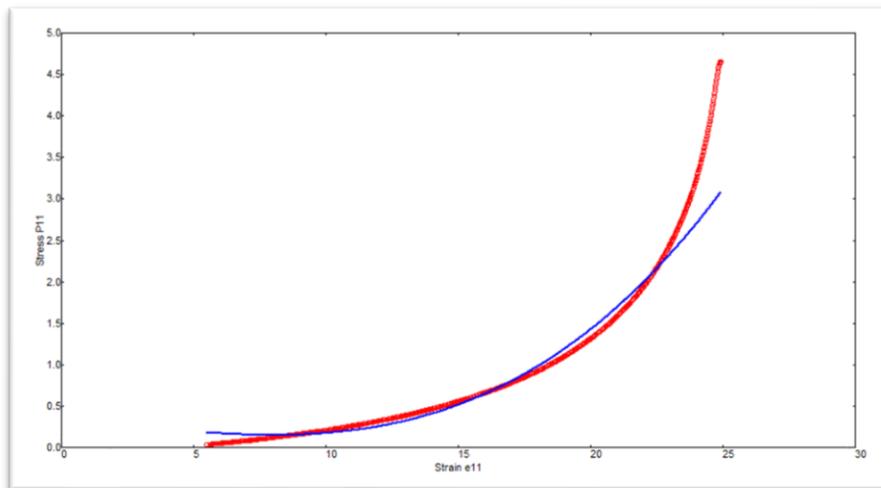


Diagramma 10: interpolazione con Hyperfit

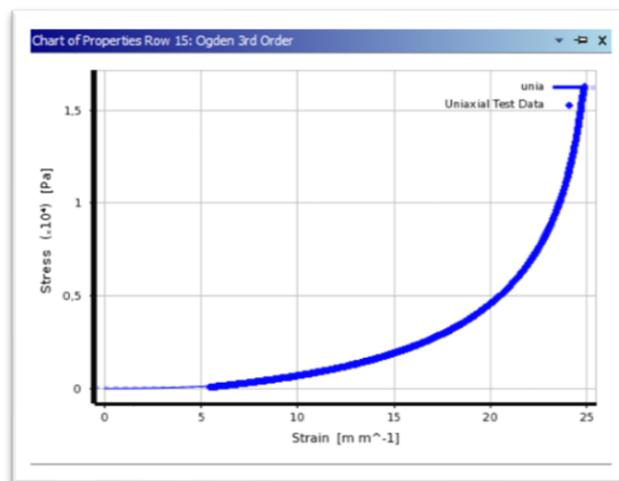


Diagramma 11: confronto tra curva simulata e sperimentale con Ansys

Tabella riassuntiva dei parametri:

mamb3	Hyperfit	Ansys
α_1	3,528	18,293
μ_1 (MPa)	2,333	0,000
α_2	-7,055	3,891
μ_2 (Mpa)	2,335	0,060
α_3	-0,541	3,891
μ_3 (Mpa)	-1,283	0,597

Tabella 6: coefficienti mamb 3

6.4.6 mamb 4

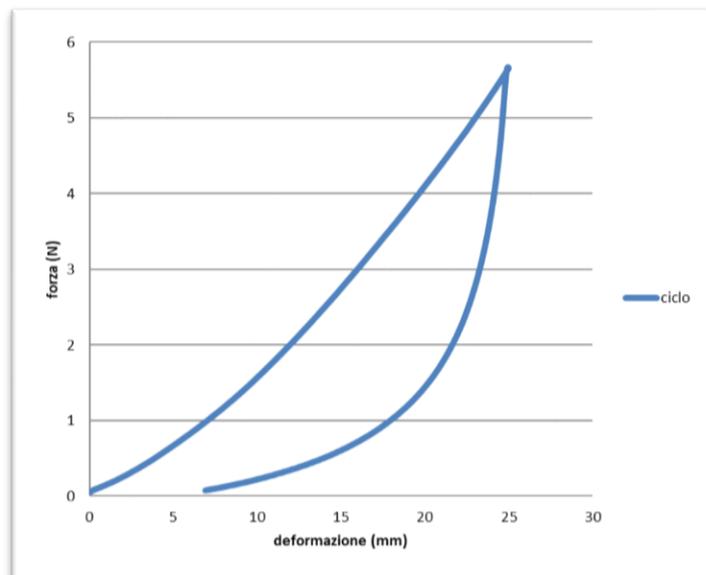


Diagramma 12: curva sperimentale

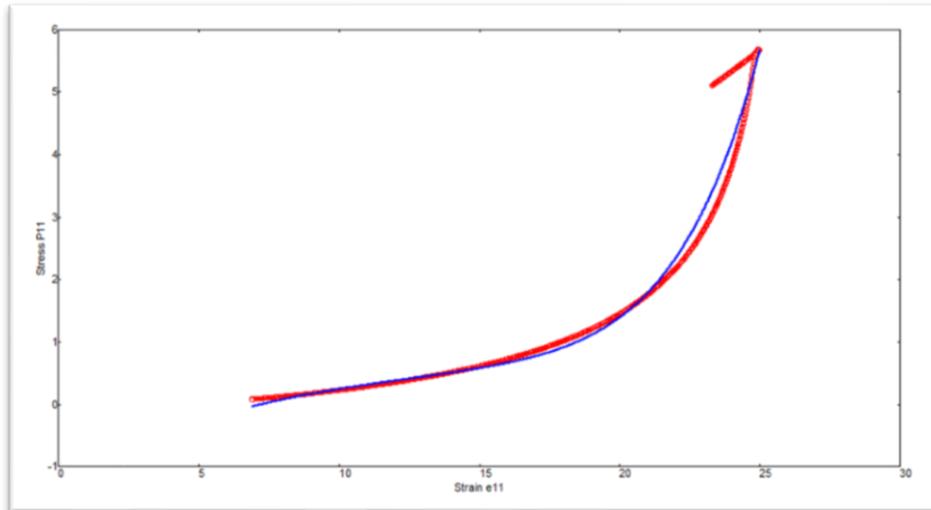


Diagramma 13: curva interpolata con Hyperfit

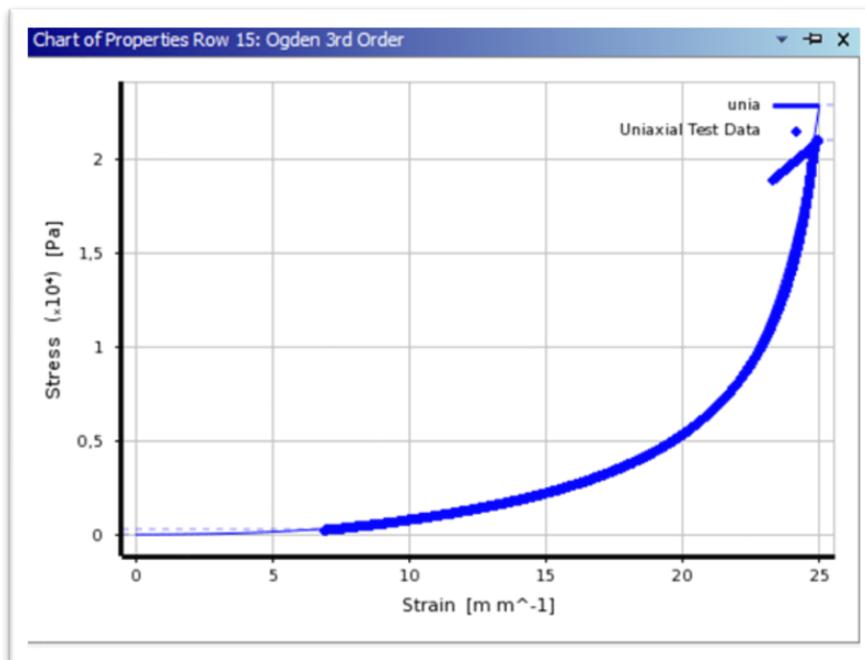


Diagramma 14: confronto tra curva simulata e sperimentale con Ansys

Tabella riassuntiva dei coefficienti:

mamb3	Hyperfit	Ansys
α_1	10,021	17,187
μ_1 (MPa)	0,000	1,746E-19
α_2	1,026	3,823
μ_2 (Mpa)	1,345	0,420
α_3	31,129	3,823
μ_3 (Mpa)	-0,121	0,482

Tabella 7: coefficienti mamb 4

6.4.7 mamb 5

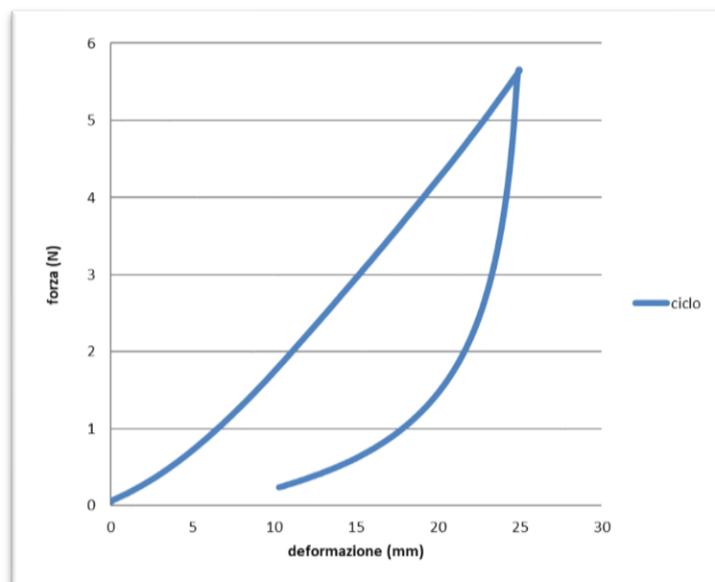


Diagramma 15: curva sperimentale

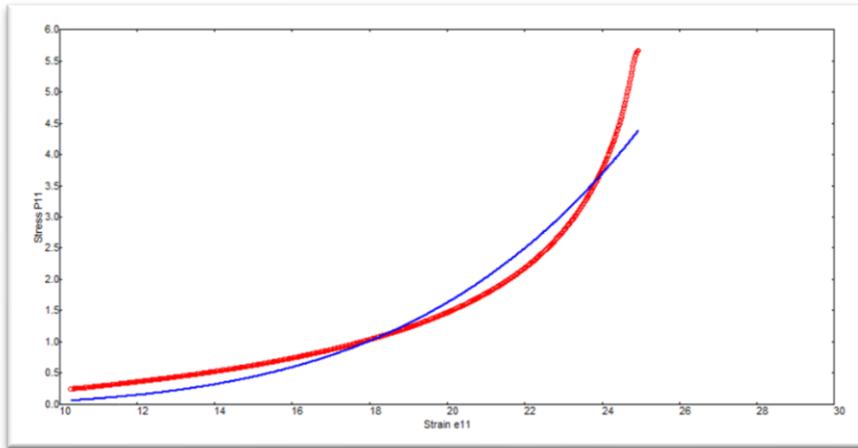


Diagramma 16: interpolazione con Hyperfit

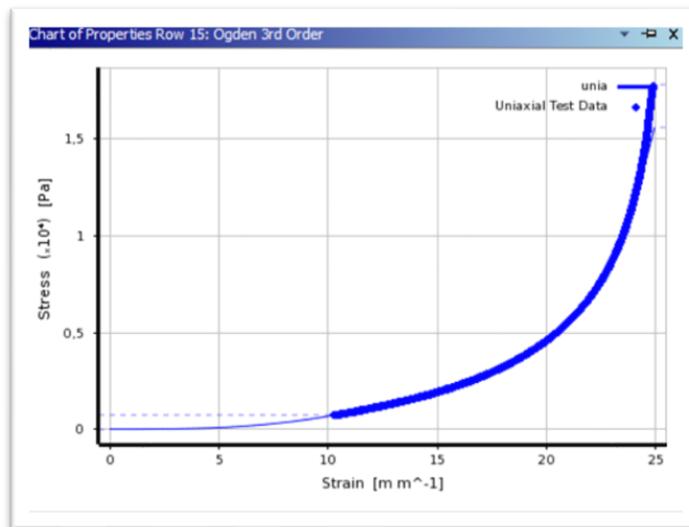


Diagramma 17: confronto tra curva simulata e sperimentale con Ansys

Tabella riassuntiva dei coefficienti:

mamb3	Hyperfit	Ansys
α_1	5,65	5,53
μ_1 (MPa)	0,00	-0,54
α_2	-0,04	9,47
μ_2 (Mpa)	2,34	2,55E-08
α_3	0,00	5,49
μ_3 (Mpa)	5,62	0,60

Tabella 8: coefficienti mamb 5

6.5 Analisi e confronto dei coefficienti

Dopo aver approssimato i dati con i due programmi, ed aver confrontato i coefficienti, emerge una notevole differenza tra gli uni e gli altri. Analizzando i coefficienti ottenuti tra acini di diverse dimensioni, a parità di software, non emerge una correlazione tra il valore dei coefficienti e la dimensione degli acini, ma tra la dimensione degli stessi e l'errore di calcolo nella stima dei coefficienti. Il calcolo dell'errore viene effettuato dal software considerando i valori dei dati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione. Come errore si considera il massimo dell'errore relativo, cioè il massimo della differenza tra il valore ottenuto per interpolazione e quello sperimentale. Si presentano in seguito in forma tabellare i coefficienti ottenuti per i cinque acini esaminati per entrambi i programmi e l'errore relativo commesso dagli stessi durante l'interpolazione delle curve sperimentali.

$$E = \left(\frac{V_{s,i} - V_{i,i}}{V_{s,i}} \right) \quad (18)$$

con:

E errore relativo

$V_{s,i}$ valore sperimentale i -esimo

$V_{i,i}$ valore interpolato i -esimo

M_{rel} massimo errore relativo

Ansys	μ_1 (Mpa)	α_1	μ_2 (Mpa)	α_2	μ_3 (Mpa)	α_3	d (mm)
m-amb 1	5,27E-17	15,265	0,022047	4,6243	1,4632	3,4612	19
m-amb 2	2,91E-21	18,384	0,03312	5,3811	2,536	3,3587	18,404
m-amb 3	2,88E-21	18,293	0,059611	3,8905	0,5969	3,8905	19,059
m-amb 4	1,75E-19	17,187	0,41995	3,823	0,48237	3,823	18,528
m-amb 5	-5,38E-01	5,5251	2,56E-08	9,4699	5,99E-01	5,49E+00	20,111

Tabella 9: coefficienti ricavati con Ansys

Hyperfit	μ_1 (Mpa)	α_1	μ_2 (Mpa)	α_2	μ_3 (Mpa)	α_3	d (mm)
m-amb 1	0,00E+00	5,869	0,443	0,310	2,870	0,061	19
m-amb 2	1,50E-02	2,759	-0,208	1,600	31,190	-0,015	18,404
m-amb 3	2,33E+00	3,528	2,335	-7,055	-1,283	-0,541	19,059
m-amb 4	0,00E+00	10,021	1,345	1,026	-0,121	31,129	18,528
m-amb 5	0,00E+00	5,65	2,34E+00	-0,04	5,62E+00	-3,00E-03	20,111

Tabella 10: coefficienti interpolati con Hyperfit

Hyperfit	d (mm)	$M_{rel\ max}$
mamb1	19	0,15
mamb2	18,404	0,09
mamb3	19,059	0,12
mamb4	18,528	0,11
mamb5	20,111	0,22

Tabella 11: diametro ed errore massimo

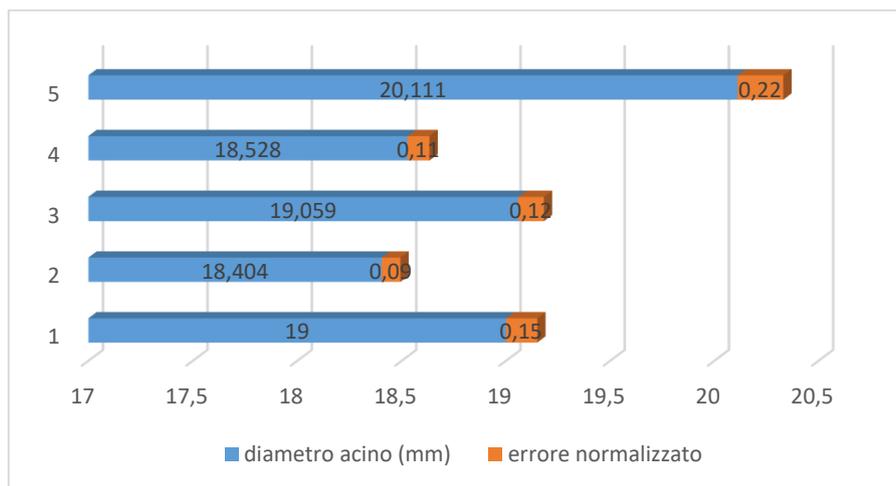


Diagramma 18: andamenti errore-dimensione Hyperfit

Ansys	diametro (mm)	Err_norm
mamb1	19	0,12
mamb2	18,404	0,06
mamb3	19,059	0,13
mamb4	18,528	0,11
mamb5	20,111	0,18

Tabella 12: diametro acini ed errore normalizzato

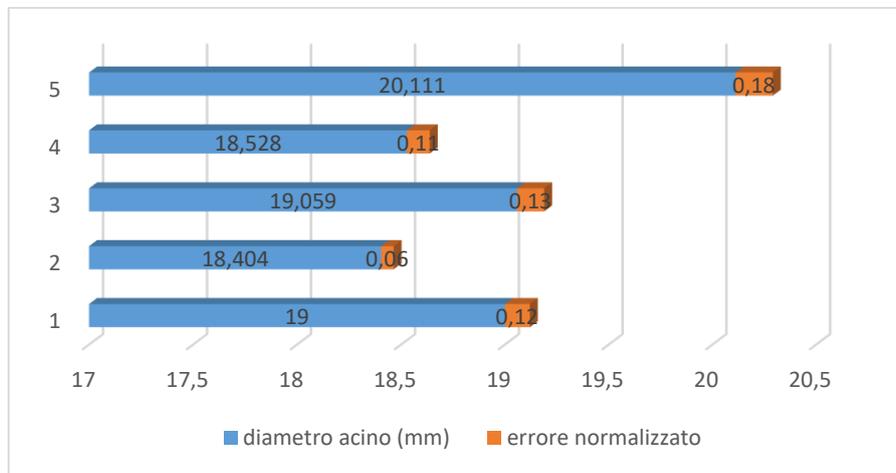


Diagramma 19: andamenti errore dimensione Ansys

Il diagramma 20 analizza la variazione dell'errore commesso durante la simulazione con i due programmi per i cinque acini d'uva.

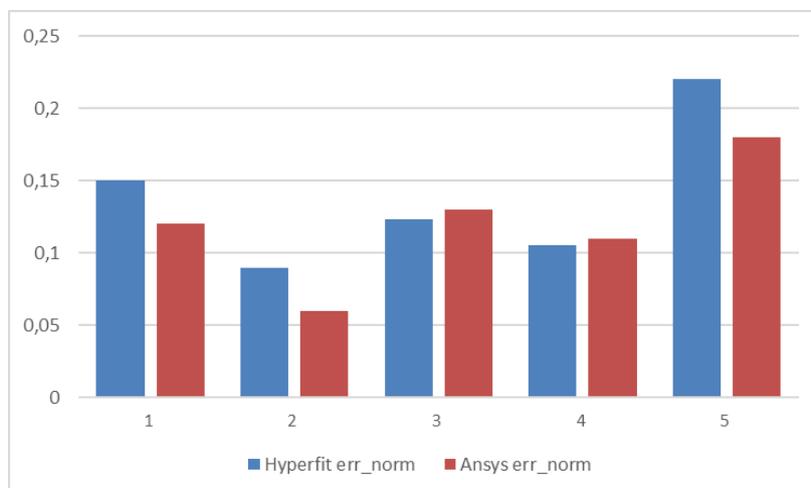


Diagramma 20: comparazione errore-programma

Dal diagramma sopra emerge la differenza di capacità di simulazione dei due programmi, Ansys nella determinazione dei coefficienti commette un errore più contenuto all'aumentare del diametro degli acini, tuttavia queste considerazioni devono essere fatte con la consapevolezza che gli algoritmi di calcolo dei due programmi sono differenti pertanto questa disparità potrebbe essere data dal diverso modo di giungere a convergenza degli stessi.

7 Simulazione della compressione degli acini

Nei capitoli successivi verrà descritto il modello FEM analizzato per la simulazione della compressione degli acini.

7.1 Descrizione del modello FEM per la simulazione numerica

Il modello FEM sviluppato con Ansys ADPL 19 per la verifica dei parametri ricavati nei paragrafi precedenti presenta le seguenti caratteristiche:

7.1.1 Geometria

Poiché l'acino presenta una geometria a tratti irregolare molto simile ad una sfera, si considera lo stesso come una sfera dal diametro medio di 19 mm a cui è stata tolta la pelle. Considerando una sfera come elemento assialsimmetrico, se ne è simulato solo quarto e la relativa parte di piastra con cui è a contatto. Si definisce quindi un settore circolare con angolo di 90° e raggio di 9.5 mm per l'area dell'acino. Il quarto di cerchio è a contatto con un rettangolo i cui lati sono stati scelti di 9.5 mm di lunghezza e 6mm di altezza per la rappresentazione della base rigida su cui è appoggiato l'acino.

7.1.2 Element type

Sia per l'acino che per la piastra si è scelto di utilizzare il modello solid 8 node 183 con proprietà di assialsimmetria perchè gli elementi sono dei quadrati e non presentano distorsioni.

7.1.3 Material properties

La piastra è modellata come acciaio con un comportamento lineare con modulo elastico di 210 GPa e coefficiente di Poisson di 0.3. Per l'acino si assume un materiale iperelastico con modulo di Poisson di 0.30 e si utilizza il modello di Ogden per materiali iperelastici con grado di complessità crescente

con i parametri α e μ da valutare con la simulazione con Ansys Workbench. Si rimanda alle figure 16-17 dove si mostra la scelta dei parametri sul software.

7.1.4 Mesh

Per realizzare una mesh adeguata all'analisi del fenomeno di compressione si è deciso di differenziare la tipologia di mesh tra piastra ed acino, poiché nello studio si pone maggiore attenzione al comportamento dell'acino pertanto la realizzazione della mesh dello stesso richiede maggiore cura; la deformazione della piastra si considera trascurabile.

Costruzione della mesh sull'acino

Si sceglie di adottare una mesh accurata ma non uniforme più fitta verso l'interno dell'acino e nella zona di contatto della piastra nonostante l'acino si deformi di più verso l'esterno, per semplificare la funzione contact. Ogni lato e l'arco della sezione angolare sono stati divisi in 20 parti con un rapporto di 1:10 tra la parte più grande e quella più piccola. In questo modo si riesce a rendere il reticolo più fitto nella zona del contatto sulla piastra, ovvero l'area in cui si deve definire il contatto.

Costruzione della mesh sulla piastra

Le tensioni agenti sulla piastra non sono rilevanti ai fini del problema e la sua deformazione è infinitesima, si sceglie di adottare per praticità, anche in questo, caso una mesh che divide ogni lato in 20 parti, con un rapporto di 1:10 tra minore e maggiore per ogni parte.

7.1.5 Vincoli

Lo spostamento orizzontale della piastra, lo spostamento orizzontale dell'acino superficie a Fig 16 e lo spostamento verticale della sezione centrale dell'acino superficie b in fig.14 si pongono uguali a zero. Si considera quindi che sia solamente la piastra su cui è appoggiato l'acino a muoversi: sul modello viene imposto lo spostamento al lato inferiore di quest'ultima.

7.1.6 Contatto

Per modellare il contatto tra acino e piastra si è deciso di adottare un contatto di tipo *standard*, indichiamo come *target* la superficie della piastra e come *contact* è la superficie dell'acino. Applichiamo al coefficiente d' attrito un valore pari a 0, questa scelta è giustificata dal succo liberato durante la compressione. Affinché non vi siano problemi di compenetrazione dovuti alle grandi deformazioni si sceglie l'opzione "Large displacement Static".

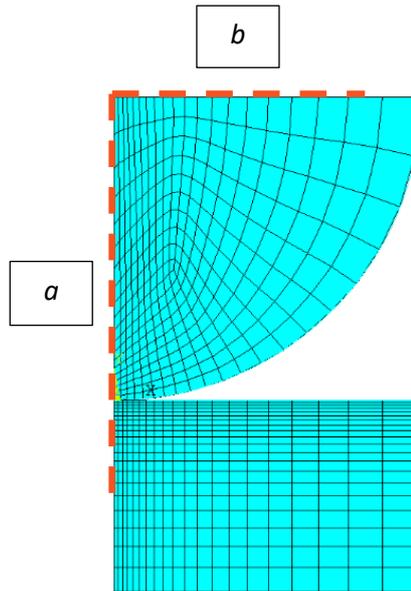


Figura 16: mesh e vincoli sull'acino e sulla piastra

In seguito alla realizzazione della mesh e del contatto si impongono i vincoli alla piastra e all'acino vincolando completamente la piastra e permettendo all'acino il solo spostamento lungo l'asse verticale a seguito dell'applicazione di un carico verticale di compressione, avendo impostato i parametri α e μ del modello di Ogden ottenuta dalla calibrazione del modello costitutivo trattato al capitolo precedente. Si presenteranno in seguito i valori dei parametri ottenuti con le interpolazioni con Ansys Workbench.

7.1.7 Analisi statica con Ansys APDL

La terza parte dello studio del comportamento della polpa degli acini d'uva verde sulla simulazione di una compressione statica di un acino utilizzando i dati di calibrazione del modello costitutivo del materiale ottenuti in precedenza. L'acino è stato modellato con il supporto di Ansys APDL 19 e sono state ricavate le tensioni e deformazioni sullo stesso come una forza pari alla forza massima della curva sperimentale applicata al nodo più esterno dell'acino. Si presenta in appendice lo script parziale della simulazione, poiché la restante parte verrà presentata con immagini sequenziali per maggior chiarezza espositiva.

Nella Tabella 13 per semplificare la trattazione si riportano i parametri da inserire sui riquadri del software per la definizione dei parametri come mostrato in Fig.18.

Ansys	μ_1 (Mpa)	α_1	μ_2 (Mpa)	α_2	μ_3 (Mpa)	α_3	d (mm)
mamb1	0,0	15,3	0,0	4,6	1,5	3,5	19,0

Tabella 13:parametri costitutivi mamb1

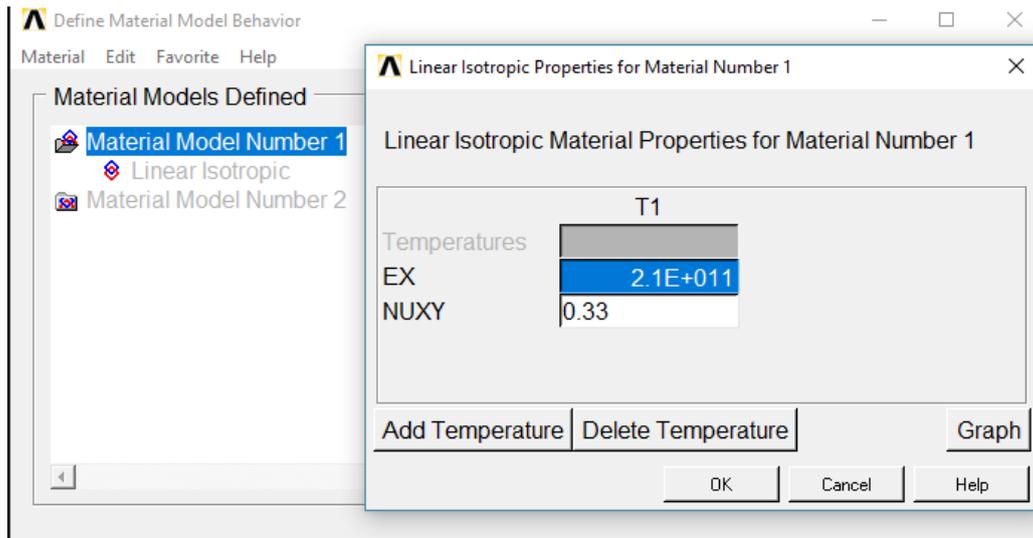


Figura 17: definizione materiale piastra

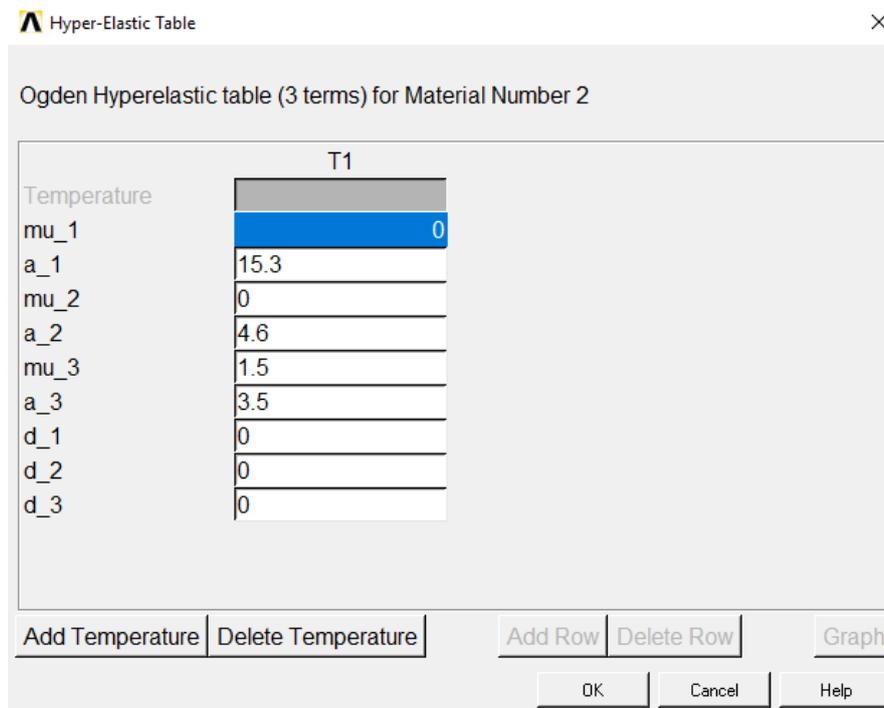


Figura 18: definizione acino con modello di Ogden

Durante le varie prove simulando con i vari coefficienti si è notato come il software spesso annulli i coefficienti molto piccoli, questo deve essere considerato in fase di comparazione poiché anche se si presenta una differenza tra i coefficienti ricavati con Ansys ed Hyperfit questa si annulla durante la realizzazione del modello FEM.

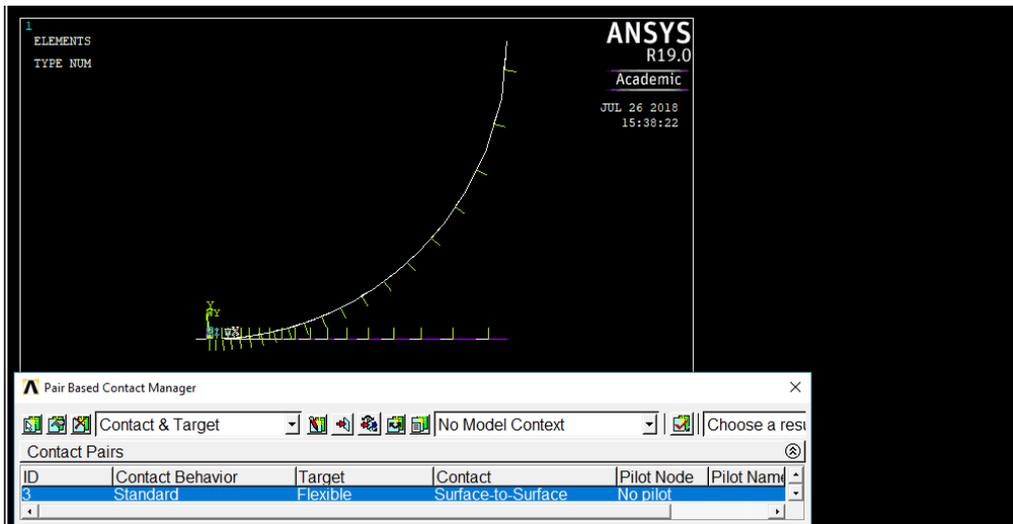


Figura 19: definizione del contatto tra acino e piastra

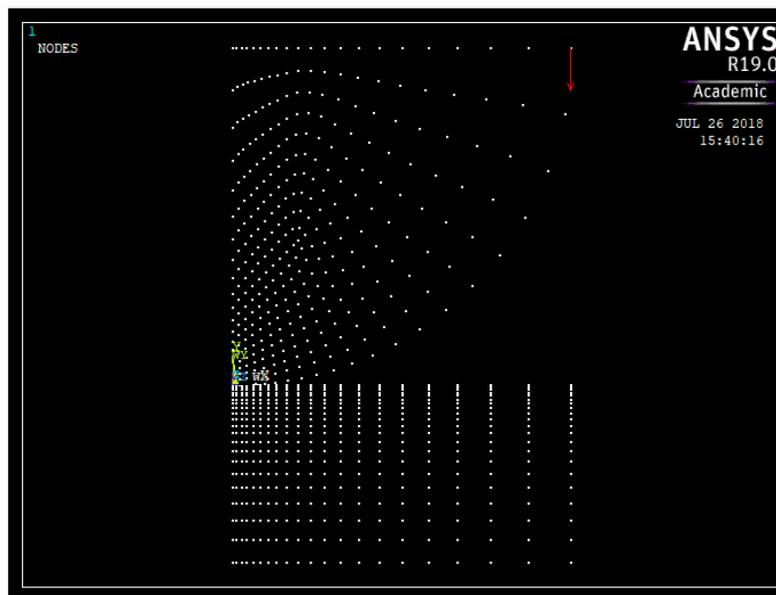


Figura 20: definizione del carico ai nodi

In seguito ad alcune prove, essendo l'acino assialsimmetrico si è scelto di considerare una sola pressione che corrisponde alla pressione massima della curva sperimentale ed è pari a 16500 Pa.

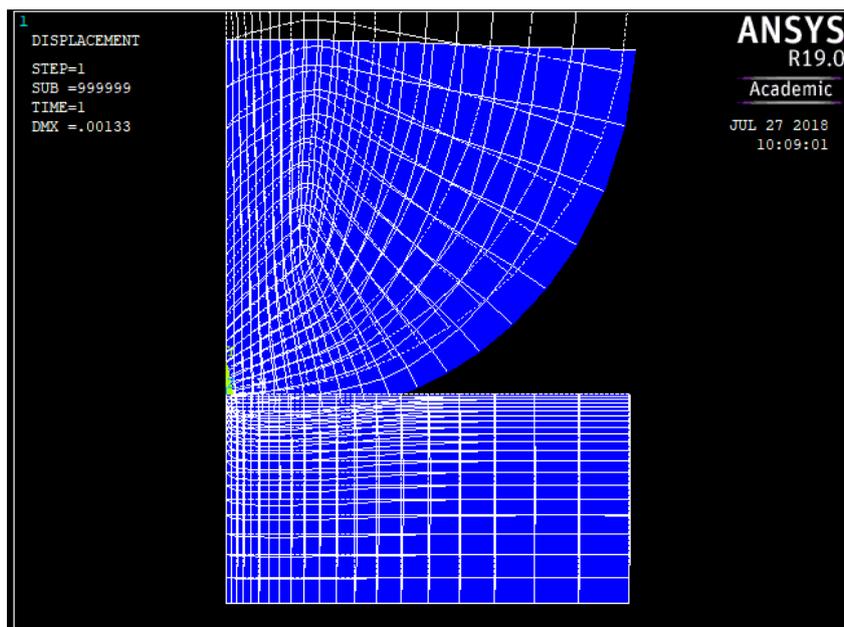


Figura 21: configurazione deformata ed indeformata dell'acino con modello iperelastico

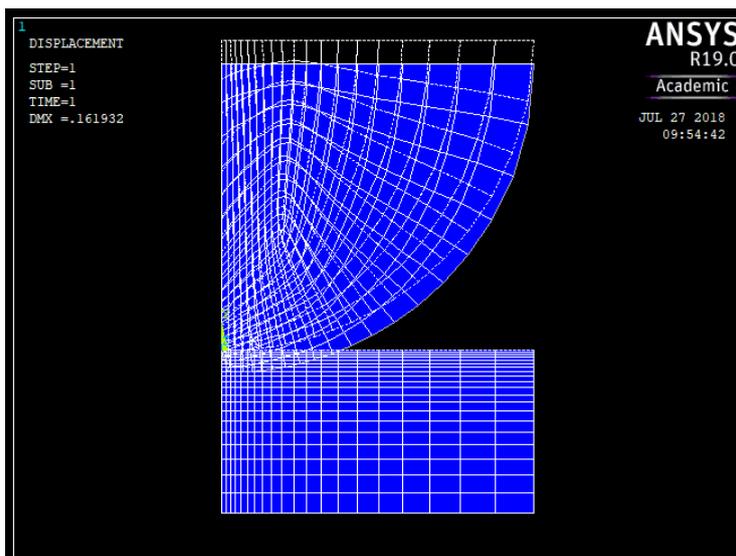


Figura 22: configurazione deformata ed indeformata con modello elastico-lineare

Dal confronto della figura 21 con la 22 emerge come sia differente il comportamento dell'acino sottoposto allo stesso carico modellato con due differenti modelli, il primo con un modello iperelastico a 3 parametri ed il secondo con un modello elastico lineare, è evidente la differente distorsione del modello infatti essendo il secondo un modello elastico lineare tutti gli elementi vengono compressi allo stesso modo creando uno schiacciamento compatto senza distorsioni.

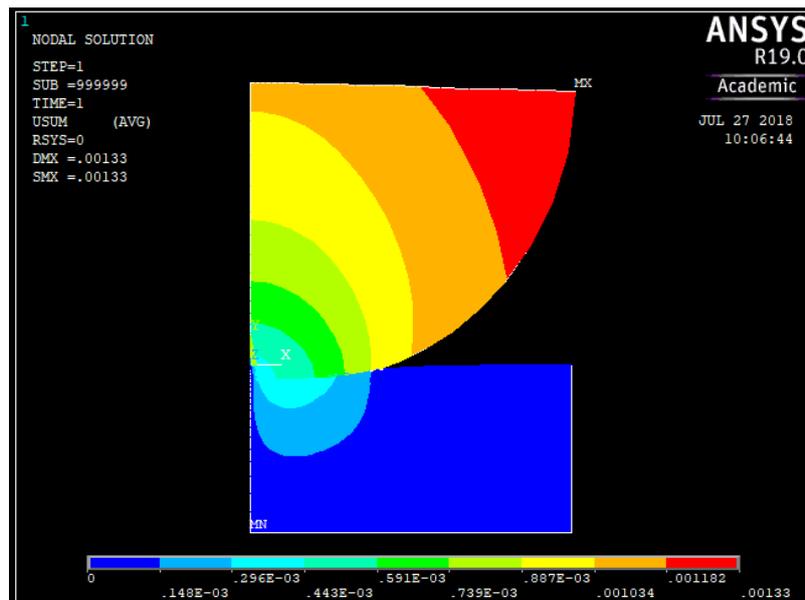


Figura 23: vettore della risultante dello spostamento

Come si può notare dalla figura 21 gli elementi che presentano maggiore distorsione e spostamento sono gli elementi di colore arancione e rosso più distanti dai vincoli.

8 Conclusioni

Dopo aver analizzato i vari modelli matematici utilizzati per la descrizione del comportamento di materiali iperelastici, utilizzando i parametri α e μ del modello di Ogden, ottenuti da comparazione tra softwares e prove sperimentali per la valida zione del modello FEM si può concludere l'elaborato affermando che il modello di Ogden risulta adeguato per analizzare il comportamento non lineare della polpa degli acini d'uva. Non vi sono parametri ricavati da differenti softwares preferibili gli uni agli altri, tuttavia avendo utilizzato sia per la simulazione FEM il software Ansys che per le interpolazioni dei parametri α e μ , c'è maggiore omogeneità rispetto a quelli ottenuti con Hyperfit, e si evitano gli errori di troncamento citati nel paragrafo 7.1.7. Per quanto riguarda la scelta del modello e della complessità dello stesso è emerso che un modello a due o tre parametri risultava grossolano nella approssimazione delle curve di carico e scarico pertanto i parametri ottenuti non risultavano attendibili. Utilizzando un modello a quattro parametri l'approssimazione risulta efficace ed i parametri sono utilizzabili per la simulazione FEM con la consapevolezza, data dalle prove di simulazione, che spesso questi poco differiscono tra loro e non sempre è apprezzabile la differenza durante la simulazione.

Emergono infine alcune criticità come quelle dovute alla letteratura abbastanza vasta presente sull'argomento in generale, ma poco specifica rispetto al caso di studio creando quindi difficoltà al confronto dei dati ottenuti. I modelli di calcolo sono numerosi come lo sono anche i softwares che li implementano tuttavia essendo "trasparenti" all'utente è difficile interpretare la teoria alla base del calcolo e fare confronti tra un software e l'altro ottenuti i parametri da analizzare.

9 Codice Ansys

In questo capitolo si presenta una parte del codice implementato del modello FEM descritto nel paragrafo 7.1.7.

```
/PREP7
BLC4,0,0,0.0095,-0.005
/AUTO,1
/REP,FAST
CYL4,0,0.0095,0.0095,0,0.0095,-90
/AUTO,1
/REP,FAST
FLST,2,2,5,ORDE,2
FITEM,2,1
FITEM,2,-2
AGLUE,P51X
!*
ET,1,PLANE183
!*
SAVE
SAVE
SAVE
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
```

MPDATA,EX,1,,210000000000

MPDATA,PRXY,1,,0.33

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,EX,2,,610000

MPDATA,PRXY,2,,0.3

SAVE

SAVE

SAVE

SAVE

FLST,5,3,4,ORDE,3

FITEM,5,2

FITEM,5,-3

FITEM,5,6

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*
/

LESIZE,_Y1, , ,20,0.1, , , ,1

!*
/

FLST,5,4,4,ORDE,4

FITEM,5,1

FITEM,5,4

FITEM,5,8

FITEM,5,-9

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*
/

LESIZE,_Y1, , ,20,10, , , ,1

!*

MSHKEY,0

FLST,5,2,5,ORDE,2

FITEM,5,1

FITEM,5,3

CM,_Y,AREA

ASEL, , , ,P51X

CM,_Y1,AREA

CHKMSH,'AREA'

CMSEL,S,_Y

!*

AMESH,_Y1

!*

CMDELE,_Y

CMDELE,_Y1

CMDELE,_Y2

!*

SAVE

SAVE

SAVE

SAVE

SAVE

/DIST,1,0.729,1

/REP,FAST

/DIST,1,0.729,1

/REP,FAST

/DIST,1,0.729,1

/REP,FAST

/DIST,1,0.729,1

/REP,FAST


```
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,1,
MAT,1
MP,EMIS,1,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,169
ET,3,172
R,3,,,1.0,0.1,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,3,0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,0
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,1
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,0
KEYOPT,3,12,5
KEYOPT,3,2,0
! Generate the target surface
LSEL,S,,,3
CM,_TARGET,LINE
TYPE,2
NSLL,S,1
```

```
ESLN,S,0
ESURF
CMSEL,S,_ELEMCM
! Generate the contact surface
LSEL,S,,,8
CM,_CONTACT,LINE
TYPE,3
NSLL,S,1
ESLN,S,0
ESURF
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
```


/REP,FAST
/FOC,1,-0.3,,1
/REP,FAST
/FOC,1,-0.3,,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
/FOC,1,-0.3,,1
/REP,FAST
/FOC,1,,-0.3,,1
/REP,FAST
/FOC,1,,-0.3,,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
/FOC,1,-0.3,,1
/REP,FAST
/FOC,1,-0.3,,1
/REP,FAST
/FOC,1,,-0.3,,1
/REP,FAST
FLST,2,320,2,ORDE,4
FITEM,2,401
FITEM,2,-700
FITEM,2,721
FITEM,2,-740
EMODIF,P51X,MAT,2,

```
/AUTO,1
/REP,FAST
SAVE
SAVE
FINISH
/POST1
PLDISP,2
!*
!*
PLESOL, S,Y, 0,1.0
/AUTO,1
/REP,FAST
ELOT
FINISH
! /EXIT,ALL
```

10 Bibliografia

1. Gidon Weil, Gal de Botton 2017 *Thin wall composite sphere in finite shear deformation*, Elsevier;
2. E. Seyedabadi, 2015, *Predicting Cantaloupe bruising using non linear finite element method*, International journal food properties;
3. Luca Rolle, René Siret, Susana Río Segade, Vincenzo Gerbi, Chantal Maury, Frédérique Jourjon, 2012. *Instrumental Texture Analysis Parameters as Markers of Table-Grape and Winegrape Quality: A Review*;
4. F. Curà, F. Adamo, R. Sesana “Experimental campaign for PU open cells with fem”, Politecnico di Torino, 2016;
5. Ansys tech tips, 2015, *Hyperelastic simulation*;
6. R.W. Ogden, *Non linear elastic deformation*, Dover publication Inc.;
7. G. Basile, *Analisi teorico-sperimentale di materiali iperelastici*, Università degli studi di Catania, 2011;
8. Treloar, *The physics of rubber elasticity*, Clarendon Oxford, 1975 ;
9. C. Boyce e M. Arruda, *Constitutive model for rubber*, Chemistry e Technology edizioni;
10. ASAE S368.3:1995, *Compression test of food materials of convex shape*;
11. UNI EN ISO 5492 : 2008.
12. Torchio, Giacosa, Segade, Mattivi, Gerbi, Rolle “*Optimization of a Method Based on the Simultaneous Measurement of Acoustic and Mechanical Properties of Winegrape Seeds for the Determination of the Ripening Stage*”, Journal of agricultural and food chemistry 60 9006-9016, 2012
13. Aria, Frea “*Procedimento per l’ottenimento della curva caratteristica di uva da tavola mediante reverse engineering*”, Politecnico di Torino, 2016.