

DISSERTAZIONE PRESENTATA PER IL CONSEGUIMENTO DEL TITOLO DI DOTTORE DI
RICERCA IN INGEGNERIA DELLE STRUTTURE E GEOTECNICA

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI ISOLATORI ELASTOMERICI
CON TECNICHE DI NANOINDENTAZIONE PER APPLICAZIONI DI
ISPEZIONE E DIAGNOSTICA

EDOARDO ROSSI
ROMA, GENNAIO 2017

CICLO XXIX

RELATORI:
PROF. ROSARIO GIGLIOTTI

IL COORDINATORE DEL DOTTORATO:
PROF. FRANCO BONTEMPI

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Storia e Diffusione dei Sistemi di Isolamento Sismico	1
1.2	Principi di Funzionamento dell'Isolamento Sismico	6
1.3	Tecniche di Ispezione e Monitoraggio dei Dispositivi di Isolamento . .	10
2	Comportamento Meccanico degli Isolatori Elastomerici	15
2.1	Geometria	15
2.2	Comportamento meccanico	20
2.3	Stato tensionale	23
3	Nanoindentazione	29
3.1	Principi di base	29
3.2	Descrizione meccanica di una prova di nanoindentazione	31
3.3	Metodo CSM	35
3.4	Fattori Rilevanti per la pratica sperimentale	40
4	Applicazione delle tecniche di nanoindentazione alla diagnosi degli isolatori elastomerici	49
4.1	Calcolo della curva $\sigma - \varepsilon$	49
4.2	Calcolo della curva $\tau - \gamma$	53
5	Attività Sperimentale	57
5.1	Attività preliminari	57
5.2	Test standard sugli isolatori	66
5.3	Test di nanoindentazione	71
6	Confronti	79
6.1	Correzione delle condizioni al contorno	79
6.2	Confronto dei test macroscopici con la nanoindentazione	83

7 Conclusioni e Sviluppi futuri	89
Bibliografia	93

1 Introduzione

1.1 Storia e Diffusione dei Sistemi di Isolamento Sismico

L'isolamento sismico, almeno nella sua concezione moderna, risale a oltre cento anni fa, ma la sua effettiva applicazione può essere individuata solamente in costruzioni degli ultimi decenni. Nel 1870 un appoggio costituito da due piatti concavi ed una sfera, sorprendentemente simile ai moderni friction pendulum, fu brevettato negli stati uniti e può essere considerata la prima testimonianza di un dispositivo di isolamento sismico. Il primo edificio isolato ad essere realizzato negli stati uniti fu il "Foothill Communities Law and Justice Center" situato in Rancho Cucamonga in California (1985) che venne costruito utilizzando un totale di 98 isolatori elastomerici in gomma naturale ed ad elevato smorzamento [35]. Una dettagliata prospettiva storica sull'isolamento sismico può essere trovata in un libro pubblicato da Naiem e Kelly [26].

Al giorno d'oggi ci sono più di 10000 costruzioni, situate in più di 30 paesi, che sono protette da dispositivi di controllo passivo delle vibrazioni (isolatori e/o dissipatori). Per quanto riguarda gli edifici isolati, i paesi che possono essere leader in tale settore sono Giappone, Cina, Russia e Stati Uniti (Figura 1.1)

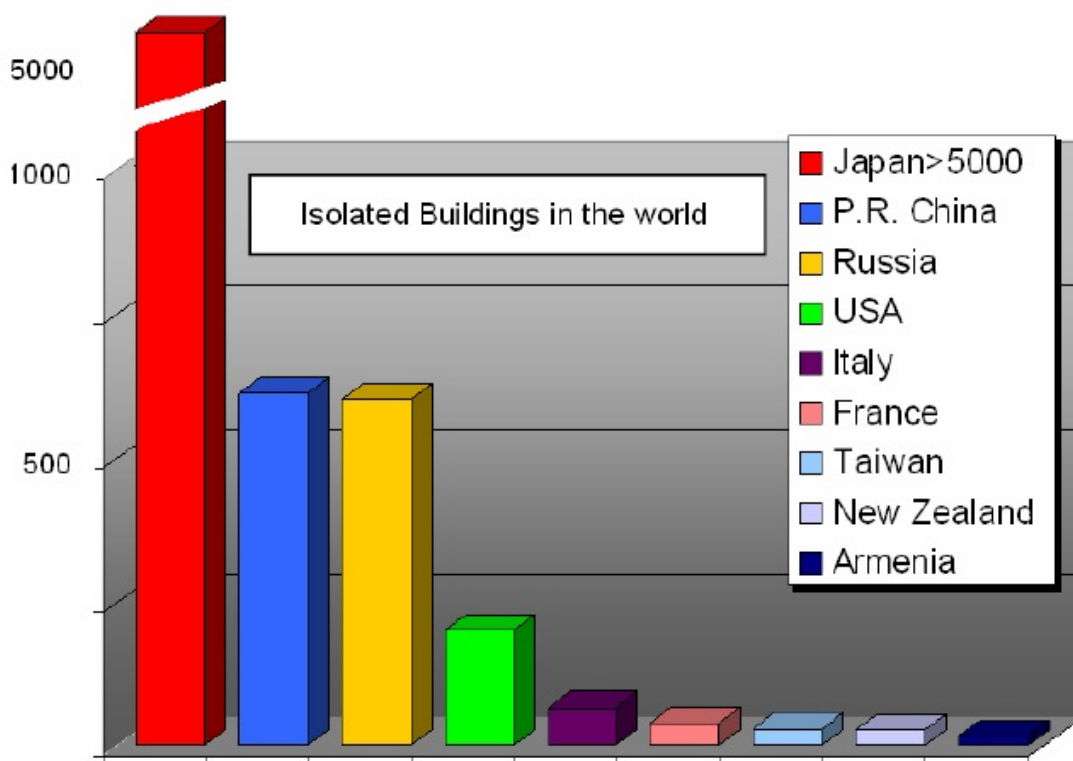


Figura 1.1: Edifici isolati nel mondo nel 2008[21]

Giappone

Il Giappone vanta il maggior numero di edifici isolati al mondo (Figura 1.1). Ciò è dovuto a diversi fattori, primo in ordine di importanza è stato sicuramente l'ottimo comportamento mostrato dagli edifici isolati durante il terremoto di Hyogo-Ken Nambu del 1995. A questo bisogna aggiungere la presenza di una specifica normativa del 2000 e la liberalizzazione dell'uso dell'isolamento sismico a partire dal 2001. Di particolare interesse è la moderna tendenza di questo paese ad isolare edifici molto grandi, sia in elevazione (grattacieli) che in estensione, sorretti da un'unica grande struttura isolata. Al termine del 2008 si potevano contare più di 120 grattacieli muniti di isolamento sismico. Altra interessante applicazione è quella riguardante gli edifici privati, nonostante le ridotte dimensioni e peso. Ve ne sono attualmente più di 3000 protetti con

dispositivi di isolamento e 2000 con dissipatori [21].

Cina

Seconda al Giappone, per numero di edifici isolati, viene la Cina, con un conteggio che supera i 650 (Figura 1.1). Vi sono molti edifici residenziali isolati, molti dei quali in muratura. Si trovano applicazioni di isolamento sismico anche negli stadi, sia alla base che a livello di copertura, negli impianti industriali, in edifici storici e a protezione di singoli monumenti o opere d'arte. Come nel caso del Giappone, l'ottimo comportamento mostrato da tali strutture durante il terremoto di Wenchuan del 2008, ha dato uno sprint all'utilizzo di tale tecnica e, con ogni probabilità, i dati qui riportati sono destinati ad aumentare portando ad un'ancora più estesa diffusione dei sistemi di protezione passiva dalle vibrazioni [21].

Russia

La Russia conta un numero di edifici isolati paragonabile alla Cina. Le nuove realizzazioni procedono tuttavia con una certa lentezza, anche se non mancano applicazioni di particolare rilievo come l'isolamento di edifici monumentali o grattacieli. Di particolare interesse è l'utilizzo di dispositivi di tipo "occidentale", al posto dei precedenti funghi rovesciati in c.a., alcuni dei quali di fabbricazione italiana [21].

U.S.A.

Nonostante l'ottimo comportamento mostrato dagli edifici isolati durante il terremoto di Northridge del 1994, il numero di edifici isolati

sismicamente negli stati uniti è relativamente ridotto. Ciò è principalmente dovuto alla presenza di una normativa molto penalizzante. E' tuttavia da notare che degli edifici che attualmente dispongono di un sistema di isolamento molti sono stati oggetto di retrofit o sono edifici strategici. In contrasto con ciò, si trovano moltissime applicazioni, più di 600, su ponti e viadotti, mentre per gli edifici si preferiscono sistemi di dissipazione energetica [21].

Taiwan

Le prime applicazioni dell'isolamento sismico, in questo paese, ebbero luogo a seguito del terremoto di Chi Chi del 1999. Dopo tale terremoto venne emanata una nuova normativa che incentivava, appunto, l'uso di tali dispositivi. Nel 2007 il numero di edifici isolati era salito a 29, molti dei quali ospedali. Si contano anche un discreto numero di viadotti isoalti ed edifici protetti con sistemi dissipativi [23].

Francia

La Francia è stato uno dei primi paesi al mondo ad utilizzare l'isolamento sismico per la protezione di costruzioni civili ed il primo ad utilizzarlo negli impianti nucleari. E' opportuno ricordare che tra la fine degli anni 70' e per tutto il decennio degli 80' gli isolatori in neoprene francesi sono stati utilizzati sia in madrepatria che negli Stati Uniti ed in Cile per la protezione di impianti industriali. Di particolare rilevanza è l'obbligatorietà alla protezione delle scuole e degli edifici del Consiglio Regionale dell'Isola di Martinica con tali dispositivi, a causa della forte pericolosità sismica che caratterizza tale isola [23].

Nuova Zelanda

L'elevata pericolosità sismica che caratterizza il territorio di questa nazione, di cui i recenti eventi sismici sono una conferma, ha fatto sì che fosse uno dei primi paesi al mondo ad applicare l'isolamento sismico a protezione di edifici, ponti e viadotti. Vi è un largo uso di dispositivi con nucleo in piombo in grado di fornire una dissipazione energetica aggiuntiva. Il Parlamento di Wellington è stato il primo retrofit, realizzato con i dispositivi appena citati. E' importante notare che in questo paese è presente una normativa che consente un'agevole uso dei più moderni dispositivi di protezione sismica [23].

Italia

La prima applicazione dell'isolamento sismico in Italia risale al 1975 su ponti e viadotti mentre per gli edifici bisogna attendere il 1981 (Figura 1.2). L'utilizzo di dispositivi antisismici è prevalente nelle costruzioni strategiche, come gli ospedali, e in edifici di particolare rilevanza, seppur non strategici, come le scuole. Anche l'edilizia residenziale, sia pubblica che privata, può vantare notevoli applicazioni. Anche per quanto riguarda ponti e viadotti l'Italia si colloca nei primi posti al mondo. Di notevole importanza è l'utilizzo, sia a livello europeo che extraeuropeo, di dispositivi di fabbricazione italiana [22]. Nel nostro paese, così come nel resto del mondo, l'impulso che ha incrementato l'utilizzo di tali tecnologie va ricondotto, da una parte a diversi eventi sismici (Terremoto del Friuli, 1976; Terremoto Campano-Lucano, 1980; Terremoto delle Marche e dell'Umbria, 1997-1998; Terremoto del Molise e della Puglia, 2002; etc.), dall'altra alla presenza di un quadro normativo tale da supportare l'utilizzo di dispositivi antisismici senza eccessivamente gravare sui costi

di costruzione. Purtroppo però, la possibilità di controllare i dispositivi durante la loro vita utile, risulta onerosa. Ciò è dovuto all'assenza di una tecnica di controllo che permetta di verificarne lo stato in modo rapido ed economico, eccezion fatta per le ispezioni visive, le quali però possono chiaramente limitarsi ad una sola valutazione qualitativa. L'obiettivo di tale lavoro è appunto lo studio di una tecnica in grado di risolvere tale mancanza.



Figura 1.2: Isolamento sismico in Italia [22]

1.2 Principi di Funzionamento dell'Isolamento Sismico

L'isolamento sismico risulta essere molto efficiente in quanto la disconnessione della costruzione o di una sua parte (massa principale) dalla sottostruttura (molto spesso le fondazioni) funge da filtro per la sovrastruttura. In questo modo le armoniche principali del sisma, caratterizzate da frequenze relativamente elevate, non eccitano la struttura isolata

la quale ha una frequenza di vibrazione propria molto ridotta, ed allo stesso tempo la sottostruttura risulta sgravata dalle azioni provenienti dalla sovrastruttura.

In particolare, considerando la struttura di Figura 1.3, possiamo capirne il funzionamento tramite un'analisi dinamica.

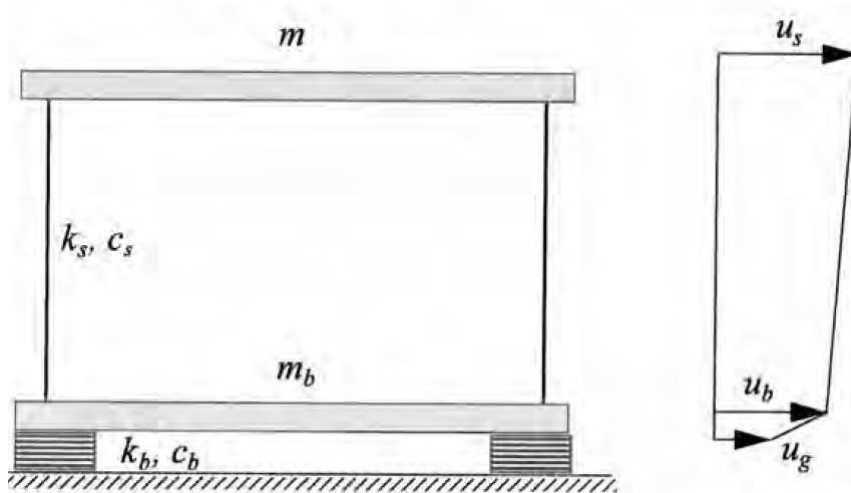


Figura 1.3: Rappresentazione schematica di una struttura isolata [26]

In particolare avremo:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = -\mathbf{M}\boldsymbol{\tau}\ddot{u}_g \quad (1.1)$$

Le pulsazioni nominali saranno:

$$\omega_b = \frac{k_b}{m + m_b} \quad \omega_s = \frac{k_s}{m} \quad (1.2)$$

Il rapporto $\omega_b^2/\omega_s^2 = \epsilon = O(10^{-2})$ risulterà quindi trascurabile in quanto $k_b \ll k_s$. Con un'analisi agli autovali è possibile quindi individuare

le forme modali Φ^1 e Φ^2 del sistema e le relative pulsazioni ω_1 e ω_2 . L'equazione caratteristica delle pulsazioni è la seguente:

$$(1 - \gamma) \omega^4 - (\omega_s^2 + \omega_b^2) \omega^2 + \omega_b^2 \omega_s^2 = 0 \quad (1.3)$$

Da cui derivano le soluzioni:

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= \frac{1}{2(1 - \gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 - \left[(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2 \right]^{1/2} \right\} \\ \omega_2^2 &= \frac{1}{2(1 - \gamma)} \left\{ \omega_b^2 + \omega_s^2 + \left[(\omega_b^2 - \omega_s^2)^2 + 4\gamma\omega_b^2\omega_s^2 \right]^{1/2} \right\} \end{aligned} \quad (1.4)$$

dove $\gamma = \frac{m}{m+m_b}$. Riducendo tali soluzioni ai soli termini del primo ordine otteniamo:

$$\begin{aligned} \omega_1^2 &= \omega_b^2 (1 - \gamma\epsilon) \\ \omega_2^2 &= \frac{\omega_s^2}{(1 - \gamma)} (1 + \gamma\epsilon) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Le forme modali invece saranno:

$$\begin{aligned} \Phi^{1T} &= (1, \epsilon) \\ \Phi^{2T} &= \left\{ 1, -\frac{1}{\gamma} [1 - (1 - \gamma)\epsilon] \right\} \end{aligned} \quad (1.6)$$

Da tali risultati è facile intuire come il comportamento della struttura sia sostanzialmente governato dalla rigidità del sistema di isolamen-

to, a patto che esso abbia una rigidezza molto inferiore a quella della sovrastruttura. Se tale condizione è verificata la deformazione del sistema è principalmente concentrata nel sistema di isolamento stesso. La struttura si deformerà quindi con un modo da corpo rigido al quale vanno combinati i modi superiori, con regole probabilistiche quali la SRSS (Square Root of the Sum of Squares) o la CQC (Complete Quadratic Combination), i quali però possono generalmente essere considerati trascurabili, almeno in termini di risposta globale. Il sistema isolato subirà però spostamenti notevoli in quanto la struttura verrà eccitata da frequenze molto ridotte, le quali, in un tipico spettro di risposta, si collocano, appunto, in zone caratterizzate da spostamenti elevati. E' importante perciò un'attenta verifica degli spostamenti massimi che i dispositivi sono in grado di sostenere e valutare un'eventuale accoppiamento del sistema con dissipatori in grado di limitarlo. Nelle moderne applicazioni, la capacità di dissipare energia, è una caratteristica intrinseca dei dispositivi di isolamento, limitando perciò l'uso di dispositivi accoppiati solamente in particolari applicazioni.

Risulta chiaro a questo punto l'importanza che il sistema di isolamento riveste nel comportamento della struttura. Qualora vi dovesse essere una modifica delle caratteristiche dei dispositivi, a seguito per esempio di fenomeni di invecchiamento, la sicurezza della costruzione si ridurrebbe drasticamente, causando effetti anche drammatici sulla stessa. E' per questo motivo che è prevista dal quadro normativo italiano [24, 25] prevede un piano di manutenzione e ispezione dei dispositivi di isolamento.

1.3 Tecniche di Ispezione e Monitoraggio dei Dispositivi di Isolamento

I modi per controllare e monitorare l'efficienza del sistema di isolamento possono essere sostanzialmente divisi in due categorie, la prima consiste in ispezioni visive, in cui un tecnico specializzato valuta le condizioni degli isolatori in maniera qualitativa e fornisce un giudizio sul loro stato e valuta eventuali azioni da intraprendere. Il manuale del CALTRANS (California Department of Transportation) [7] suggerisce di analizzare la deformazione residua del dispositivo e l'eventuale presenza di fessurazione nell'elastomero (ovviamente nel caso siano presenti isolatori di tipo elastomerico) (Tabella 1.1).

Uno studio condotto da Aria ed Akbari [1] mostra come le ispezioni visive siano in grado, oltre a dare un giudizio sullo stato del dispositivo, di individuare le cause che hanno portato al deterioramento del dispositivo. Molte di esse sono causa di una cattiva progettazione o messa in opera, quindi virtualmente evitabili, molte altre però sono dovute all'invecchiamento e a fenomeni atmosferici.

La variazione delle caratteristiche di un isolatore possono sostanzialmente essere ricondotte alla variazione delle caratteristiche del solo elastomero. Tale materiale, data la sua particolare struttura chimica, è fortemente soggetto a cambiare le sue proprietà con il tempo ed in seguito a particolari eventi. Tra questi fenomeni possiamo ricordare il rammollimento della gomma, anche conosciuto come effetto Mullins, il quale ne riduce la rigidità in seguito ad uno stress di tipo meccanico; la transizione vetrosa, che avviene quando il materiale raggiunge temperature molto basse (-50°C circa per la gomma), rendendo il materiale duro e rigido; la transizione cristallina, dovuta al mantenimento del materia-

Condizione	Descrizione	Azione da intraprendere
1	Il deterioramento del dispositivo è molto ridotto o assente. Le deformazioni taglienti sono compatibili con le temperature in situ. (La pendenza verticale è compresa fra 0 e 30°)	Nessuna
2	Gli spostamenti residui, sia verticali che orizzontali, sono nei limiti del dispositivo e non ancora significativi. Vi sono segni di deterioramento come ad esempio una leggera fessurazione. La deformazione tagliente potrebbe essere leggermente eccessiva. Resistenza e funzionalità non vengono influenzate. (La pendenza verticale è compresa fra 30 e 45°)	Nessuna; Ricentraggio del dispositivo
3	Gli spostamenti residui verticali ed orizzontali sono elevati ed indicano un incipiente collasso del dispositivo. E' presente un avanzato stato di deterioramento. Le deformazioni taglienti potrebbero essere eccessive. Le superfici superiori ed inferiori potrebbero non essere più parallele. Il collasso del dispositivo potrebbe essere imminente. (La pendenza verticale supera i 45°)	Ricentraggio del dispositivo; Sostituzione del dispositivo

Tabella 1.1: Esempio di tabella di ispezione

le a basse temperature, la quale irrigidisce il materiale; la transizione cristallina indotta, la quale ha gli stessi effetti del caso precedente ma è causata dalla permanenza del materiale in uno stato deformato [2].

Ad integrazione delle sopracitate ispezioni visive si possono aggiungere i test in laboratorio, i quali però necessitano della rimozione del dispositivo, oppure un monitoraggio sull'intera struttura, che verrà appositamente strumentata, il quale usufruirà di strumenti quali l'OMA (Operational Modal Analyses) o i test di rilascio. Diversi studi sono stati

portati avanti, specialmente sui ponti [3, 4, 6, 5, 9, 13, 20, 31, 34, 35, 36], dimostrando le capacità di un tale sistema di determinare le caratteristiche della struttura in modo da non danneggiare la struttura e, nel caso dei ponti, arrecando un disturbo limitato o addirittura assente al traffico [31]. Vi è tuttavia la necessità di acquistare equipaggiamento relativamente costoso e, in alcuni casi, è necessario progettare ed inserire elementi strutturali aggiuntivi, come ad esempio muri di contrasto [3, 5, 6].

Whelan [36] ha anche mostrato come la tipologia dei sensori usati ed il loro posizionamento può notevolmente influenzare i risultati ottenuti e, tuttavia, la procedura di ottimizzazione necessaria al loro posizionamento non fornisce una soluzione univoca. Risulta anche impossibile determinare le caratteristiche dissipative dei dispositivi, a meno che non siano tutti identici, in quanto solamente le proprietà dissipative della struttura nel suo insieme possono essere monitorate [9]. Uno studio condotto da Lee [20] ha anche messo in luce il fatto che la presenza di una rete di monitoraggio non esclude la necessità di effettuare test aggiuntivi in laboratorio sui singoli dispositivi in quanto le grandi deformazioni a cui possono essere sottoposti possono cambiare, almeno temporaneamente, le loro caratteristiche.

I test previsti dall'attuale quadro normativo [8, 24, 25] prevedono una serie di test sia per la qualificazione che per l'accettazione dei dispositivi di isolamento sismico. Per quelli di tipo elastomerico le caratteristiche fondamentali risultano essere:

1. La rigidità verticale a compressione, determinata tra il 30% ed il 100% del carico verticale di progetto
2. Il modulo statico o dinamico di taglio G , determinato in corrispondenza del terzo ciclo, sotto una compressione costante a 6MPa.

Tale modulo, nel caso statico, è definito come modulo secante tra gli spostamenti corrispondenti a $0,27t_e$ e $0,58t_e$, dove t_e è lo spessore totale dei soli strati di elastomero. Nel caso dinamico come il secante ad una deformazione corrispondente a d/t_e pari a 1, dove d è lo spostamento orizzontale relativo tra le due facce del dispositivo, e con un'azione di frequenza pari a 0,5Hz.

3. Le curve $G-\gamma$ e $\xi-\gamma$ ottenute tramite prove dinamiche cicliche per valori di γ pari a: 0,05, 0,3, 0,5, 0,7, 1,0.
4. La stabilità del dispositivo soggetto ad azione concomitanti di compressione e taglio in cui lo spostamento di riferimento risulta essere pari a $1,8t_e$ ed il valore di compressione pari 1,5 volte il carico massimo e 0,5 volte il carico minimo.
5. La capacità di sostenere almeno 10 cicli sotto compressione costante pari a 6MPa e spostamento pari allo spostamento sismico totale.
6. Efficacia dell'aderenza tra gomma ed acciaio per deformazioni superiori a 2,5
7. Caratteristiche di creep.

La nanoindentazione è una tecnica che potrebbe risolvere molti dei problemi legati ai metodi standard di monitoraggio e diagnostica dei sistemi di isolamento, così come potrebbe ridurre i costi legati ai test tradizionali. Il suo punto di forza, così come suggerisce il nome, sta nel volume estremamente ridotto di materiale necessario a caratterizzare il dispositivo. Con la semplice operazione di carotaggio ed estrazione di un campione di gomma è possibile effettuare dei test, i quali potrebbero, da una parte, fornire in modo semplice informazioni su dispositivi in cui non è presente un evidente stato di degrado, e, dall'altra, permettere cam-

pagne di monitoraggio anche su strutture ordinarie, le quali risultano generalmente troppo costose.

2 Comportamento Meccanico degli Isolatori Elastomerici

2.1 Geometria

Un isolatore elastomerico è composto da strati alternati di acciaio e gomma. Tale geometria permette al dispositivo di avere una ridotta rigidità orizzontale, grazie al ridotto modulo elastico della gomma, ed un'elevata rigidità verticale, grazie ai rinforzi in acciaio che confinano gli strati di elastomero impedendone quasi totalmente la deformazione sotto carichi verticali. L'elevata capacità deformativa della gomma permette anche di raggiungere deformazioni orizzontali del dispositivo molto elevate.

Gli isolatori elastomerici possono essere divisi in tre categorie principali:

LDRB (Low Damping Rubber Bearings) Sono realizzati in gomma naturale vulcanizzata ai piatti in acciaio. Esibiscono un comportamento sostanzialmente lineare fino a deformazioni pari al 100%-150% ed uno smorzamento di circa il 2%-3%. Non sono soggetti a fenomeni di creep significativi e le loro caratteristiche risultano abbastanza stabili nel tempo (Figura 2.1).

LRB (Lead Rubber Bearings) La morfologia è simile ad un normale isolatore elastomerico salvo la presenza di uno o più cilindri di piombo situati

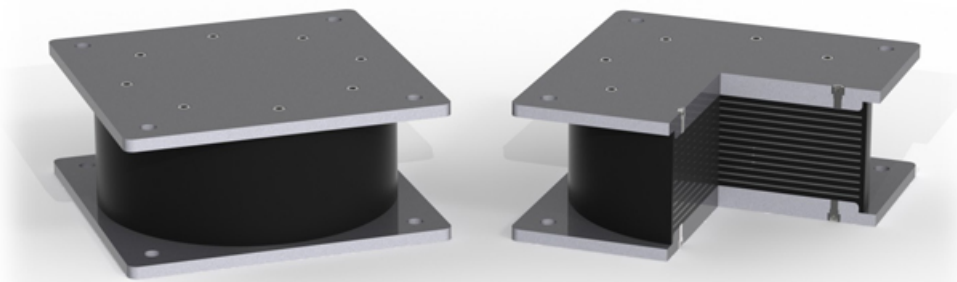


Figura 2.1: Isolatori di tipo LDRB o HDRB

all'interno del dispositivo e collegati ai piatti di estremità (Figura 2.2). Lo spostamento relativo dei suddetti piatti causa una sollecitazione tagliante sugli elementi in piombo, i quali iniziano a deformarsi a circa 10MPa, con una risposta di tipo bilineare. Questo assicura una maggiore dissipazione energetica, con uno smorzamento viscoso equivalente che può arrivare al 30%.

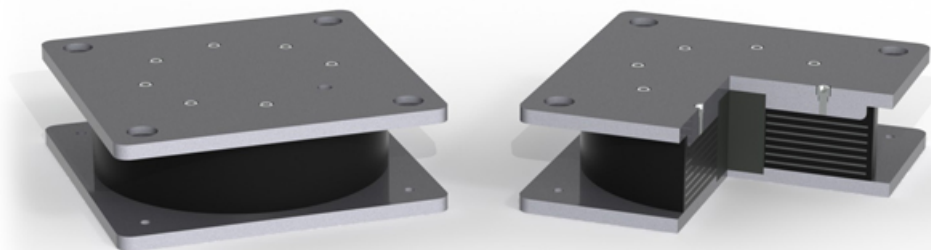


Figura 2.2: Isolatori di tipo LRB

HDRB (High Damping Rubber Bearings) Sono caratterizzati da uno smor-

zamento più elevato rispetto a quelli in gomma naturale che si attesta intorno al 10%-15%. Tale aumento dello smorzamento è ottenuto tramite l'utilizzo di mescole caricate, generalmente con nero fumo, oli o resine. Tali isolatori sono disponibili con diverse mescole caratterizzate da differente durezza e modulo di taglio. La durezza ha un valore che va da 50-55 ShA per mescole morbide e 70-75 ShA per mescole dure. Il modulo di taglio invece si attesta tra valori rispettivamente di 0,4 MPa e 1,4MPa. Nonostante la geometria sia identica agli LDRB (Figura 2.1) esibiscono un comportamento fortemente non-lineare, con un'elevata rigidità per piccole deformazioni (<20%) che tende a minimizzare la risposta della struttura isolata ad azioni come quella del vento. All'aumentare della deformazione il modulo di taglio inizia a diminuire, rimanendo costante per deformazioni comprese tra il 100% ed il 150%-200%. Superata questa soglia il modulo di taglio inizia nuovamente a crescere a causa della cristallizzazione della gomma ed è accompagnato da un incremento dell'energia dissipata.

Le principali caratteristiche di un dispositivo di tipo HDRB sono (Figura 2.3):

D	Diametro
t_e	Spessore totale degli strati di gomma
t	Spessore del singolo strato di gomma
t_s	Spessore del singolo piatto d'acciaio
H	Altezza totale del dispositivo
n	Numero degli strati di gomma
s	Spessore dei piatti terminali in acciaio

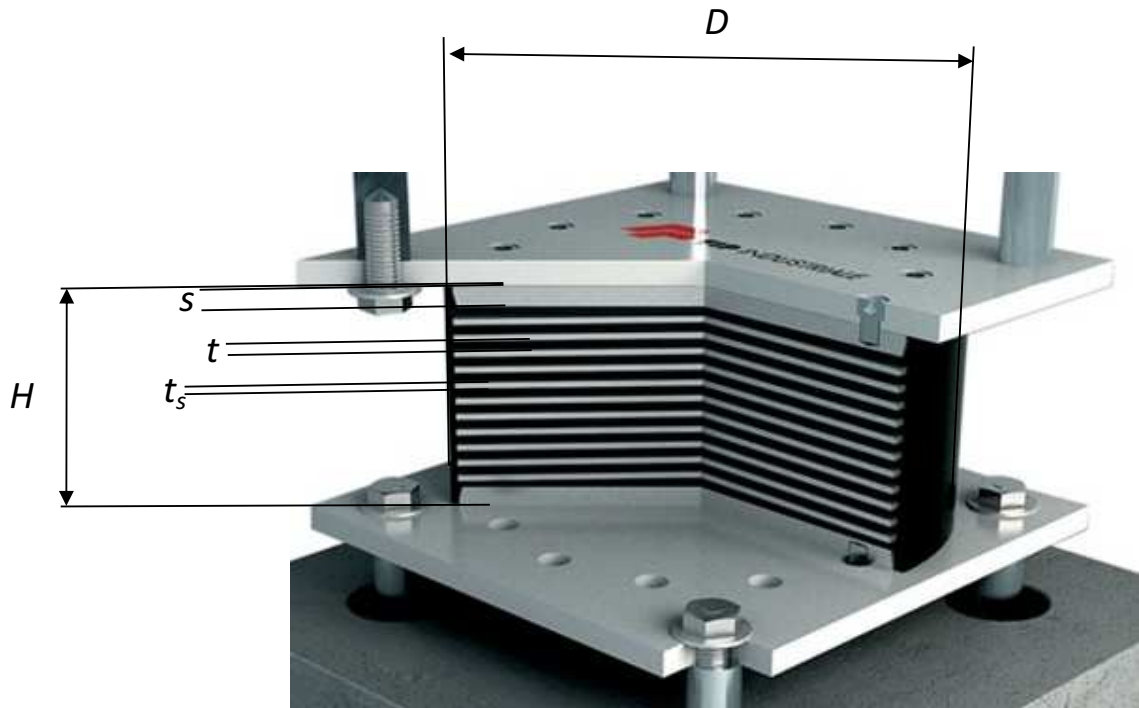


Figura 2.3: Struttura interna di un isolatore elastomerico

Vengono poi definiti anche due fattori di forma. Il fattore di forma primario, definito come:

$$S_1 = \frac{D}{4t} \quad (2.1)$$

è un indice della rigidità verticale del dispositivo in quanto al ridursi dello spessore del singolo strato di elastomero, a parità di diametro, aumenta il confinamento dello stesso e, quindi, la rigidità verticale. Al crescere perciò del fattore di forma primario aumenterà anche la rigidità verticale del dispositivo (Figura 2.4).

Il fattore di forma secondario, definito come:

$$S_2 = \frac{D}{t_e} \quad (2.2)$$

è invece indice della stabilità del dispositivo[11]. Come è facile intuire, al crescere del diametro, rispetto allo spessore totale della gomma, aumenta la stabilità (Figura 2.4). Lo spessore degli strati di acciaio viene trascurato in quanto, come verrà descritto in seguito, la deformazione si concentrerà quasi esclusivamente negli strati di elastomero, potendo considerare i piatti in acciaio infinitamente rigidi.

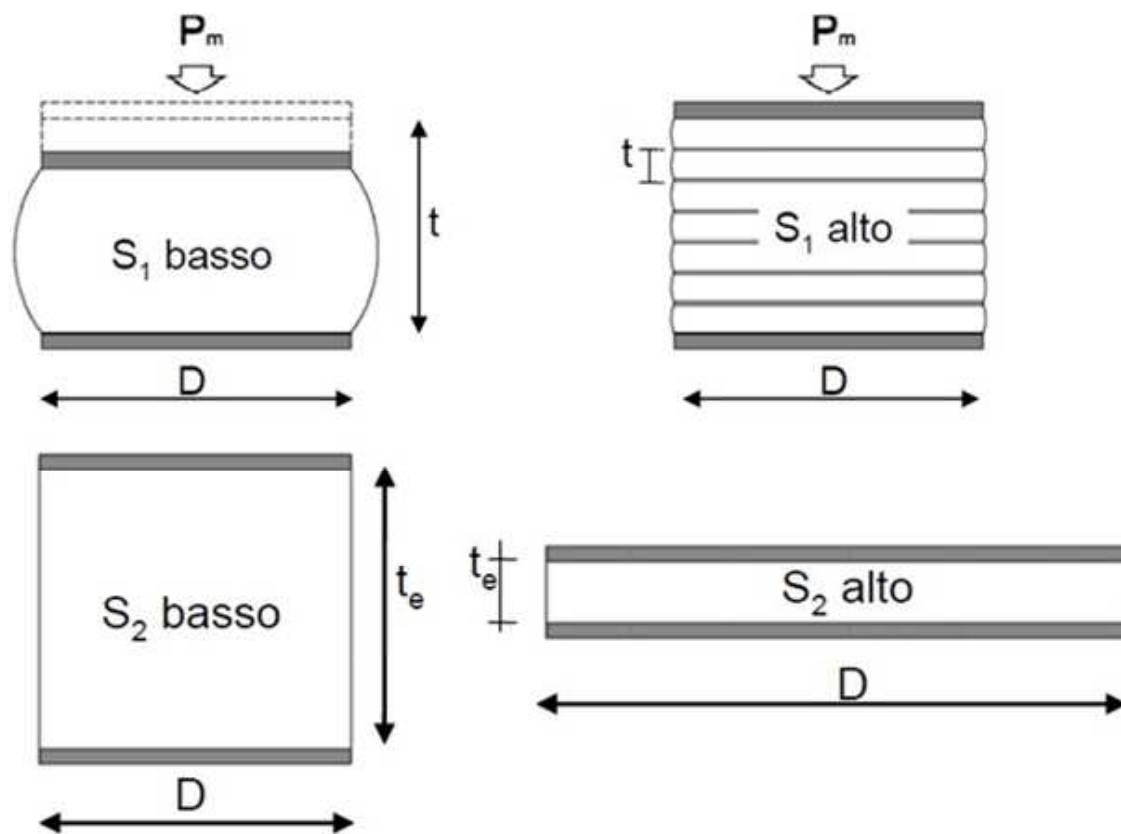


Figura 2.4: Fattori di forma[11]

2.2 Comportamento meccanico

Le caratteristiche principali in grado di definire il comportamento meccanico di un isolatore elastomerico sono la rigidezza orizzontale e verticale dello stesso. La rigidezza orizzontale può essere calcolata come:

$$K_h = \frac{GA_s}{t_e} \quad (2.3)$$

Dove G è il modulo di taglio della gomma e A_s è l'area di taglio dell'isolatore. Tale formulazione considera trascurabile la deformazione flessionale del dispositivo rispetto a quella tagliante. Anche la deformazione dei piatti in acciaio è trascurata in quanto il modulo elastico dell'acciaio risulta più grande di quello della gomma di sei ordini di grandezza.

Volendo effettuare una stima più precisa della rigidezza orizzontale, non trascurando quindi la rigidezza flessionale, si ottengono i seguenti risultati:

$$K_f = \frac{12E_c I}{t_e^3} \quad (2.4)$$

$$K_H = \frac{1}{\frac{1}{K_h} + \frac{1}{K_f}} \quad (2.5)$$

E_c è il modulo di compressione dell'isolatore. Tale modulo può essere stimato in diversi modi, il più semplice è quello che utilizza il metodo di

Gent&Lindley [15] che considera:

$$E_c = E_0 (1 + 2kS_1^2) \quad (2.6)$$

dove E_0 è il modulo elastico della gomma e k è un fattore determinato sperimentalmente. Il modulo a compressione E_c tende, nella maggior parte dei casi, ad assumere valori molto più simili al modulo di bulk dell'elastomero, rispetto al modulo di Young. E' perciò facile intuire come la rigidezza flessionale di un dispositivo di questo tipo sia molto più grande di quella tagliante, rendendo la Equazione 2.3 molto prossima alla Equazione 2.5.

La rigidezza verticale può invece essere calcolata come:

$$K_v = \frac{E_c A}{t_e} \quad (2.7)$$

dove A è l'area in pianta del dispositivo [19].

Le rigidezze appena descritte agiscono, durante un evento sismico, contemporaneamente, è perciò necessario combinare i fenomeni di deformazione orizzontale e verticale. Tale operazione è piuttosto complicata, data soprattutto la forte non linearità del problema in esame, dovuta sia al materiale che alle grandi deformazioni che raggiungono queste tipologie di dispositivi. Generalmente si ricorre ad un metodo semplificato che tiene in conto la cosiddetta area ridotta. Più nello specifico si tratta di considerare il carico verticale come agente solo su una porzione limitata del dispositivo.

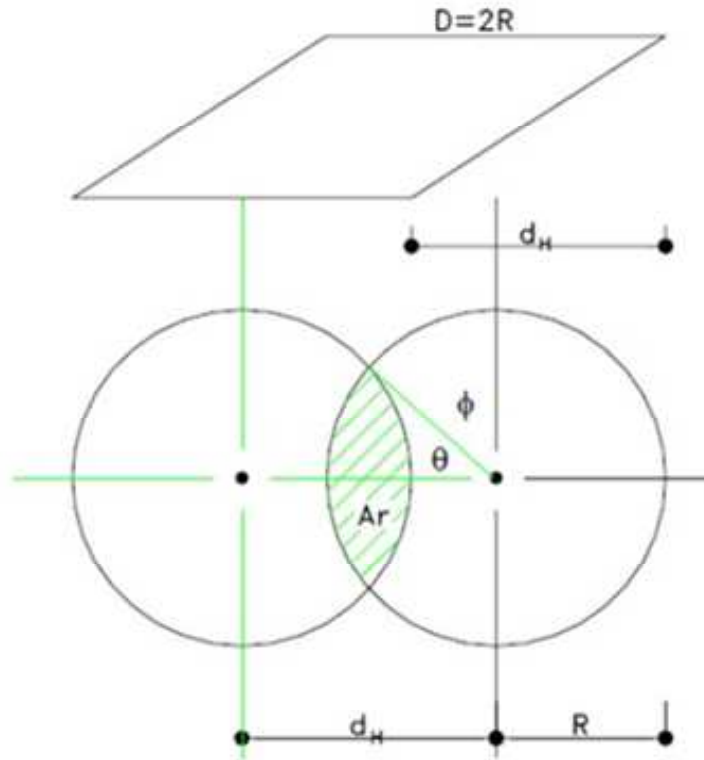


Figura 2.5: Area ridotta di un isolatore circolare [11]

Tale area ridotta può essere facilmente calcolata tramite alcune considerazioni geometriche. In particolare, facendo riferimento alla Figura 2.5, avremo che:

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \theta \tag{2.8}$$

$$d_H = 2R \cos \theta \tag{2.9}$$

$$\theta = \arccos \frac{d_H}{D} \quad (2.10)$$

L'area ridotta può a questo punto essere calcolata come:

$$A_r = 2R^2 (\theta - \sin\theta\cos\theta) = \frac{D^2}{4} (2\theta - \sin 2\theta) \quad (2.11)$$

Ponendo $\varphi = 2\theta$ otteniamo la seguente formulazione per l'area ridotta [11]:

$$A_r = \frac{D^2}{4} (\varphi - \sin\varphi) \quad (2.12)$$

2.3 Stato tensionale

Da quanto appena detto si può facilmente evincere come le caratteristiche di un isolatore di tipo elastomerico siano sostanzialmente riconducibili a quelle della gomma che lo costituisce. Conoscendo lo stato tensionale cui essa è soggetta, si può perciò pensare di poter determinare il comportamento di un dato dispositivo solamente conoscendone le proprietà dell'elastomero che lo compone.

Carico verticale

Si prenda in considerazione uno strato sottile di gomma, vincolato da due piatti rigidi, soggetto ad una compressione verticale (Figura 2.6).

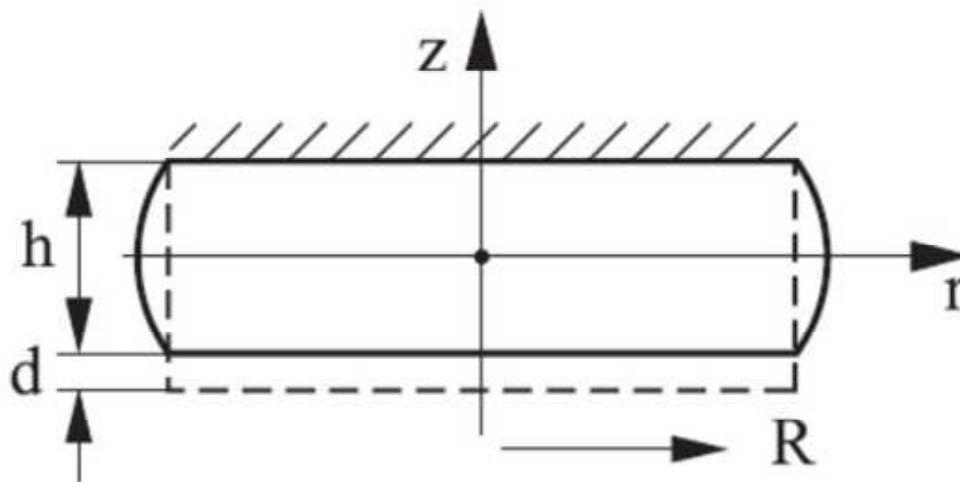


Figura 2.6: Elastomero soggetto a compressione verticale

Le condizioni al contorno di tale problema sono l'assenza di scorrimenti sulle superfici di contatto tra i due materiali e l'incompressibilità della gomma. Tali ipotesi possono essere considerate ragionevoli in quanto la presenza di scorrimento tra le interfacce dei materiali è sintomo del danneggiamento del dispositivo. La sostanziale incompressibilità della gomma può invece essere verificata ricercandone il modulo di Poisson: per un materiale perfettamente incompressibile tale modulo assumerebbe un valore di 0,5, per le gomme tale valore si attesta intorno a 0,4998. Possiamo quindi descrivere il campo di spostamenti all'interno dello strato confinato come una funzione del tipo:

$$u_r(r, z) = C \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - z^2 \right] \frac{r}{R} \quad (2.13)$$

Tale equazione soddisfa la condizione di assenza di scorrimento alle interfacce. La condizione di incompressibilità può invece essere espressa

come:

$$d\pi R^2 = 2\pi R \int_{-h/2}^{h/2} u_r(R, z) dz = \frac{1}{3}\pi RCh^3 \quad (2.14)$$

Tramite questa condizione è possibile calcolare il valore del coefficiente C che vale:

$$C = \frac{3Rd}{h^3} \quad (2.15)$$

E' quindi possibile riscrivere l'equazione del campo di spostamenti come:

$$u_r(r, z) = \frac{3rd}{h^3} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 - z^2 \right] \quad (2.16)$$

e la deformazione tagliante come:

$$\varepsilon_{rz} = \frac{\partial u_r}{\partial z} = -\frac{6d}{h^3}rz \quad (2.17)$$

Da questa equazione si può facilmente evincere come le deformazioni di taglio, e quindi le relative tensioni, crescano linearmente con il raggio e con la coordinata z , risultando nulle nel piano baricentrico e lungo l'asse verticale [30].

Carico orizzontale

Come nel caso precedente, immaginiamo di avere uno strato di elastomero confinato da due piastre rigide. In questo caso le condizioni al contorno saranno l'incompressibilità della gomma, già precedentemente discussa, e il mantenimento delle sezioni orizzontali piane. Queste due ipotesi ci permettono di trascurare la deformazione per flessione del sistema piastre rigide più elastomero. Ciò può essere facilmente verificato andando a calcolare il modulo elastico effettivo dello strato di elastomero confinato.

Mettendoci in un caso di tensioni uniassiali avremmo una legge del tipo:

$$F = EA \frac{d}{h} \quad (2.18)$$

Nel caso in esame tale formula non è veritiera, quindi la stessa formula andrebbe riscritta come:

$$F = \tilde{E}A \frac{d}{h} \quad (2.19)$$

Dove:

$$\tilde{E} = \frac{E(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (2.20)$$

Se il materiale fosse effettivamente incompressibile tale valore tenderebbe ad infinito. Utilizzando un valore reale pari a 0,4998 si ottiene

invece:

$$\tilde{E} = 834E \quad (2.21)$$

In realtà questo risultato è valido per il caso limite di deformazione uniasiale. Come visto nel paragrafo precedente tale ipotesi non è verificata in quanto sono presenti deformazioni angolari non nulle.

Mettendoci invece nella stessa configurazione del caso precedente possiamo calcolarne il modulo effettivo a compressione. In particolare avremo che la densità di energia è pari a:

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}G\varepsilon_{rz}^2 = \frac{18Gd^2r^2z^2}{h^6} \quad (2.22)$$

L'energia totale sarà invece:

$$U = \frac{18Gd^2}{h^6} \int_0^R \int_{-h/2}^{h/2} r^2 z^2 2\pi r dr dz = \frac{3\pi GR^4}{4h^3} d \quad (2.23)$$

Possiamo quindi calcolare la forza necessaria ad ottenere uno spostamento verticale d , che sarà:

$$F_N = \frac{\partial U}{\partial d} = \frac{3\pi GR^4}{2h^3} d \quad (2.24)$$

Confrontando questa formulazione con il caso di sforzo uniassiale possiamo ottenere il modulo elastico effettivo della gomma confinata:

$$\frac{3\pi GR^4}{2h^3}d = E_{eff}\pi R^2\frac{d}{h} \quad (2.25)$$

$$E_{eff} = \frac{3}{2}G \left(\frac{R}{h}\right)^2 = \frac{1}{2}E \left(\frac{R}{h}\right)^2 \quad (2.26)$$

Come si può facilmente dedurre da tale formulazione, nel caso di strati di elastomero molto sottili tale valore risulta molto più elevato del modulo di taglio della gomma [30]. Possiamo quindi dedurre che le deformazioni flessionali possano essere trascurate in quanto le sezioni rimarranno sostanzialmente orizzontali.

Questo risultato permette quindi di considerare l'elastomero come deformato solamente a taglio. Le corrispondenti tensioni e deformazioni τ_{xz} e γ_{xz} saranno costanti e potranno quindi essere facilmente calcolate come:

$$\begin{aligned} \tau_{xz} &= \frac{F_H}{A} \\ \gamma_{xz} &= \frac{d_H}{h} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Dove F_H rappresenta la forza orizzontale e d_H lo spostamento orizzontale.

3 Nanoindentazione

3.1 Principi di base

La nanoindentazione è una tipologia di test meccanico che, impiegando strumentazione ad alta risoluzione, permette di leggere il carico e lo spostamento cui un indentatore è soggetto mentre viene fatto penetrare all'interno di un materiale. Il macchinario, comunemente chiamato nanoindenter, è generalmente costituito da una bobina elettromagnetica con la funzione di attuatore di forza; delle lamelle in acciaio, molto resistenti in direzione orizzontale e molto flessibili in direzione verticale, con la funzione di mantenere verticale la colonna di carico; un sensore capacitivo con la funzione di monitorare lo spostamento e un indentatore che può assumere varie forme a seconda delle necessità (Figura 3.1).

La risoluzione di tale macchinario può variare a seconda dello specifico modello in esame, generalmente però sono in grado di applicare carichi dell'ordine di 1nN (1×10^{-6} N) e misurare spostamenti fino ad un minimo di 0.1nm (1×10^{-10} m) [16].

Tale tecnica è stata sviluppata da Oliver & Pharr [27] per misurare il modulo elastico e la durezza di materiali a scale molto piccole. Le ipotesi di base su cui questo metodo è stato sviluppato sono la contemporanea presenza di deformazioni elastiche e plastiche durante la fase di carico, mentre, durante la fase di scarico, vengono recuperate solamente le deformazioni elastiche [28].

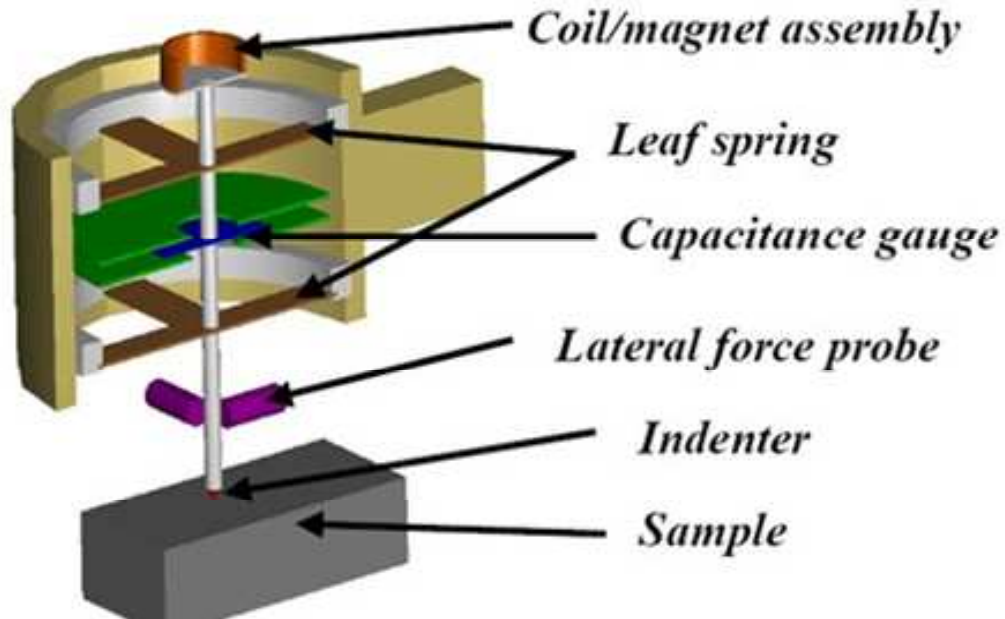


Figura 3.1: Rappresentazione schematica di un nanoindenter [33]

In Figura 3.2 è mostrata una rappresentazione schematica di un test di nanoindentazione. L'indentatore viene spinto all'interno della superficie del campione; quando il target di carico (P_{Max}) o di spostamento (h_{Max}) viene raggiunto, la punta viene rimossa lasciando un'impronta permanente sul materiale. L'evidente non linearità sia della curva di carico che di scarico dipende dalla forma dell'indentatore. Da un lato, durante la fase di carico, $P \propto h^m$ dove m dipende, appunto, dalla forma dell'indentatore [27], dall'altra, durante la fase di scarico, si verifica un progressivo distacco del materiale dall'indentatore, riducendo perciò l'area di contatto [28].

Come precedentemente detto, durante la fase di affondamento il materiale è, generalmente, soggetto ad un insieme di deformazioni elastiche e plastiche. Tale condizione dà luogo a due fenomeni molto particolari: Il "pile up" ed il "sink in" (Figura 3.3). Tali fenomeni sono dovuti alla presenza o meno di deformazioni plastiche ai lati dell'indentato-

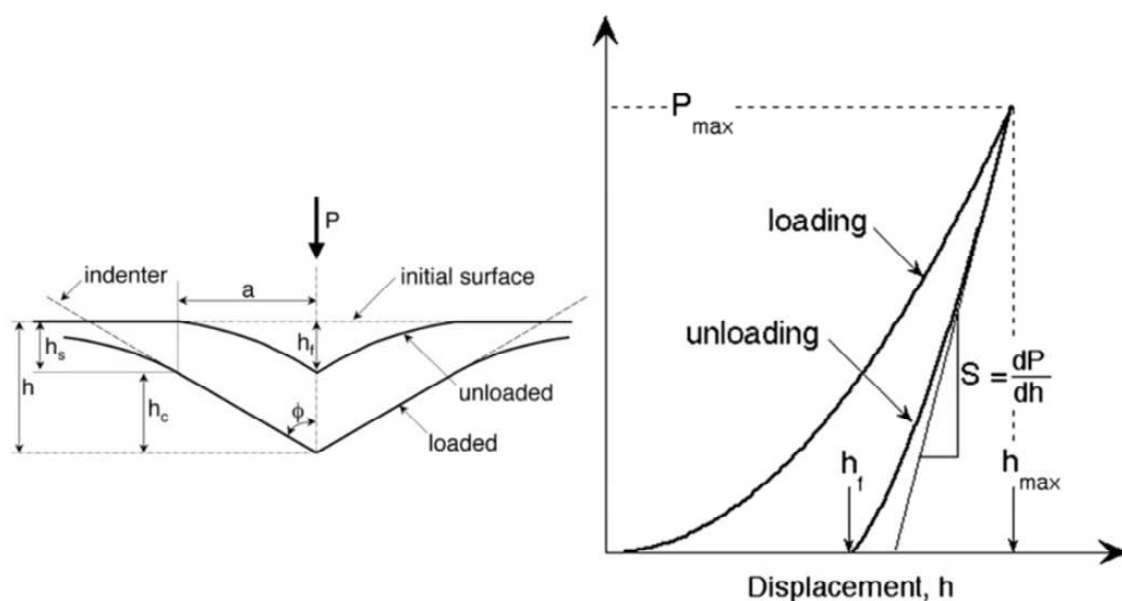


Figura 3.2: Schema di una prova di nanoindentazione [28]

re. Nel caso del pile up vi è una risalita del materiale lungo i bordi dell'indentatore, il quale subisce deformazione plastiche, conferendo così all'impronta residua un aspetto arrotondato. Nel caso del sink in, invece, vi è deformazione puramente elastica ai bordi dell'indentatore. Quando questo viene rimosso tale materiale recupera la deformazione elastica conferendo ai bordi dell'impronta un aspetto convesso.

3.2 Descrizione meccanica di una prova di nanoindentazione

Le grandezze più frequentemente misurate durante una prova di nanoindentazione sono la durezza H ed il modulo elastico E . La durezza viene calcolata come:

$$H = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

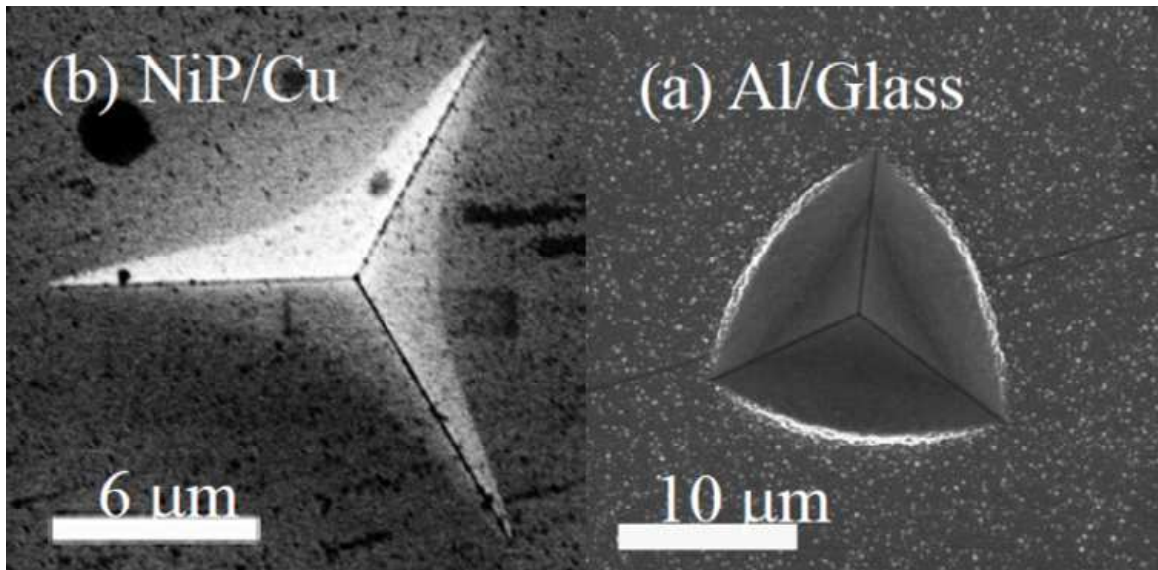


Figura 3.3: Esempio di Sink in (sinistra) e Pile Up (destra)

Dove A è la proiezione dell'area di contatto al carico P .

Il modulo elastico viene invece calcolato a partire dalla pendenza della curva di scarico come:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} S}{2\beta \sqrt{A}} \quad (3.2)$$

Dove E_r è un modulo elastico ridotto che tiene conto anche della deformabilità dell'indentatore, β è una costante che tiene conto della forma dell'indentatore e vale 1 per indentatori a sezione cilindrica, 1.012 per indentatori a sezione quadrata e 1.034 per indentatori a sezione triangolare. S è la pendenza della curva di scarico nel tratto iniziale (Figura 3.2), dove vi è ancora il pieno contatto tra campione ed indentatore.

Per passare dal modulo ridotto E_r al modulo di Young del materiale si

utilizza la seguente formulazione:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (3.3)$$

Dove E_i e ν_i sono rispettivamente il modulo elastico ed il rapporto di Poisson dell'indentatore [16].

Come è evidente dalla trattazione appena svolta, una corretta misura dell'area di contatto risulta essere determinante per ottenere una stima affidabile dei parametri del materiale. Il metodo più largamente utilizzato per calcolare l'area di contatto è il cosiddetto metodo di Oliver & Pharr [27]. Tale metodo permette di determinare l'area di contatto a partire dalla misura dell'affondamento dell'indentatore nel campione. In particolare viene fittata la curva di scarico con una legge di potenza del tipo:

$$P = BA(h - h_f)^m \quad (3.4)$$

Dove h_f è la profondità residua dell'impronta (Figura 3.2) mentre B ed m sono costanti determinate empiricamente. A partire da questa legge è possibile calcolare la rigidezza S come:

$$S = \left(\frac{dP}{dh} \right)_{h=h_{Max}} = Bm(h_{Max} - h_f)^{m-1} \quad (3.5)$$

La pendenza S viene calcolata all'affondamento massimo poichè, come già spiegato, durante la fase di scarico si riduce l'area di contatto.

L'affondamento di contatto h_c viene calcolato come:

$$h_c = h - \varepsilon \frac{P}{S} \quad (3.6)$$

Dove ε è una costante che dipende dalla forma dell'indentatore. A questo punto si può calcolare l'area di contatto come una funzione dell'affondamento di contatto.

$$A = f(h_c) \quad (3.7)$$

La formula più comunemente utilizzata per calcolare l'area di contatto è:

$$A = C_0 h^2 + C_1 h + C_2 h^{1/2} + C_3 h^{1/4} + \dots + C_8 h^{1/128} \quad (3.8)$$

Dove $C_0; C_1; \dots; C_8$ sono costanti determinate empiricamente effettuando un test su un materiale di riferimento (generalmente silice amorfa). Tale formulazione, pur non avendo alcuna base meccanica, ha il grande pregio di poter descrivere un'enorme quantità di geometrie, permettendo quindi di tenere in conto la variazione di forma dell'indentatore a causa dell'usura.

Tale metodologia cade però in difetto in presenza di Pile Up. In un articolo del 1990 Joslin & Oliver [18] hanno osservato l'indipendenza del

rapporto P/S^2 dall'area di contatto. In particolare

$$\frac{P}{S^2} = \frac{\pi}{(2\beta)^2} \frac{H}{E^2} \quad (3.9)$$

L'utilità di questo parametro deriva dalla sua indipendenza dall'area di contatto rendendo possibile il calcolo delle proprietà meccaniche del materiale nei casi in cui la rugosità superficiale comporti un'incertezza nella misura dell'area di contatto. Un altro importante utilizzo di questa formula, è nell'indipendenza dal comportamento di pile-up o sink-in del materiale; difatti, se è noto il modulo elastico del materiale, può essere usata per calcolare accuratamente la durezza, anche in casi di pile-up significativo. Allo stesso modo, se è nota la durezza (per esempio misurata direttamente dall'area di contatto), si può determinare il modulo elastico. Sfortunatamente, quest'espressione non permette di calcolare l'effetto del pile-up simultaneamente sul modulo elastico e sulla durezza.

3.3 Metodo CSM

Da quanto appena discusso risulta evidente come da una prova di nanoindentazione tradizionale si possano ottenere solamente valori puntuali delle caratteristiche meccaniche di un materiale. Ciò è dovuto alla possibilità di misurare il modulo elastico solamente in funzione della curva di scarico della prova. Esiste tuttavia un metodo alternativo che permette di monitorare in maniera continua le caratteristiche del campione, e quindi di ottenere i valori di modulo elastico in funzione dell'affondamento dell'indentatore. Tale metodo prende il nome di CSM (Continuous Stiffness Measurement) e consiste nella sovrapposizione di

una forzante sinusoidale alla normale forzante lineare (Figura 3.4). Questo permette di ottenere tante curve di scarico da cui è quindi possibile calcolare il modulo di Young del materiale lungo l'intera curva di carico. Tale metodologia permette altresì di misurare le caratteristiche dissipative del campione, il quale viene modellato come un solido di Voigt, ovvero un dissipatore in parallelo ad una rigidità elastica.

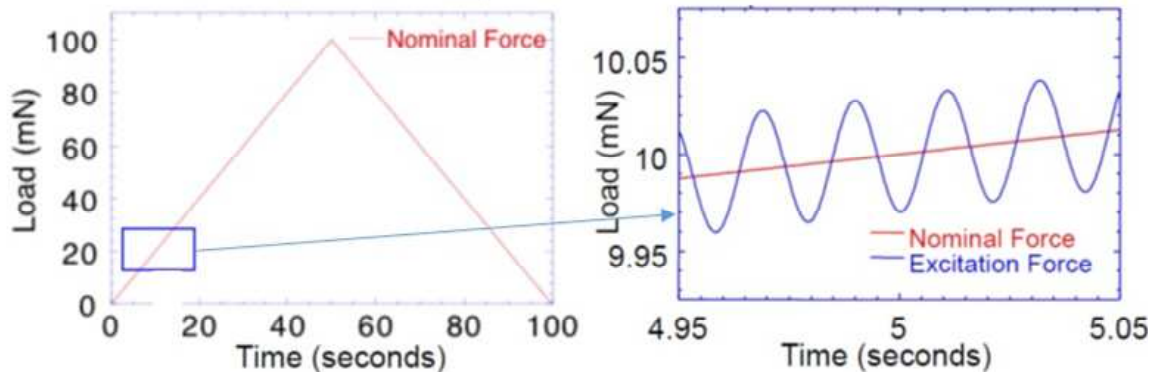


Figura 3.4: Forzante del metodo CSM

Una volta che il regime oscillatorio transitorio si è esaurito, deformazioni e tensioni possono essere espresse nel seguente modo:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_0 \cos \omega t \\ \sigma &= \sigma_0 \cos (\omega t + \varphi)\end{aligned}\tag{3.10}$$

Dove ω rappresenta la pulsazione della forzante e φ uno sfasamento tra deformazioni e tensioni. Con una trasformazione algebrica possiamo riscrivere le tensioni come:

$$\sigma^* = \sigma_0' \cos \omega t + i \sigma_0'' \sin \omega t\tag{3.11}$$

Mettendo in relazione i parametri armonici otteniamo:

$$|\sigma^*| = \sqrt{(\sigma'_0)^2 + (\sigma''_0)^2} \quad (3.12)$$

$$\tan \varphi = \frac{\sigma'_0}{\sigma''_0} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_0 &= \sigma_0 \cos \varphi \\ \sigma''_0 &= \sigma_0 \sin \varphi \end{aligned} \quad (3.14)$$

E' possibile a questo punto calcolare i moduli dinamici del materiale. Il primo, chiamato "Modulo Conservativo", corrisponde al modulo di Young e rappresenta il rapporto tra tensioni e deformazioni in fase.

$$E' = \frac{\sigma'_0}{\varepsilon_0} \quad (3.15)$$

Il secondo, chiamato "Modulo Dissipativo", rappresenta il rapporto tra tensioni e deformazioni fuori fase.

$$E'' = \frac{\sigma''_0}{\varepsilon_0} = C\omega \quad (3.16)$$

Per comprendere meglio tali grandezze risulta utile calcolare il lavoro di

un ciclo:

$$\begin{aligned}
 W &= \oint \sigma d\varepsilon = \oint \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt = \\
 &= \int_0^{2\pi/\omega} (\sigma'_0 \cos \omega t) (-\varepsilon_0 \sin \omega t) dt + \int_0^{2\pi/\omega} (\sigma''_0 \sin \omega t) (-\varepsilon_0 \sin \omega t) dt = 0 - \pi \sigma''_0 \varepsilon_0
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

La componente in fase non produce lavoro quando integrata in un ciclo, indice che si tratta di una deformazione elastica. Quella fuori fase invece produce una dissipazione di energia pari a:

$$W_{Dis} = \pi \sigma''_0 \varepsilon_0 = \pi \sigma_0 \varepsilon_0 \sin \varphi \tag{3.18}$$

La massima energia immagazzinata dalla componente elastica si ottiene ad un quarto di ciclo ed è pari a :

$$W_{St} = \int_0^{\pi/2\omega} (\sigma'_0 \cos \omega t) (-\varepsilon_0 \sin \omega t) dt = \frac{1}{2} \sigma'_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{2} \sigma_0 \varepsilon_0 \cos \varphi \tag{3.19}$$

Il rapporto tra energia dissipata e massima energia immagazzinata risulta quindi una funzione dell'angolo di fase secondo la seguente relazione [32]:

$$\frac{W_{Dis}}{W_{St}} = 2 \tan \varphi \tag{3.20}$$

Eseguendo lo stesso ragionamento in termini di spostamenti possiamo scrivere il lavoro svolto dalle due componenti come:

$$\begin{aligned} W_{Dis} &= \int f_D du = \int_0^{2\pi/\omega} (c\dot{u}) \dot{u} dt = \int_0^{2\pi/\omega} c\dot{u}^2 dt = \\ &= c \int_0^{2\pi/\omega} [\omega u_0 \sin(\omega t + \varphi)]^2 dt = \pi c \omega u_0^2 = 2\pi \zeta k u_0^2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$W_{St} = \frac{1}{2} k u_0^2 \quad (3.22)$$

Essendo k la rigidità del sistema e ζ lo smorzamento, definito come:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (3.23)$$

Calcolando nuovamente il rapporto tra energia dissipata ed energia immagazzinata otteniamo [10]:

$$\frac{W_{Dis}}{W_{St}} = 4\pi\zeta \quad (3.24)$$

E' possibile quindi definire lo smorzamento come:

$$\zeta = \frac{1}{2} \tan \varphi = \frac{1}{2} \frac{E''}{E'} \quad (3.25)$$

3.4 Fattori Rilevanti per la pratica sperimentale

Per una buona pratica sperimentale quando si effettuano test di nanoindentazione, è importante porre l'accento su alcuni aspetti. Il primo è la scelta di una corretta geometria dell'indentatore, poichè ognuno permetterà di ottenere risposte differenti, permettendo quindi di enfatizzare o meno una caratteristica del materiale. La seconda è una corretta preparazione della superficie del campione. E' poi importante anche un controllo dell'ambiente in cui viene effettuato il test, una corretta determinazione del primo contatto tra indentatore e campione ed un'opportuna spaziatura tra le impronta che vengono impresse su di uno stesso campione.

Geometrie degli indentatori

Indentatori Piramidali

Sono quelli usati con maggiore frequenza per motivi costruttivi. Il Berkovich (Figura 3.5), costituito da una piramide a base triangolare, è sicuramente il più utilizzato in quanto la sua geometria permette di realizzare raggi di curvatura all'apice molto piccoli. Questa tipologia di indentatori permette di ottenere una deformazione puramente plastica sotto l'area di contatto, ai bordi dello stesso la deformazione è considerata puramente elastica.

Indentatori Sferici

Gli indentatori sferici vengono generalmente usati quando si cerca di ricostruire il legame costitutivo del materiale. Ciò è dovuto al fatto che per bassi affondamenti la deformazione sotto l'area di contatto è puramente elastica e vi è una graduale transizione alla fase plastica del materiale, che aumenta con l'affondamento. Tale indentatore tuttavia viene generalmente utilizzato per investigare le caratteristiche del materiale in esame a scale più grandi rispetto a quelli piramidali. Ciò è

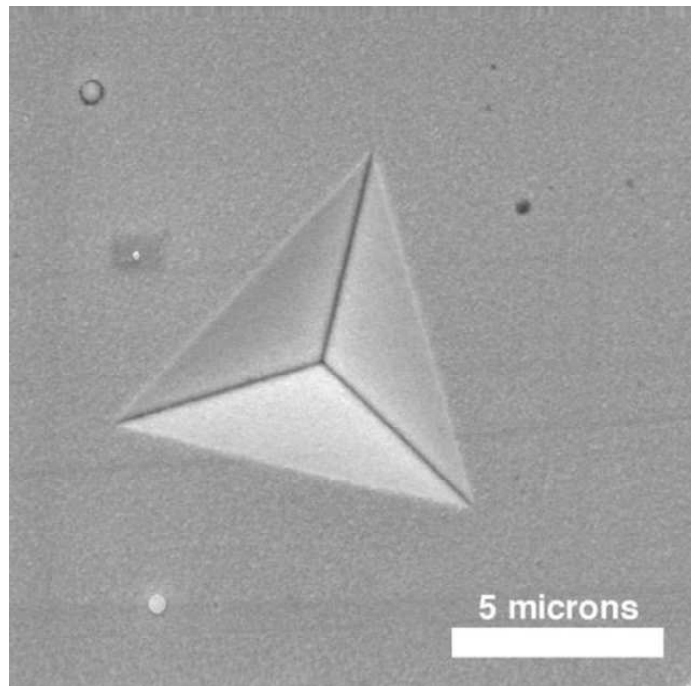


Figura 3.5: Impronta residua di un indentatore Berkovich[29]

dovuto alla difficile realizzazione di sfere perfette a scale molto piccole (Figura 3.6) [16].

Indentatori del tipo “Cube-Corner”

Si tratta di indentatori ricavati dallo spigolo di un cubo. Hanno una geometria molto simile all’indentatore Berkovich, tuttavia la principale differenza può essere riscontrata nell’angolo dello spigolo con la mezzeria dell’indentatore. Nel caso dell’indentatore Berkovich tale angolo è pari a 65.3° mentre nei caso di un’indentatore di tipo cube-corner tale angolo si assesta a 34.3° . Questa differenza fa sì che si sviluppi una concentrazione di stress decisamente superiore lungo le superfici di contatto, creando la formazione e l’apertura di cricche nel materiale. Viene quindi maggiormente utilizzato per misurare la tenacità a frattura (Figura 3.7) [16].

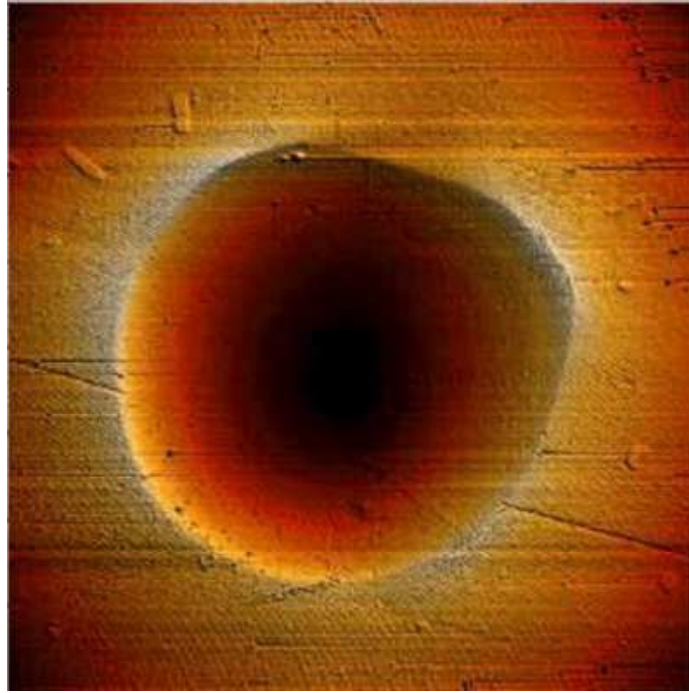


Figura 3.6: Impronta residua di un indentatore sferico[29]

Indentatori Conici

Questo tipo di indentatori sono usati raramente a causa dei problemi di realizzazione che li caratterizzano, risulta infatti molto complicato costruire un cono con un raggio di curvatura molto ridotto all'apice. Risultano quindi poco adatti a misurare le caratteristiche dei materiali a piccole profondità. La loro semplice geometria li rende tuttavia degli ottimi strumenti in termini di modellazione dei fenomeni, sia di contatto che deformativi, che avvengono durante una prova di nanoindentazione (Figura 3.8) [16].

Indentatore di tipo "Flat Punch"

Gli indentatori di tipo flat punch sono i più utilizzati per il test di materiali polimerici caratterizzati da un forte comportamento viscoelastico. La loro semplice geometria, costituita da un cilindro ad asse verticale,

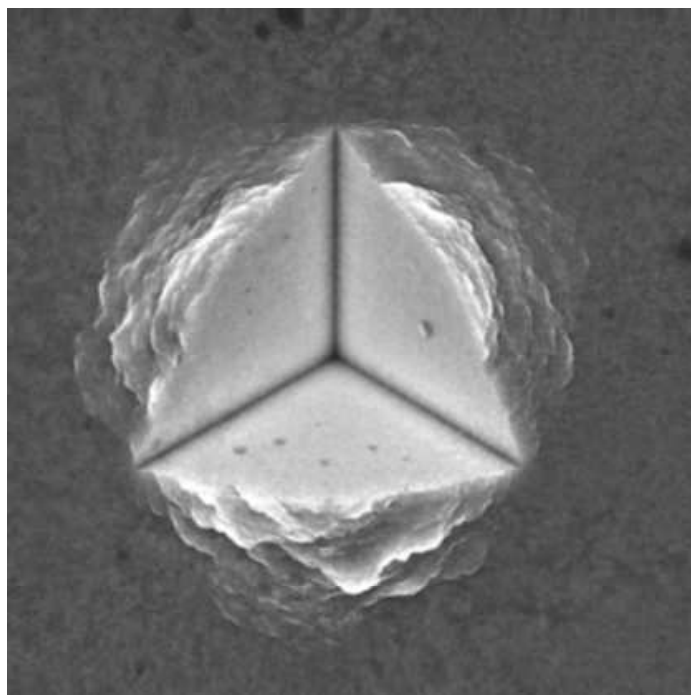


Figura 3.7: Impronta residua di un indentatore Cube-Corner[29]

in cui l'area di contatto rimane costante all'aumentare dello spostamento, permette infatti di raggiungere le condizioni di moto stazionario con relativa facilità. Esso è tuttavia soggetto a problemi di natura costruttiva, in quanto la loro realizzazione a piccole scale risulta complicata, e di natura operativa. La presenza di una superficie di contatto piana evidenzia infatti problemi di mancanza di parallelismo tra indentatore e campione. Tale difetto è tuttavia ineliminabile e viene generalmente superato applicando un precarico al materiale, ovvero scartando i dati di affondamento iniziale finché non si considera raggiunto il pieno contatto (Figura 3.9).

Preparazione della superficie

Il controllo della rugosità superficiale del campione è estremamente importante in questo tipo di test poiché l'area di contatto, necessaria alla

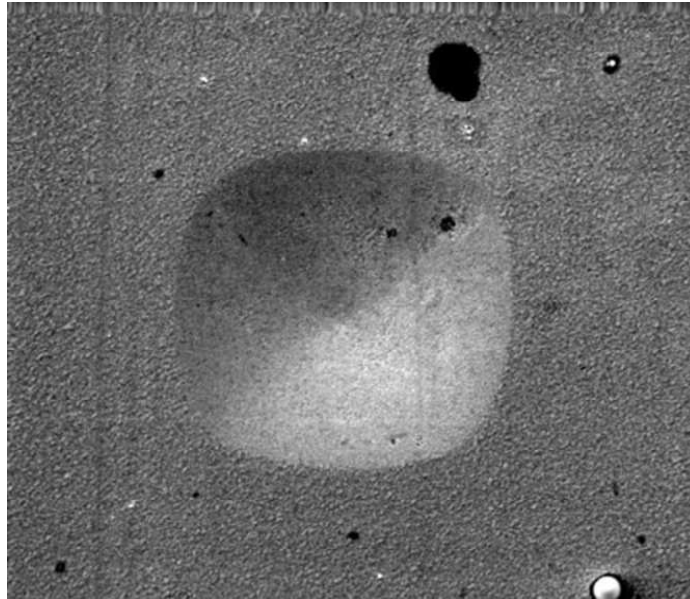


Figura 3.8: Impronta residua di un indentatore conico[29]

determinazione delle caratteristiche del materiale, è calcolata a partire dall'affondamento di contatto e dalla funzione d'area nel, l'ipotesi che la superficie sia piana. La rugosità accettabile dipende perciò dall'affondamento massimo che si vuole raggiungere o dalla profondità a cui si vogliono ottenere i parametri del materiale (un test in cui si vogliono misurare le proprietà di un campione nei primi nanometri di affondamento necessiterà di una rugosità superficiale nettamente minore rispetto ad un test in cui ci si spinge ad elevate profondità) e dall'incertezza nella funzione di forma dell'indentatore (Equazione 3.8). I problemi maggiori si incontrano quando la lunghezza d'onda caratteristica della rugosità è paragonabile al diametro di contatto. In questo caso l'area di contatto che viene stimata dalla curva carico affondamento sottostima la vera area di contatto quando la prova viene effettuata nelle "valli" e la sovrastima sulle "creste". L'ordine di grandezza dell'errore dipende sia dalla lunghezza d'onda che dall'ampiezza della rugosità rapportate alla superficie di contatto. Bisognerebbe perciò preparare il campione in modo che

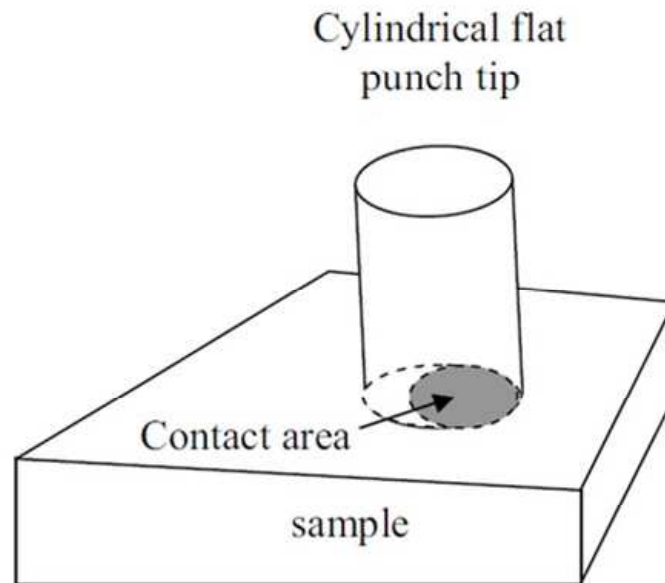


Figura 3.9: Rappresentazione schematica del mancato parallelismo tra indentatore di tipo "Flat Punch" e campione [12]

l'ampiezza relativa alla lunghezza d'onda di disturbo, sia minimizzata.

Controllo dell'ambiente esterno

Per utilizzare questa tecnica in tutto il suo potenziale, sarebbe a dire sfruttare al massimo l'estrema risoluzione di spostamento di cui il macchinario è capace, è necessario prendere alcune precauzioni nella scelta e preparazione dell'ambiente di prova. Errori ed incertezze nella misurazione dello spostamento derivano da due sorgenti distinte: vibrazioni e variazioni di temperatura che causano dilatazione e restringimento del campione e delle apparecchiature. Per minimizzare le vibrazioni è opportuno posizionare il macchinario al piano terra in un luogo in cui il passaggio di personale sia ridotto e munirlo di isolatori tridimensionali (generalmente realizzati con appoggi in gomma). La stabilità termica può essere ottenuta incapsulando le apparecchiature in un armadietto

isolante per ridurre il gradiente termico e fornendo la stanza in cui è collocato con un impianto di climatizzazione che permetta un controllo della temperatura con un errore di $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Individuazione del primo contatto

Una parte molto importante nelle procedure di nanoindentazione è un'accurata individuazione della superficie del campione, e quindi del primo contatto. Anche in questo caso per affondamenti molto ridotti questo fattore diventa particolarmente importante poiché, per piccoli errori nella determinazione della superficie, si ottengono errori nella stima dell'affondamento, e, di conseguenza, grandi errori nella valutazione di tutte le proprietà che vengono calcolate a partire dalla curva carico-affondamento. I metodi per determinare l'affondamento di contatto sono frequentemente basati sul monitoraggio continuo, durante la fase di approccio alla superficie, di un parametro che sia molto sensibile al contatto. Per materiali duri e rigidi, come ad esempio i ceramici e i metalli che hanno subito forti processi di incrudimento, il carico (misurato generalmente in controeazione) o la rigidità di contatto, che subiscono un'impennata al primo contatto, sono i parametri usati più di frequente. Per materiali più deformabili e dotati di una maggiore capacità dissipativa, come polimeri, tessuti biologici o elastomeri, si preferisce utilizzare, come parametro identificativo, la rigidità dinamica, in quanto lo sfasamento che si ottiene tra la forzante e l'affondamento, può fornire un'indicazione più accurata dell'avvenuto contatto.

Distanza fra test adiacenti

Per evitare che vi siano interferenze fra prove che vengono fatte su di uno stesso campione, è opportuno separare indentazioni successive di

almeno 20-30 volte la profondità che viene raggiunta usando indentatori piramidali. Per differenti geometrie si considera generalmente 7-10 volte il raggio di contatto. Risulta molto importante effettuare delle indentazioni preliminari (dalle 5 alle 10) su campioni di proprietà note, come la silica amorfa, così da poter immediatamente rendersi conto se la spaziatura ipotizzata sia corretta semplicemente confrontando le proprietà misurate con quelle note.

4 Applicazione delle tecniche di nanoindentazione alla diagnosi degli isolatori elastomerici

Per applicare le tecniche di nanoindentazione agli isolatori elastomerici occorre trasformare i dati carico-affondamento ottenuti tramite questo test nelle curve $\tau - \gamma$ con cui vengono qualificati ed accettati gli isolatori. La geometria ideale di indentatore da utilizzare per queste prove è sicuramente quella di tipo “Flat Punch”, poiché, oltre alla già citata possibilità di determinare le caratteristiche dissipative, tale geometria è caratterizzata da una curva carico affondamento lineare. Ciò permette di poter estrarre la curva $\sigma - \varepsilon$ direttamente dalla curva di carico. Come evidenziato da De Paoli [12] tale procedura permette di eliminare gli errori dovuti alla maggiore rigidità che si legge nella curva di scarico a causa degli effetti viscosi.

4.1 Calcolo della curva $\sigma - \varepsilon$

Il regime tenso-deformativo indotto da una prova di nanoindentazione può essere calcolato a partire da alcuni concetti di meccanica del contatto [17].

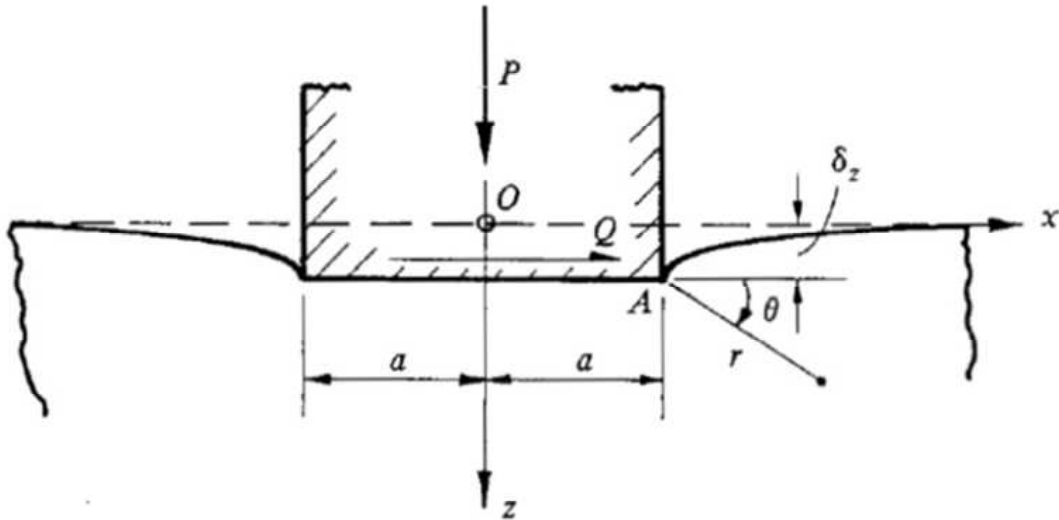


Figura 4.1: Rappresentazione schematica di un indentatore flat punch che penetra in una superficie [17]

Con riferimento alla Figura 4.1 avremo uno spostamento uniforme all'interno dell'area caricata δ_z ed una pressione calcolabile come:

$$p = p_0 \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right)^{-1/2} \quad (4.1)$$

Essendo

$$\tilde{E} = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (4.2)$$

E' possibile definire lo spostamento come:

$$\delta_z = \frac{\pi p_0 a}{\tilde{E}} \quad (4.3)$$

Il carico verticale potrà quindi essere espresso come:

$$P = 2\pi a^2 p_0 \quad (4.4)$$

La tensione e la deformazione verticale vengono quindi calcolati come:

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{P}{\pi a^2} \\ \varepsilon_z &= \frac{2\delta_z}{\pi a} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Occorre poi ricordare che il comportamento dissipativo della gomma potrebbe portare ad una sovrastima delle caratteristiche elastiche, specie durante una prova di tipo CSM. Occorre quindi depurare le caratteristiche dinamiche per ricondurci alla condizione appena descritta. Per far ciò utilizziamo come modello di partenza quello di Voigt-Kelvin, con una rigidità elastica ed un organo dissipativo in parallelo. Definita come E la rigidità dell'organo elastico e come η la caratteristica dell'organo dissipativo possiamo scrivere:

$$\sigma = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (4.6)$$

Ricordando che, nelle condizioni di moto stazionario

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_0 \cos(\omega t) \\ \sigma &= \sigma_0 \cos(\omega t + \varphi)\end{aligned}\tag{4.7}$$

Possiamo eguagliare la Equazione 4.6 con la Equazione 4.7 ottenendo:

$$\sigma_0 \cos(\omega t + \varphi) = E\varepsilon_0 \cos(\omega t) - \eta\omega\varepsilon_0 \sin(\omega t) = E\varepsilon_0 \cos(\omega t) + \eta\omega\varepsilon_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)\tag{4.8}$$

Passando nel piano complesso è possibile riscrivere la Equazione 4.8 come:

$$\sigma_0 (\cos \varphi + i \sin \varphi) = E\varepsilon_0 + i\eta\omega\varepsilon_0\tag{4.9}$$

Ricordando che

$$\begin{aligned}\sigma_0 \cos \varphi &= \sigma'_0 = E\varepsilon_0 \\ \sigma_0 \sin \varphi &= \sigma''_0 = \eta\omega\varepsilon_0 \\ \sigma^* &= \sigma_0 (\cos \varphi + i \sin \varphi)\end{aligned}\tag{4.10}$$

Possiamo scrivere

$$\sigma^* = E\varepsilon_0 + i\eta\omega\varepsilon_0\tag{4.11}$$

Dividendo per ε_0 otteniamo:

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon_0} = E + i\eta\omega \quad (4.12)$$

E^* è definito Modulo Complesso del materiale che tiene conto della rigidità elastica e dissipativa contemporaneamente. Tale modulo si ottiene semplicemente facendo il rapporto tra tensioni e deformazioni in quanto

$$|\sigma^*| = \sqrt{(\sigma_0 \cos \varphi)^2 + (\sigma_0 \sin \varphi)^2} = \sigma_0 \quad (4.13)$$

Per isolare la parte elastica torna utile definire un coefficiente α definito come:

$$\alpha = \frac{|E^*|}{E'} = \frac{|\sigma^*|}{\sigma'_0} \quad (4.14)$$

Ottenendo quindi

$$\sigma'_0 = \frac{|\sigma^*|}{\alpha} = \frac{\sigma_0}{\alpha} \quad (4.15)$$

4.2 Calcolo della curva $\tau - \gamma$

In un test di taglio tradizionale su un isolatore il dispositivo è soggetto ad una combinazione di carico verticale ed orizzontale. Nel singolo strato di gomma nasceranno quindi un insieme di tensioni tangenziali orizzontali

e normali verticali. Prendendo come punto di riferimento il baricentro del singolo strato di gomma, possiamo attribuire le tensioni normali verticali solamente alla presenza del carico verticale, mentre le tensioni tangenziali saranno generate solamente dalla deformazione a taglio. In tale punto avremo:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_y = \sigma_z \\ \tau_{xy} &= \tau_{yz} = 0 \\ \tau_{xz} &\neq 0\end{aligned}\tag{4.16}$$

Gli invarianti delle tensioni possono quindi essere scritti come:

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z\tag{4.17}$$

$$I_2 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2\tag{4.18}$$

$$I_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z - 2\tau_{xy}\tau_{xz}\tau_{yz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2\tag{4.19}$$

Ponendo quindi

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0\tag{4.20}$$

Si possono calcolare le tensioni principali che risultano pari a:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_z \\ \sigma_2 &= \sigma_z - \tau_{xz} \\ \sigma_3 &= \sigma_z + \tau_{xz}\end{aligned}\tag{4.21}$$

Le deformazioni assumo quindi la formulazione

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\sigma_z}{E}(1 - 2\nu) \\ \varepsilon_2 &= \frac{\sigma_z}{E}(1 - 2\nu) - \frac{\tau_{xz}}{E}(1 + \nu) \\ \varepsilon_3 &= \frac{\sigma_z}{E}(1 - 2\nu) + \frac{\tau_{xz}}{E}(1 + \nu)\end{aligned}\tag{4.22}$$

Ricordando che $\tau_{xz} = G\gamma_{xz}$ e che $E = 2(1 + \nu)G$ le deformazioni principali possono essere riscritte come:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{\sigma_z}{E}(1 - 2\nu) \\ \varepsilon_2 &= \frac{\sigma_z}{E}(1 - 2\nu) - \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \varepsilon_3 &= \frac{\sigma_z}{E}(1 - 2\nu) + \frac{\gamma_{xz}}{2}\end{aligned}\tag{4.23}$$

Facendo l'ipotesi di materiale incompressibile, e quindi ponendo $\nu = 0.5$,

si ottiene:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= 0 \\ \varepsilon_2 &= -\frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \varepsilon_3 &= +\frac{\gamma_{xz}}{2}\end{aligned}\tag{4.24}$$

Unendo le relazioni appena viste con quelle della sezione 4.1 è quindi possibile trasformare i risultati carico-affondamento di una prova di nanoindentazione in un legame $\tau - \gamma$ tipico di un test su un isolatore. E' quindi possibile, in maniera teorica, ricostruire il ramo di carico di un test su un dispositivo elastomerico a partire da uno di nanoindentazione.

5 Attività Sperimentale

Per verificare la correttezza delle ipotesi teoriche fin'ora sviluppate è stata condotta una piccola campagna sperimentale, confrontando i risultati di test effettuati su dispositivi elastomerici con quelli ottenuti da prove di nanoindentazione su campioni prelevati dal dispositivo.

5.1 Attività preliminari

In prima fase è stata commissionata la realizzazione di un microcarotatore in grado di prelevare campioni di gomma dagli isolatori. Tale dispositivo è stato progettato dalla *BST Best Solution Tools* di *Bassotti Stefano* (<http://www.bassottis.it/>) rispettando i seguenti vincoli:

- Diametro esterno $d_e < 5mm$
- Diametro interno $d_i \approx 3mm$
- Lunghezza di carotaggio $L \geq 250mm$

Queste limitazioni sono legate rispettivamente alla necessità di poter prelevare i campioni all'interno delle piastre d'acciaio, di avere un campione sufficientemente grande così da ridurre il disturbo ed avere la possibilità di fare più misure sullo stesso campione, ed infine una lunghezza tale da poter effettuare i prelievi anche al centro dell'isolatore. In Figura 5.1 è visibile lo schema di progetto fornito dalla *BST* mentre in Figura 5.2 e

Figura 5.3 si può vedere rispettivamente il carotatore nella sua lunghezza e frontalmente.

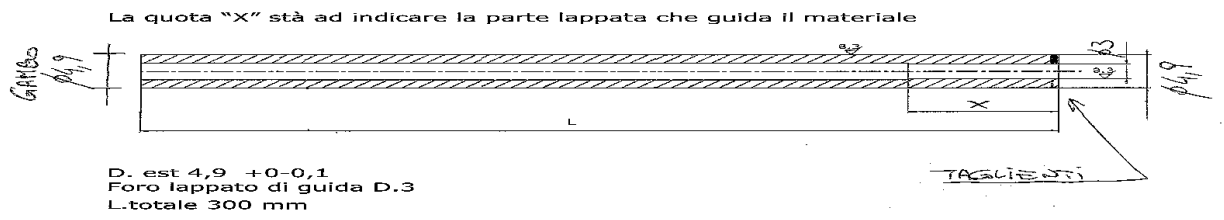


Figura 5.1: Schema carotatore

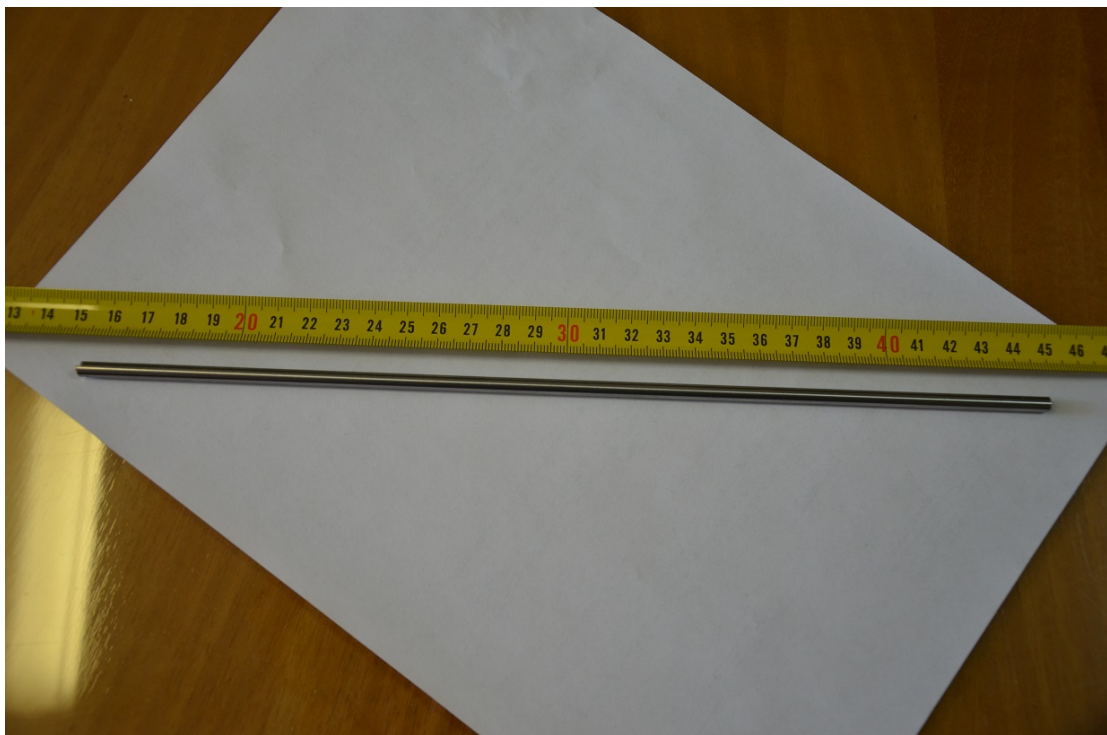


Figura 5.2: Vista longitudinale del carotatore



Figura 5.3: Vista frontale del carotatore

Sono poi stati effettuati dei test su dell'elastomero prelevato da una ruota di mulletto (Figura 5.4 e Figura 5.5) per valutare il disturbo di campionamento.



Figura 5.4: Ruota di mulletto



Figura 5.5: Dettaglio della ruota di muletto

Nello specifico sono stati prelevati due campioni, il primo tramite il carotatore ed il secondo tramite il taglio manuale di una macrosezione della ruota (Figura 5.6).



Figura 5.6: Campioni prelevati dalla ruota

Il campione carotato è stato quindi inglobato a freddo, per evitare che le operazioni di inglobamento a caldo, generalmente più rapido ed efficace, potessero portare ad una variazione delle caratteristiche del materiale, in una matrice a base epossidica, preventivamente incollandolo sul fondo dello stampo per garantire che rimanesse verticale (Figura 5.7).



Figura 5.7: Inglobamento del campione

Una volta che la resina si è indurita si è proceduto ad estrarre il campione dallo stampo (Figura 5.8) ed a tagliarlo. Il taglio è stato effettuato con l'ausilio di una troncatrice metallografica lungo due piani paralleli per garantirne la planarità (Figura 5.9).



Figura 5.8: Campione inglobato a seguito dell'estrazione dallo stampo

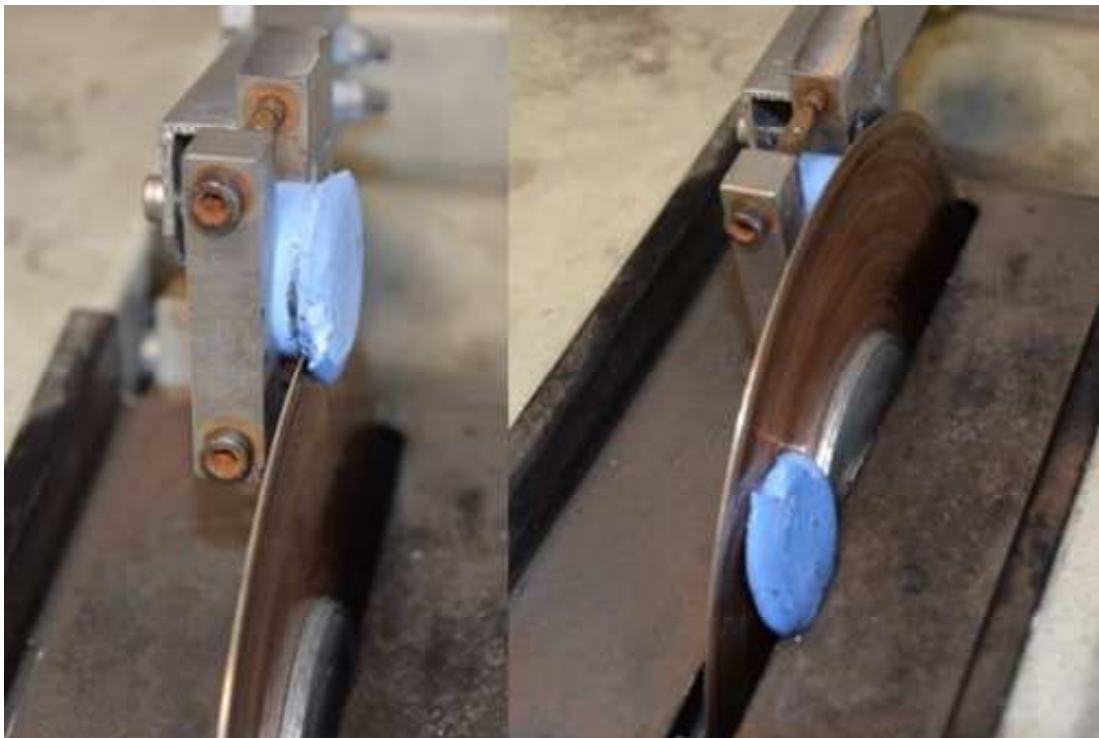


Figura 5.9: Taglio del campione inglobato

Si è passati quindi alla fase di lucidatura che è avvenuta manualmente tramite l'utilizzo di una lappatrice (Figura 5.10) e fogli abrasivi 3M. La dimensione iniziale dell'abrasivo è stata scelta pari a $15\mu m$ ed è stata progressivamente ridotta passando per $6\mu m$, $3\mu m$, ed infine $1\mu m$. Dopo ogni step di lucidatura il campione è stato lavato in un bagno ultrasonico (Figura 5.11) per rimuovere ogni residuo di lappatura e controllato con un microscopio ottico, a vari livelli di ingrandimento, per valutarne il grado di lucidatura. In caso di esito positivo si riduceva la dimensione dell'abrasivo, altrimenti si eseguiva un ulteriore step con l'abrasivo precedente (Figura 5.12 e Figura 5.13).



Figura 5.10: Lappatrice



Figura 5.11: Bagno ultrasonico

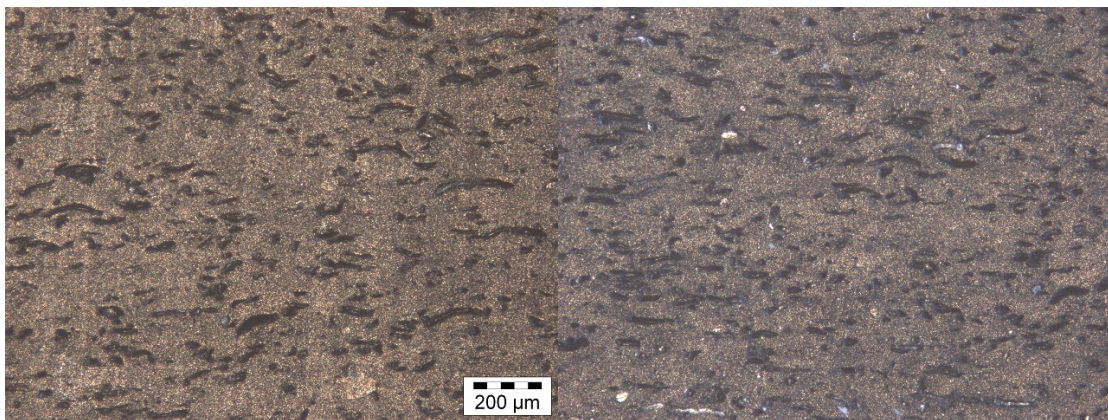


Figura 5.12: Gomma a differenti livelli di lucidatura per piccoli ingrandimenti (5x).
Sinistra: Scarso grado di lucidatura. Destra: Elevato grado di lucidatura.

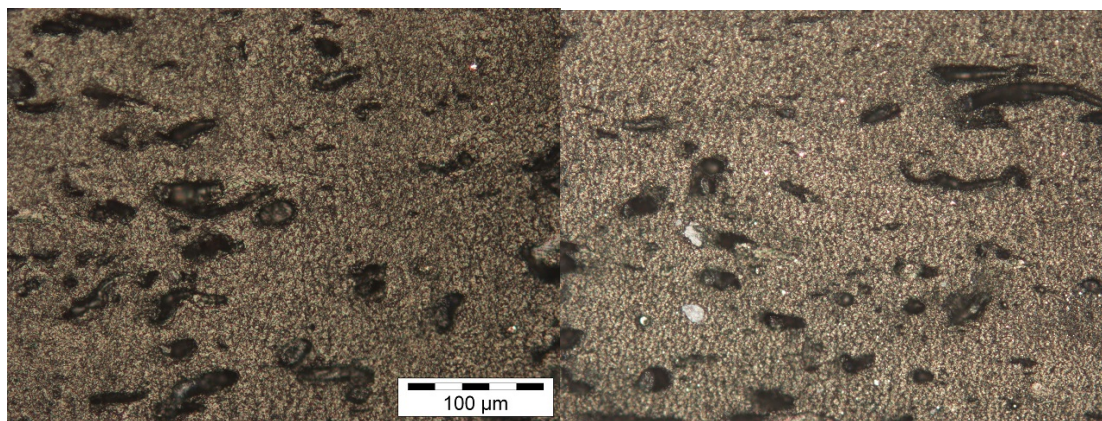


Figura 5.13: Gomma a differenti livelli di lucidatura per grandi ingrandimenti (20x). Sinistra: Scarso grado di lucidatura. Destra: Elevato grado di lucidatura.

Il campione macroscopico è stato sottoposto agli stessi trattamenti con esclusione dell'inglobamento in quanto, date le sue dimensioni, non risultava necessario.

Si sono quindi eseguiti dei test di nanoindentazione su entrambi i campioni utilizzando un metodo a frequenza variabile ed una punta di tipo “Flat Punch ed un posizionamento random. Invece di una prova CSM classica, in cui l'indentatore affonda gradualmente nel materiale, la punta è stata spinta all'interno del materiale, fino ad un prefissato affondamento ($5\mu m$), e poi è stata fatta oscillare a diverse frequenze (Tabella 5.1).

Affondamento [μm]	Ampiezza Oscillazione [nm]	Frequenza [Hz]
5	50	45
5	50	17.374
5	50	6.708
5	50	2.59
5	50	1

Tabella 5.1: Parametri dei test preliminari

Purtroppo, a causa della natura fortemente multifasica dei campioni, la maggior parte dei test è stata scartata, in quanto i risultati tra i

due campioni non erano confrontabili. Fortunatamente due test (uno per campione) sono avvenuti su di una stessa fase ed ad una distanza paragonabile (circa $500\mu m$ e $600\mu m$) dalle fasi adiacenti. I risultati di tale test sono visibili in Figura 5.14.

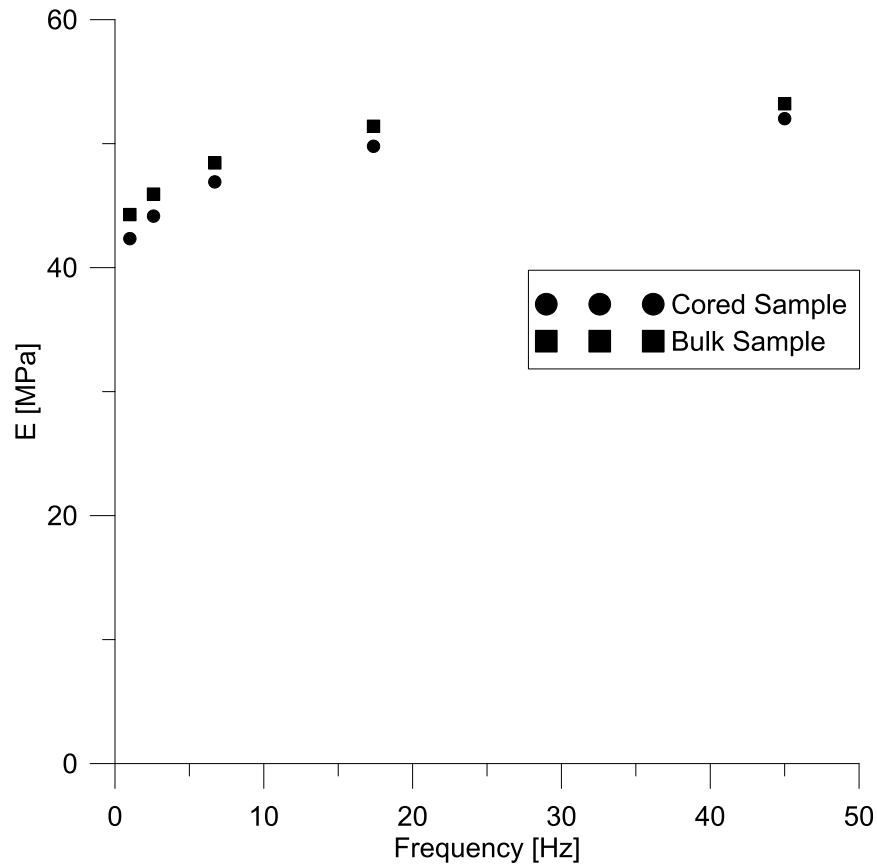


Figura 5.14: Risultati dei test preliminari

5.2 Test standard sugli isolatori

Si sono poi eseguiti dei test su una coppia di isolatori (Figura 5.15), forniti dal laboratorio di strutture situato presso la sede di Architettura di Valle Giulia dell'università La Sapienza di Roma, nella appena citata struttura. Le caratteristiche geometriche dei dispositivi sono visibili in Tabella 5.2



Figura 5.15: Coppia di isolatori

D [mm]	H[mm]	t_e [mm]
500	206	126
t [mm]	t_s [mm]	n
6	2	21
A mm ²	S_1	S_2
196250	20.833	3.968

Tabella 5.2: Caratteristiche geometriche degli isolatori

Per determinare lo spessore degli strati di gomma e di acciaio si è dovuto effettuare un taglio della gomma più esterna così da mettere in mostra le piastre metalliche (Fig. 5.16).



Figure 5.16: Dettaglio sullo spessore degli strati di gomma

Su tali dispositivi sono stati eseguiti un totale di 15 test con differenti livelli deformativi e di carico assiale. I parametri di prova sono riassunti in Tab. 5.3.

σ [MPa] \ γ	5%	25%	50%	75%	100%
2	1	2	3	4	5
4	6	7	8	9	10
6	11	12	13	14	15

Table 5.3: Parametri di prova

Così come previsto dall'attuale quadro normativo [8, 24, 25], sono stati effettuati, per ogni prova, tre cicli. Tuttavia, a causa delle scarse condizioni dell'apparecchiatura utilizzata, non è stato possibile arrivare ad elevati spostamenti negativi, impedendo così di poter effettuare dei cicli completi, se non per i primi due valori di deformazione.

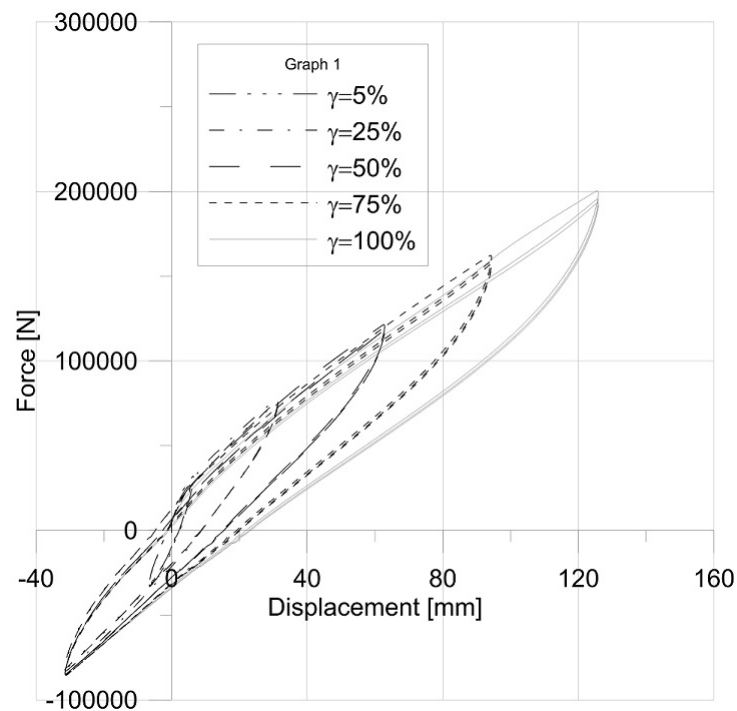


Figure 5.17: Risultati per una compressione verticale di 2MPa

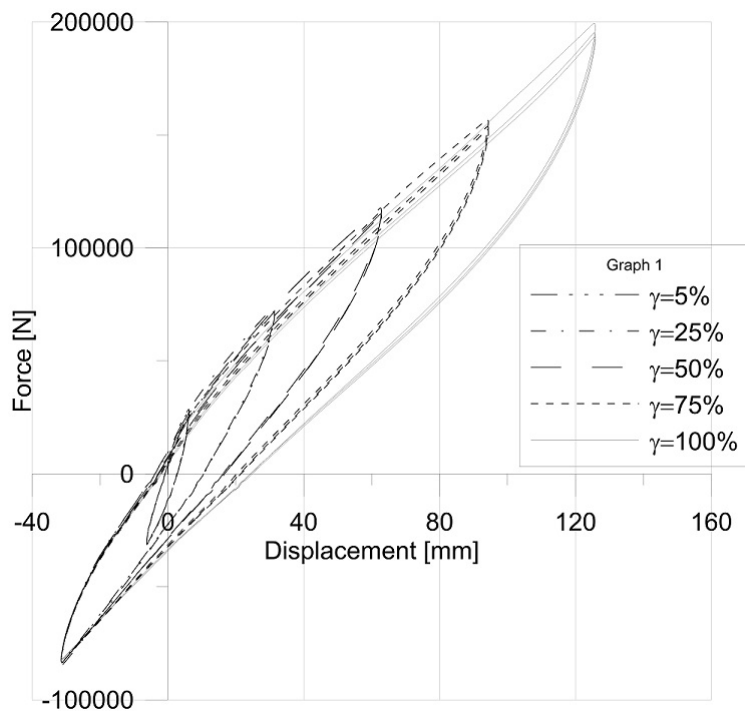


Figure 5.18: Risultati per una compressione verticale di 4MPa

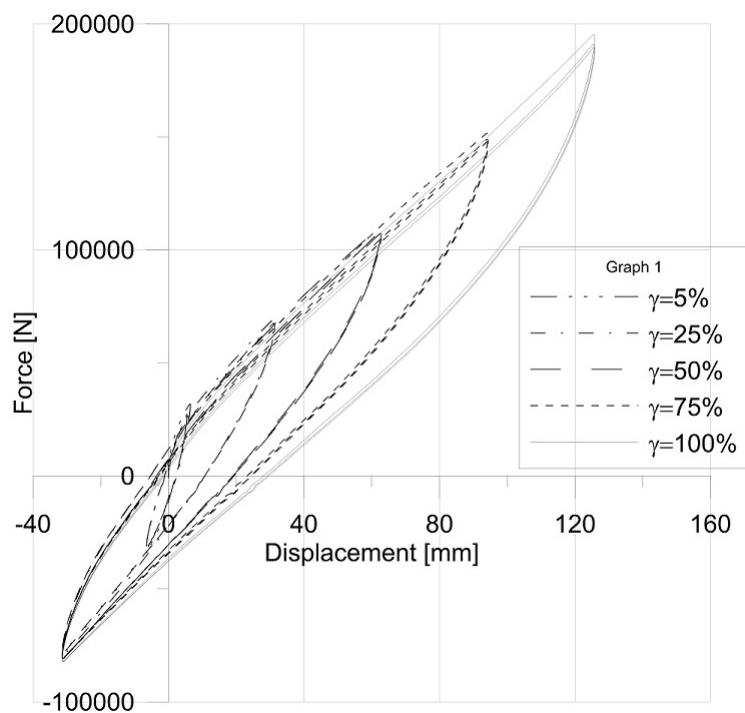


Figure 5.19: Risultati per una compressione verticale di 6MPa

Al termine dei test si è passati alla fase di prelievo delle carote di gomma da utilizzare nei test di nanoindentazione. L'operazione è risultata piuttosto complicata a causa dell'attrito sviluppato tra il carotatore e la gomma, che era di entità tale da far scorrere il mandrino del trapano sul manicotto del carotatore. Il problema è stato leggermente arginato utilizzando un diverso tipo di trapano con mandrino a serraggio a chiave e lubrificando abbondantemente con grasso la parte esterna del carotatore. Ciò nonostante l'operazione è stata di una difficoltà tale da impedire il prelievo di un elevato numero di provini e di effettuare una precisa misura della profondità di prelievo.

Tra le varie carote estratte ne sono state selezionate tre ottenute rispettivamente a profondità di circa 5 cm, 10 cm e 15 cm dal bordo esterno (Fig. 5.20).

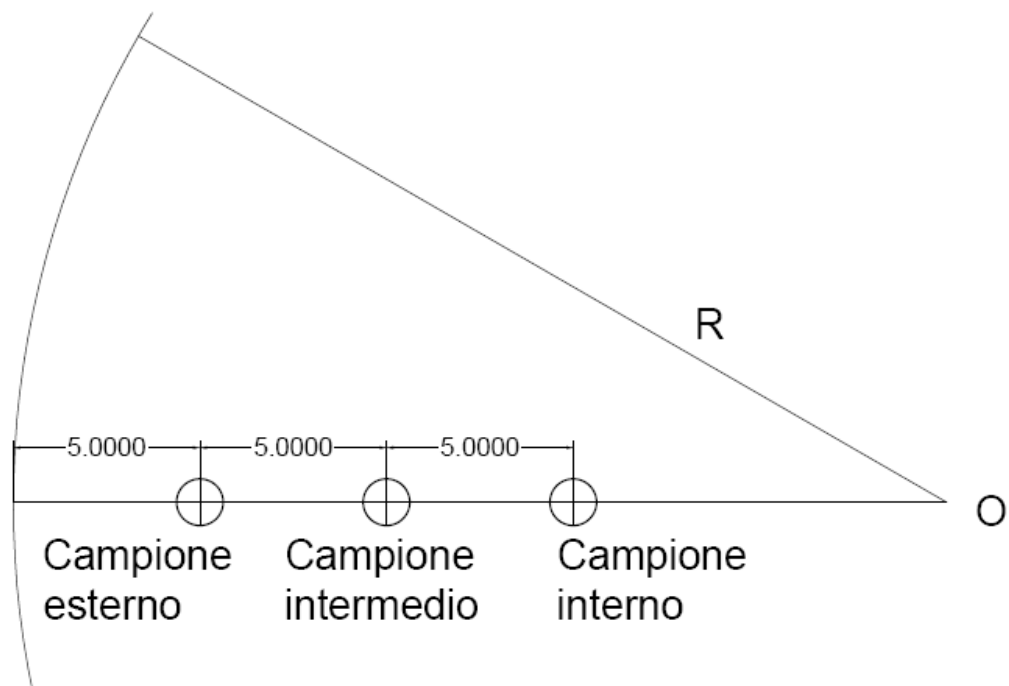


Figure 5.20: Schema di campionamento

5.3 Test di nanoindentazione

I campioni carotati dai dispositivi sono stati portati al L.I.M.E. Laboratorio Interdipartimentale di Microscopia Elettronica Dell'Università degli studi di Roma3 <http://www.lime.uniroma3.it/>.

Qui i campioni sono stati tagliati ma, a causa dell'esaurimento dell'indurente per la resina epossidica, non è stato possibile inglobarli a freddo. Si è quindi deciso di incollarli direttamente sullo stab del nanoindenter con l'ausilio di due rondelle in acciaio, che avevano la funzione di sostegni verticali durante la presa della colla. Successivamente sono stati lucidati con la procedura precedentemente descritta, ma il grado di rugosità è stato misurato tramite un profilometro ottico ad interferometria.

Tale strumento consiste in un microscopio ottico con una profondità di campo molto bassa collegato ad un computer che registra i dati. Una volta messa a fuoco l'immagine si imposta un valore zero di riferimento per la posizione verticale, dopodichè si imposta un valore di variazione della coordinata verticale leggermente superiore alla rugosità presunta (tale valore è facilmente deducibile facendo variare il fuoco manualmente). A questo punto il macchinario spazia tra i valori di posizione verticale specificati acquisendo varie immagini ad un intervallo specificato, la coordinata z viene quindi associata alla posizione in cui il punto è caratterizzato dalla massima luminosità. In Fig. 5.21, Fig. 5.22 e Fig. 5.23 è possibile vedere i profili ottenuti con l'interferometro, mentre in Tab. 5.4, Tab. 5.5 e Tab. 5.6 sono presenti i dati delle profilometrie.

I campioni sono quindi stati inseriti all'interno del nanoindenter per effettuare i test. A differenza di quanto visto per i test preliminari, questa volta sono state eseguite delle prove CSM standard con un'affondamento limite di $30\mu m$, una frequenza di oscillazione pari a $1Hz$ e un'ampiezza

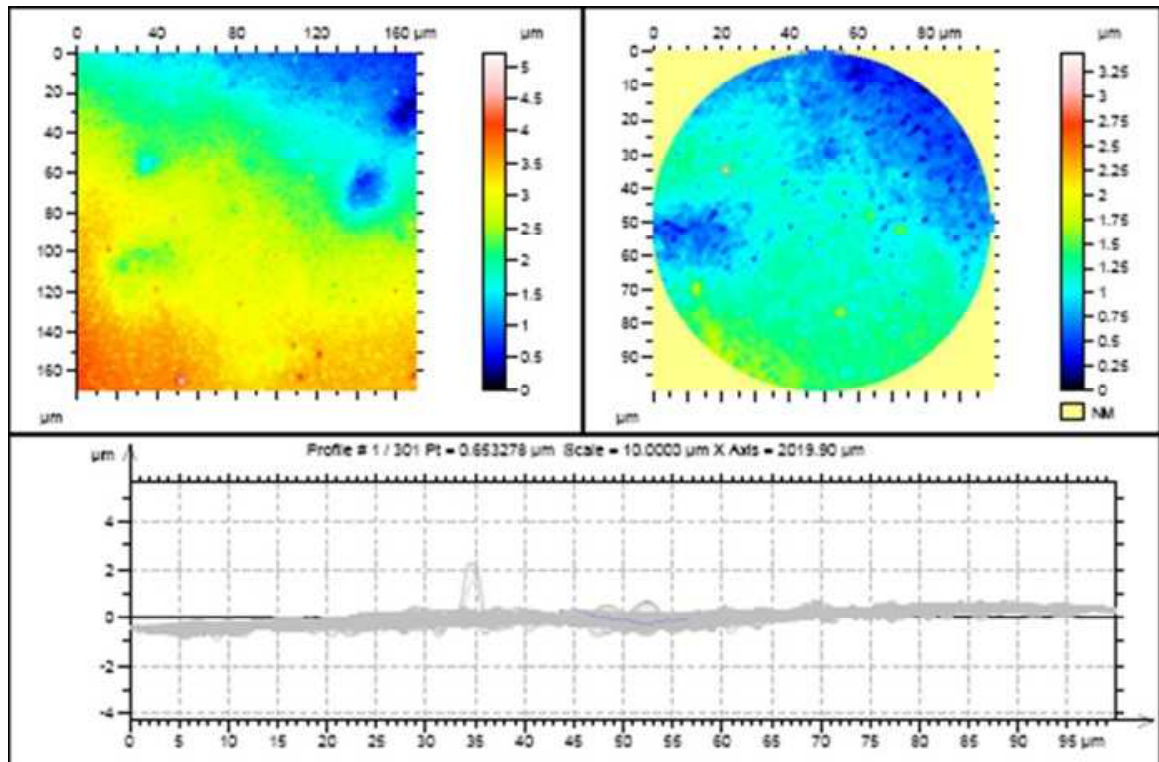


Figure 5.21: Profilometria campione esterno. Alto Sx: Profilometria generale. Alto Dx: dettaglio di un'area pari all'indentatore. Basso: Serie di profili.

di oscillazione di $5nm$. I parametri di prova sono riassunti in Tab. 5.7. La scelta di tale metodologia di prova risiede nella volontà di misurare le caratteristiche elastiche lungo tutto il percorso di carico, arrivando anche ad elevate deformazioni. La frequenza di oscillazione è stata impostata come la più bassa possibile poichè, purtroppo, il software del macchinario non permetteva di utilizzare frequenze minori, tipiche di una struttura isolata. Tale limitazione è comunque facilmente aggirabile creando un pacchetto software dedicato.

Su ogni campione sono state effettuate 5 prove con posizionamento random. I risultati sono visibili in Fig. 5.24, Fig. 5.25 e Fig. 5.26.

Come evidente da tali risultati, alcune prove sono andate in blocco misurando una rapida crescita del carico a livelli di affondamento quasi

ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rp	μm	0.140223	0.0848171	0.0528428	0.719407
Rv	μm	0.184033	0.0553827	0.0704143	0.395181
Rz	μm	0.324256	0.114782	0.133310	1.01453
Rc	μm	0.195577	0.0724602	0.090449	0.806540
Rt	μm	0.469991	0.273220	0.163866	2.31115
Ra	μm	0.0561973	0.0145103	0.0354288	0.122597
Rq	μm	0.0692795	0.0238435	0.0109052	0.221426
Rak		-0.404371	0.618256	-1.79292	1.97246
Rku		4.25763	1.53692	1.99570	13.0287
Material Ratio parameters - Roughness profile					
Rmr	%	98.0504	13.6708	1.75439	100.000
Rdc	μm	0.108225	0.0260401	0.0663644	0.240114

Table 5.4: Parametri della profilometria del campione esterno

costanti. Ciò è stato implicato agli elevati affondamenti raggiunti, per i quali la compattazione della gomma era talmente elevata da impedire ulteriori affondamenti significativi. La pendenza, quasi verticale, di tali tratti rappresenterebbe quindi il modulo di Bulk del materiale che, per un valore di ν tenderebbe ad infinito.

Altro fenomeno evidente in alcuni test è lo scarico della punta che, invece di avvenire gradualmente in tutto il ramo, è caratterizzato da una pendenza sostanzialmente verticale per il primo tratto. Questo comportamento anomalo è stato attribuito a fenomeni attritivi che si suppone insorgere tra le pareti dell'indentatore e il materiale che risale lungo gli stessi. Questa rimane tuttavia solamente un'ipotesi che necessita di studi più approfonditi per essere avvalorata.

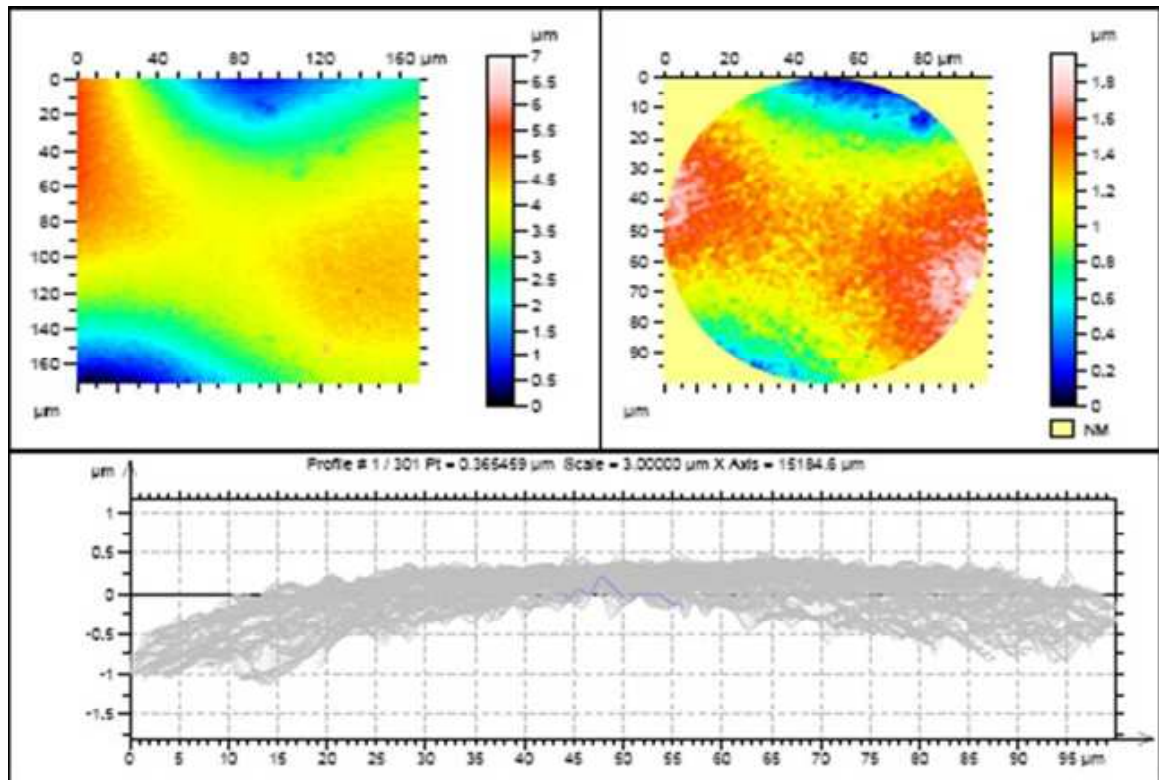


Figure 5.22: Profilometria campione intermedio. Alto Sx: Profilometria generale. Alto Dx: dettaglio di un'area pari all'indentatore. Basso: Serie di profili.

ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rp	μm	0.105255	0.0219433	0.0402057	0.190311
Rv	μm	0.135491	0.034059	0.0510718	0.287125
Rz	μm	0.241747	0.0471309	0.107627	0.445624
Rc	μm	0.147158	0.0352828	0.0524923	0.436301
Rt	μm	0.316944	0.0579499	0.168531	0.543928
Ra	μm	0.0455815	0.00975178	0.0286595	0.122303
Rq	μm	0.0541744	0.010085	0.0186426	0.0790964
Rek		-0.305997	0.393764	-1.36175	1.08543
Rku		3.35835	0.892913	2.18007	7.68550
Material Ratio parameters - Roughness profile					
Rmr	%	100.000	0.00000	100.000	100.000
Rdc	μm	0.092416	0.0223537	0.0567931	0.276790

Table 5.5: Parametri della profilometria del campione intermedio

5.3 Test di nanoindentazione

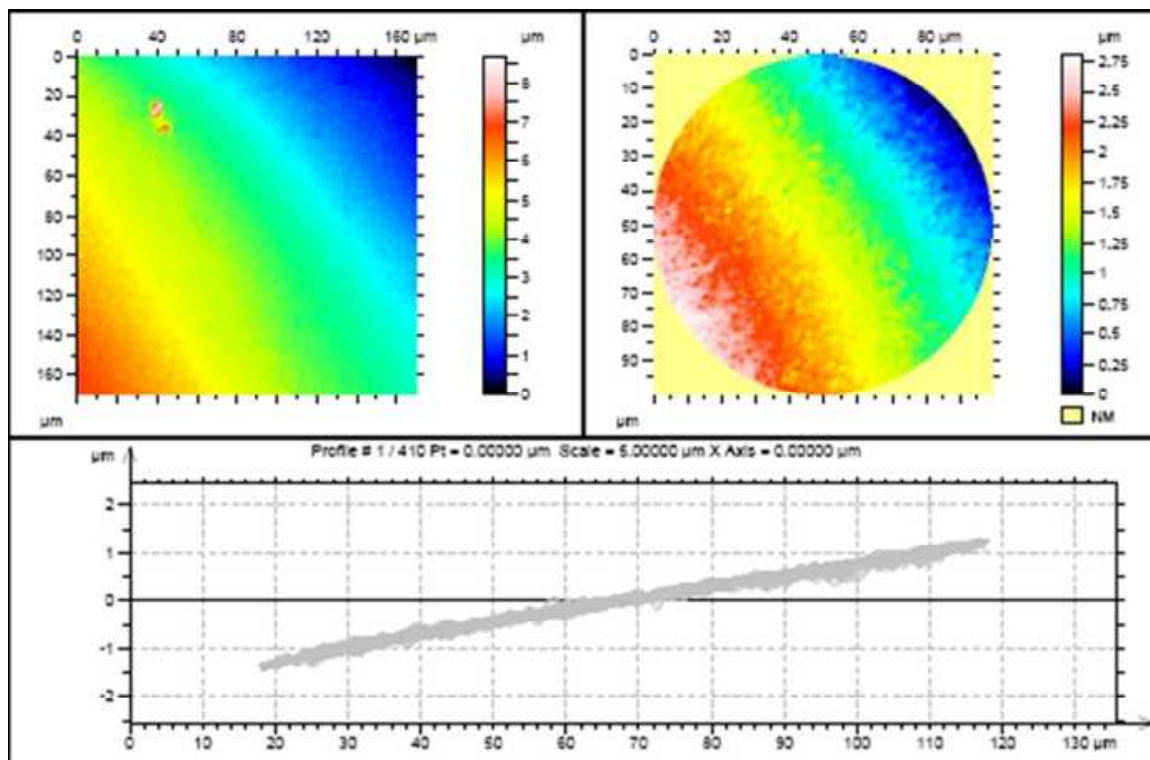


Figure 5.23: Profilometria campione interno. Alto Sx: Profilometria generale. Alto Dx: dettaglio di un'area pari all'indentatore. Basso: Serie di profili.

ISO 4287					
		Mean	Std dev	Min	Max
Amplitude parameters - Roughness profile					
Rp	µm	0.0802525	0.0184207	-0.000788241	0.150936
Rv	µm	0.100024	0.024334	0.00506712	0.183169
Rz	µm	0.180276	0.0338272	0.010158	0.305816
Rc	µm	0.121596	0.0194609	0.0702374	0.180633
Rt	µm	0.275147	0.0706453	0.010158	0.534496
Ra	µm	0.0363141	0.00467903	0.005079	0.0613271
Rq	µm	0.0342741	0.0225162	0.00000	0.0650283
Rek		-1.#IND	1.#QNAN	-1.26873	0.912298
Rku		-1.#IND	1.#QNAN	1.92577	6.58652
Material Ratio parameters - Roughness profile					
Rmr	%	73.9024	43.9167	0.00000	100.000
Rdc	µm	0.0548661	0.034045	0.00000	0.145683

Table 5.6: Parametri della profilometria del campione intermedio

Surface Approach Velocity [nm/s]	Depth limit [nm]
10	30000
Frequency Target [Hz]	Surface Approach Distance [nm]
1	1000
Strain Rate Target [1/s]	Harmonic Displacement Target [nm]
0.05	5
Surface Stiffness [N/m]	Poisson Ratio
160	0.5

Table 5.7: Parametri di prova

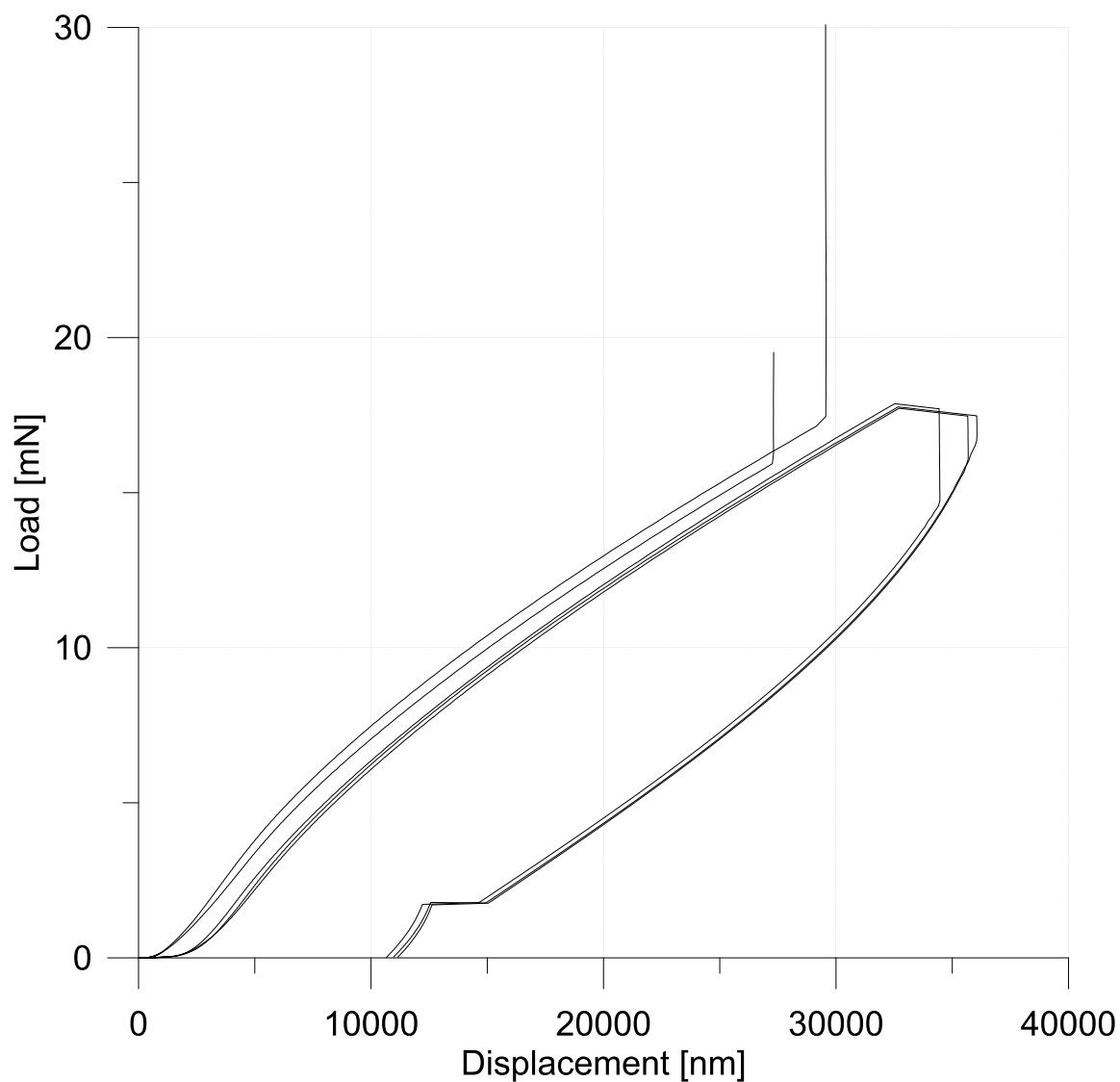


Figure 5.24: Risultati campione esterno

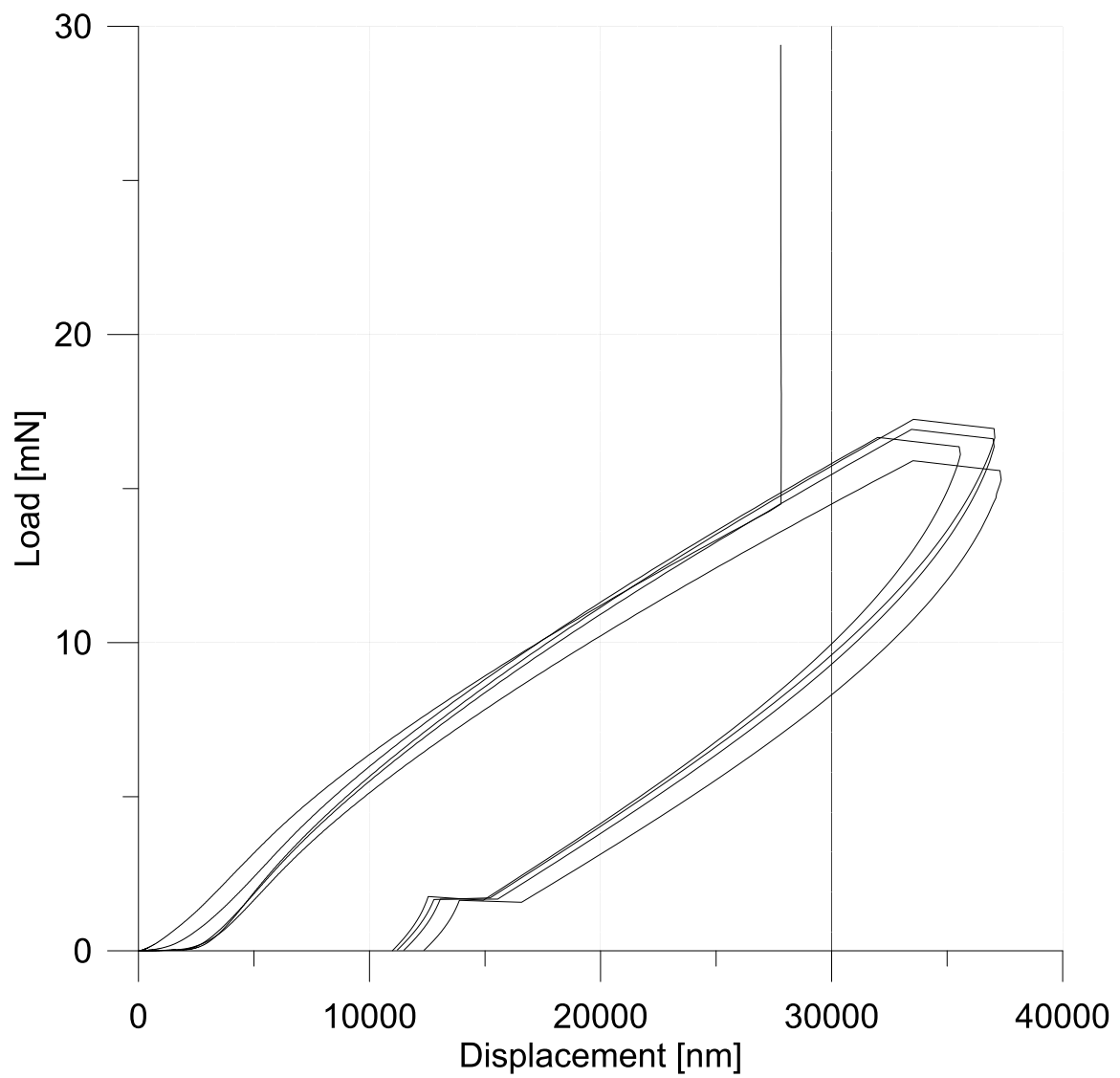


Figure 5.25: Risultati campione intermedio

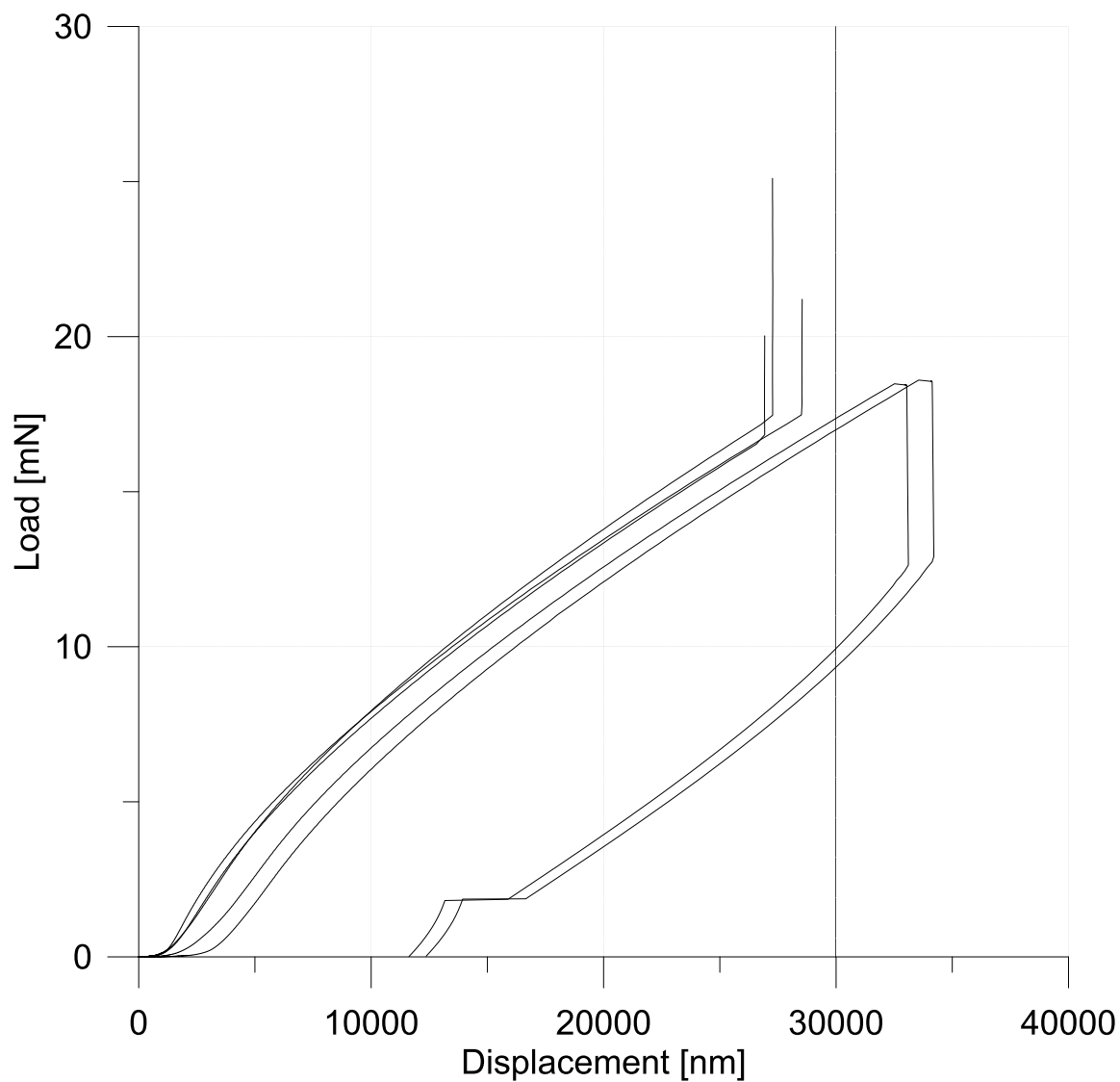


Figure 5.26: Risultati campione interno

6 Confronti

6.1 Correzione delle condizioni al contorno

Per poter confrontare le due tipologie di test occorre valutare attentamente le condizioni al contorno, specialmente nei test di nanoindentazione. Come precedentemente detto, tali test si basano su considerazioni di meccanica del contatto in cui il campione viene assimilato ad un semispazio elastico. In un articolo del 2006 tuttavia, Gent & Yeoh [14] mostrano come, nel caso della gomma, tale ipotesi non sia veritiera. Più nello specifico, sono stati realizzati alcuni modelli agli elementi finiti simulando un'indentazione su di un blocco di gomma cilindrico considerato incompressibile ($\nu = 0.5$) con due diverse condizioni al contorno. Nella prima il blocco era libero di espandersi lateralmente mentre nella seconda erano presenti dei vincoli rigidi che impedivano tale espansione in direzione radiale, ma la consentivano in direzione verticale. In entrambi i casi gli scorrimenti tra indentatore e campione sono stati considerati nulli ed il materiale elastico lineare. Tali simulazioni sono state condotte per diversi rapporti geometrici, facendo cambiare il raggio dell'indentatore (a), il raggio del campione (R) e lo spessore dello strato di gomma (T). I risultati sono stati poi confrontati in termini di rigidità con i valori teorici. In particolare, è possibile definire una

rigidezza adimensionalizzata K come:

$$K = \frac{F}{Gad} \quad (6.1)$$

Dove F è la forza necessaria a far penetrare l'indentatore fino ad una profondità d . A livello teorico tale rigidezza assume un valore pari a 8 poichè:

$$F = 2\tilde{E}da = \frac{2Eda}{(1 - \nu^2)} \quad (6.2)$$

$$F = 2\frac{2G(1 + \nu)da}{(1 - \nu^2)} \quad (6.3)$$

$$K_0 = \frac{F}{Gad} = 4\frac{1 + \nu}{1 - \nu^2} = 8 \quad (6.4)$$

Da tale studio è emerso che tale valore di rigidezza era quasi sempre più elevato di quello teorico e, in particolare, cresceva all'aumentare dei rapporti a/R e a/T .

Per valutare quindi l'effettiva influenza delle condizioni al contorno dei test effettuati, sono stati realizzati alcuni modelli agli elementi finiti utilizzando il software commerciale ABAQUS. Tutti i modelli sono stati realizzati utilizzando elementi finiti assialsimmetrici quadrilateri, sia per l'indentatore in acciaio che per il campione di gomma. Quest'ultimo è stato modellato utilizzando una formulazione ibrida ed un mo-

dulo di poisson molto prossimo a 0.5. La mesh è stata generata con un metodo free infittendola maggiormente nelle zone di concentrazione delle tensioni, ovvero nelle zone di contatto tra indentatore e campione (Figura 6.1).

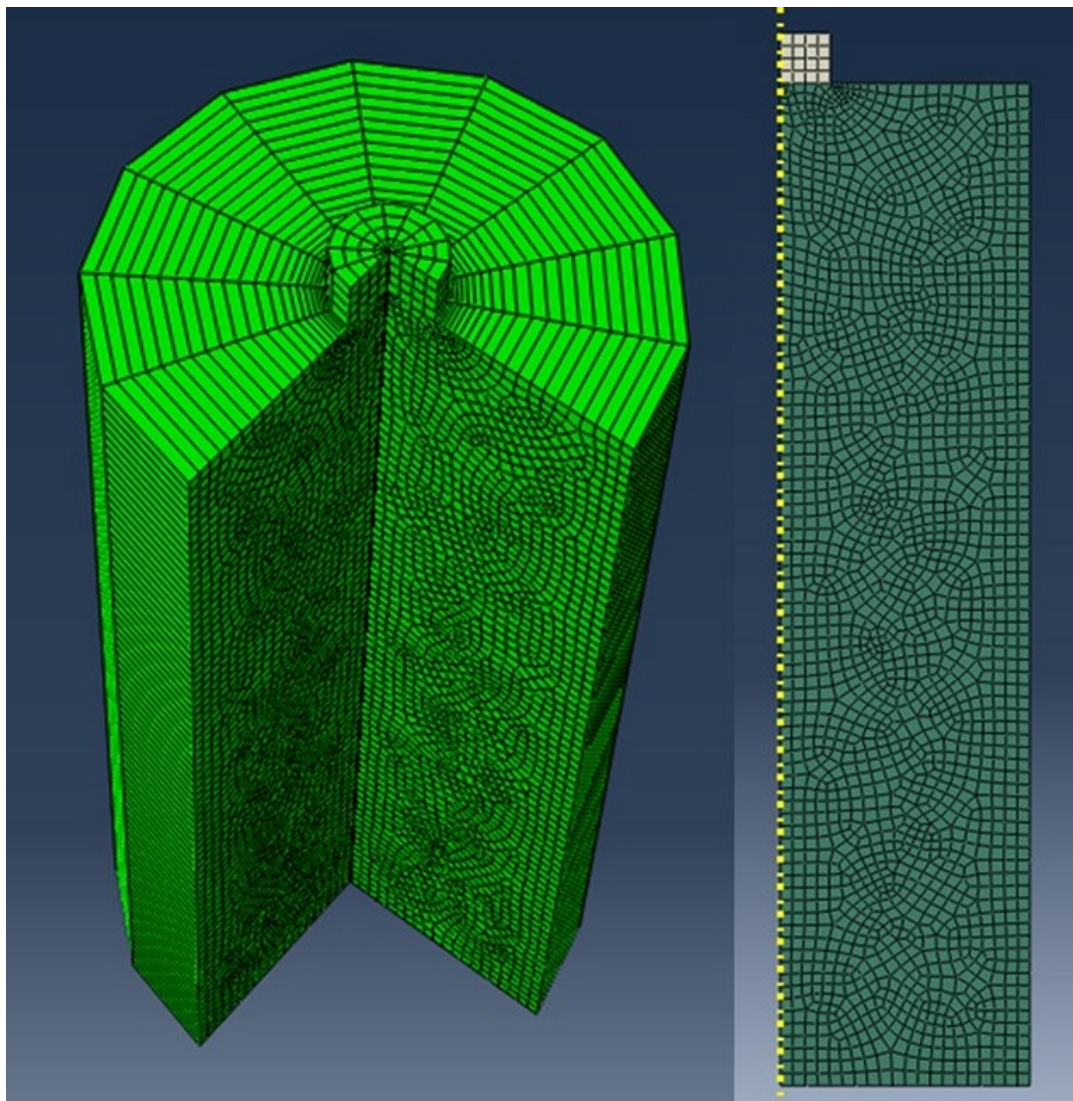


Figura 6.1: Modellazione in ABAQUS

Il primo modello ha avuto la funzione di benchmark per verificare la correttezza della modellazione. E' stato quindi riprodotto l'elemento descritto nell'articolo di Gent [14] e sono stati confrontati i profili deformativi. Dopo un'accurata calibrazione, i risultati ottenuti, visibili

in Figura 6.2, sono stati considerati soddisfacenti e si è proceduto alla realizzazione di un modello coerente con i test di nanoindentazione.

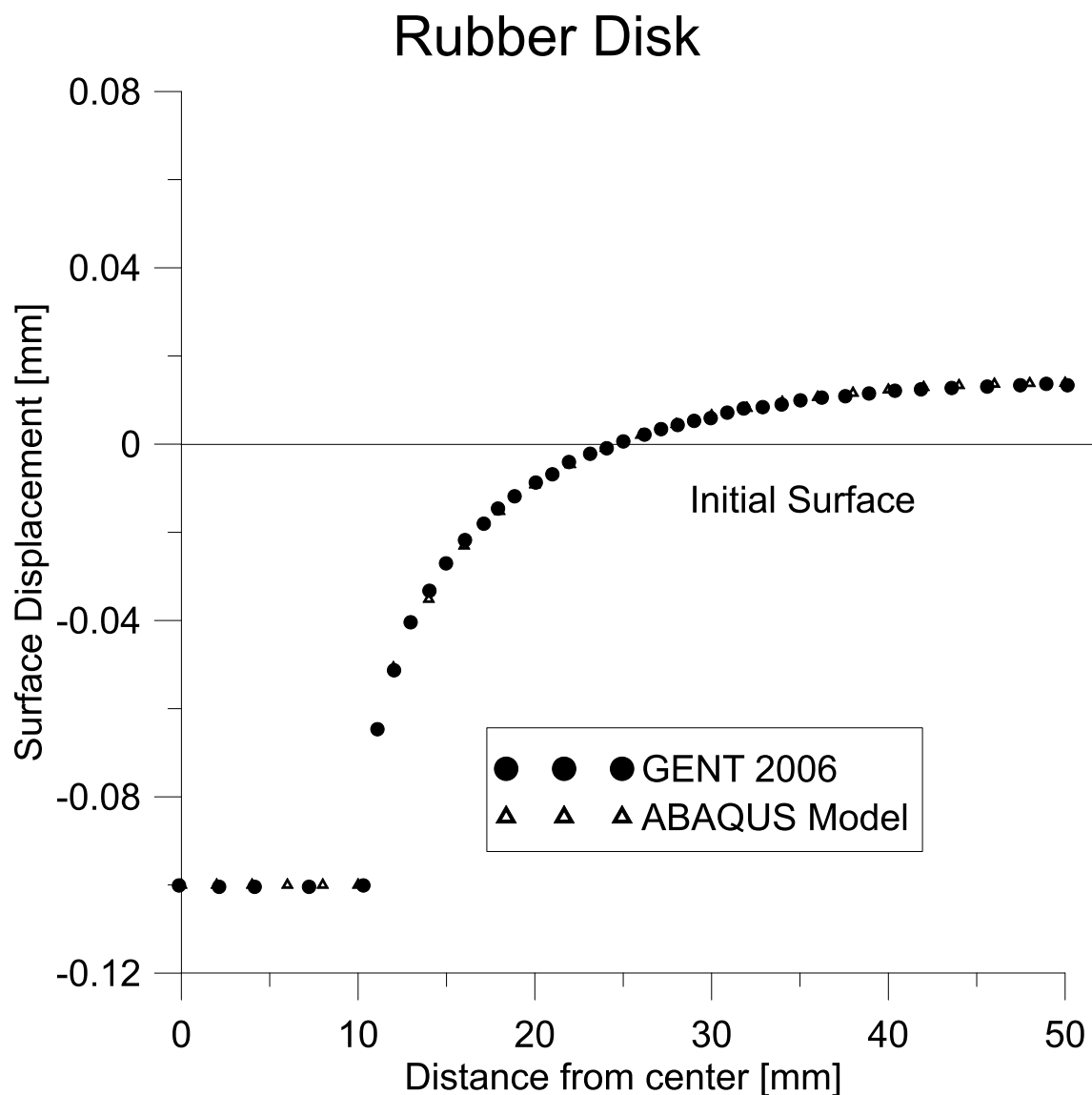


Figura 6.2: Confronto del modello benchmark con i dati di letteratura

Tale modello, le cui dimensioni sono schematicamente riportate in Figura 6.3, è stato realizzato in maniera coerente con quanto precedentemente descritto. Sono state condotte due diverse analisi: la prima considerando il modello completamente lineare e la seconda introducendo la non linearità dovuta alle grandi deformazioni. Le differenze non sono però

risultate sostanziali in quanto entrambe hanno confermato un valore del rapporto K/K_0 pari a 1.08.

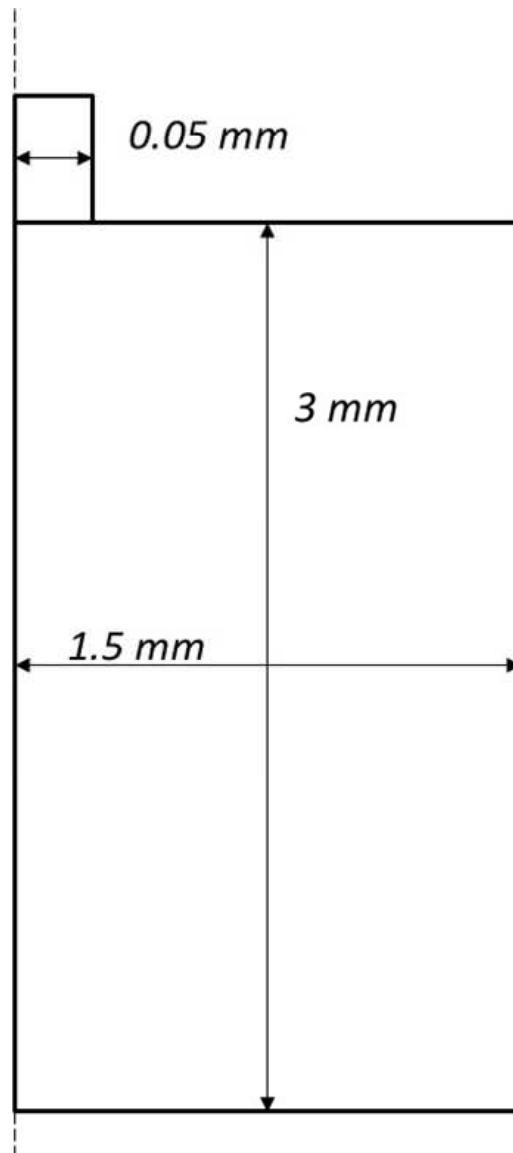


Figura 6.3: Dimensioni del modello per la simulazione dei test di nanoindentazione

6.2 Confronto dei test macroscopici con la nanoindentazione

Tramite i risultati appena discussi e le leggi di correlazione viste nel

Capitolo 4 è stato quindi possibile confrontare le curve ottenute con i test tradizionali e quelle ottenute tramite nanoindentazione. I confronti sono stati effettuati in termini di legame costitutivo $\tau - \gamma$. I passi per trasformare le curve sono stati i seguenti:

1. I risultati dei test tradizionali, descritti con delle curve Forza-Spostamento, sono stati elaborati per ottenere la curva $\tau - \nu$. In particolare, la tensione tangenziale è stata ottenuta dividendo la forza per l'area di taglio dell'isolatore, mentre, la deformazione è stata ottenuta dividendo lo spostamento per lo spessore complessivo degli strati di gomma.
2. Le curve Carico-Affondamento dei test di nanoindentazione sono state corrette dividendo il valore della forza per il rapporto K/K_0 ottenuto dalla modellazione agli elementi finiti.
3. Le curve corrette sono state quindi trasformate nel legame costitutivo $\sigma - \varepsilon$ tramite le relazioni viste nel capitolo 4.1
4. E' stato calcolato il coefficiente correttivo α che tiene conto della sovrarigidità dovuta al comportamento viscoelastico del materiale
5. Le tensioni σ precedentemente calcolate sono state ridotte dividendole per il coefficiente α
6. Le curve $\sigma - \varepsilon$, al termine di tutte le correzioni, sono state trasformate in curve $\tau - \gamma$ tramite le relazioni viste nel capitolo 4.2

In Figura 6.4, Figura 6.5 e Figura 6.6 è possibile vedere i risultati della sovrapposizione delle curve, le quali sono state però depurate del tratto di scarico in quanto poco interessante ai fini di questo studio. E' possibile notare una notevole differenza nei tratti iniziali delle curve. Ciò è dovuto alla non completa penetrazione dell'indentatore nella superficie. Tale fenomeno, di natura ineliminabile per le considerazioni viste nel capitolo

3, scompare per deformazioni pari a circa il 20%. I risultati ottenuti per il campione esterno e quello interno risultano in ottimo accordo con i test di tipo standard effettuati sugli isolatori. La maggiore tensione che si nota su alcune delle prove di nanoindentazione, specialmente nel campione interno, è attribuibile ad una maggiore vicinanza del punto di prova ai bordi del campione. Il campione intermedio presenta invece dei valori di tensione più bassi rispetto alla curva di riferimento. Ciò è probabilmente indice di un danneggiamento del campione avvenuto, con molta probabilità, durante le operazioni di prelievo.

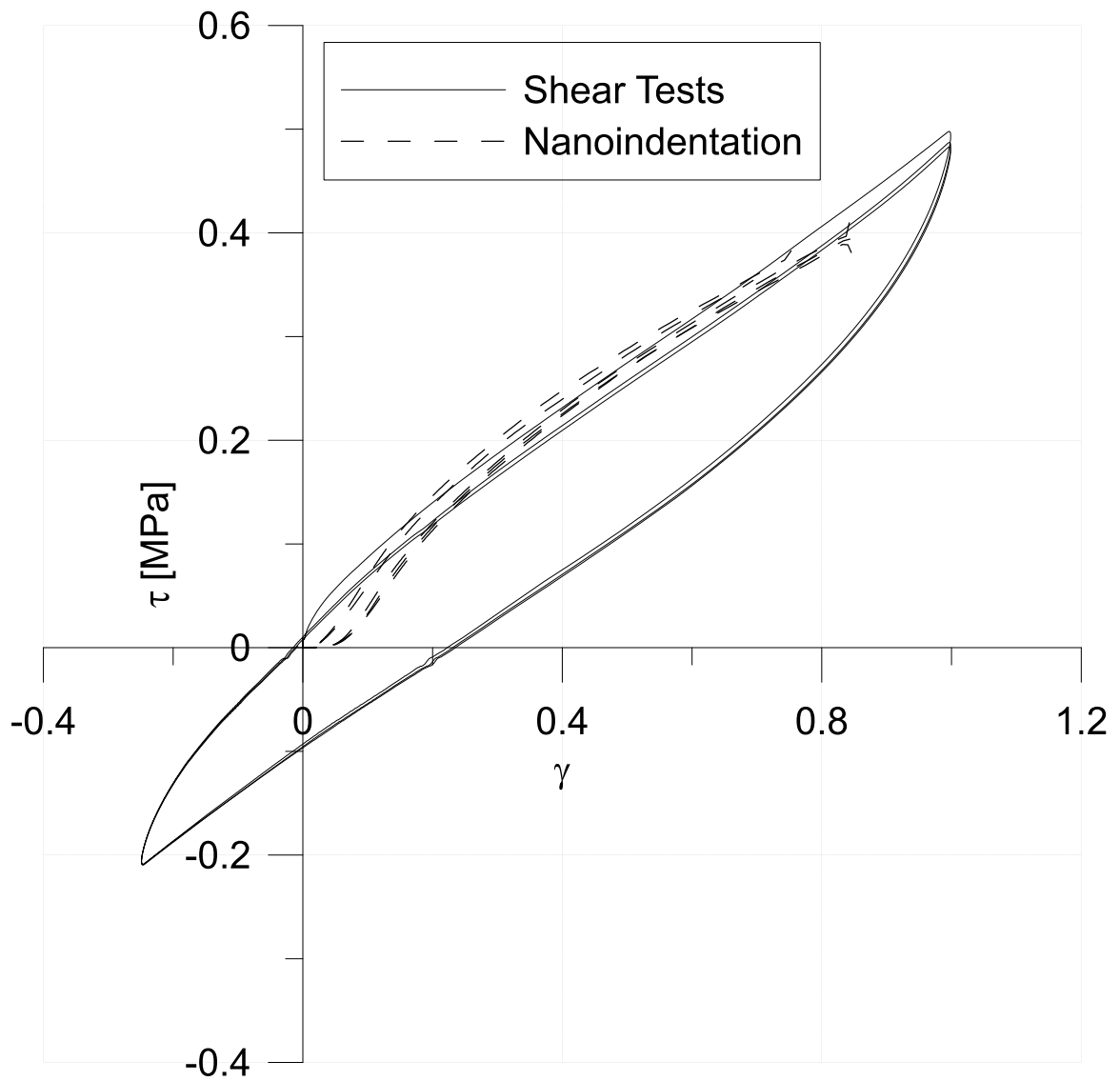


Figura 6.4: Confronti campione esterno

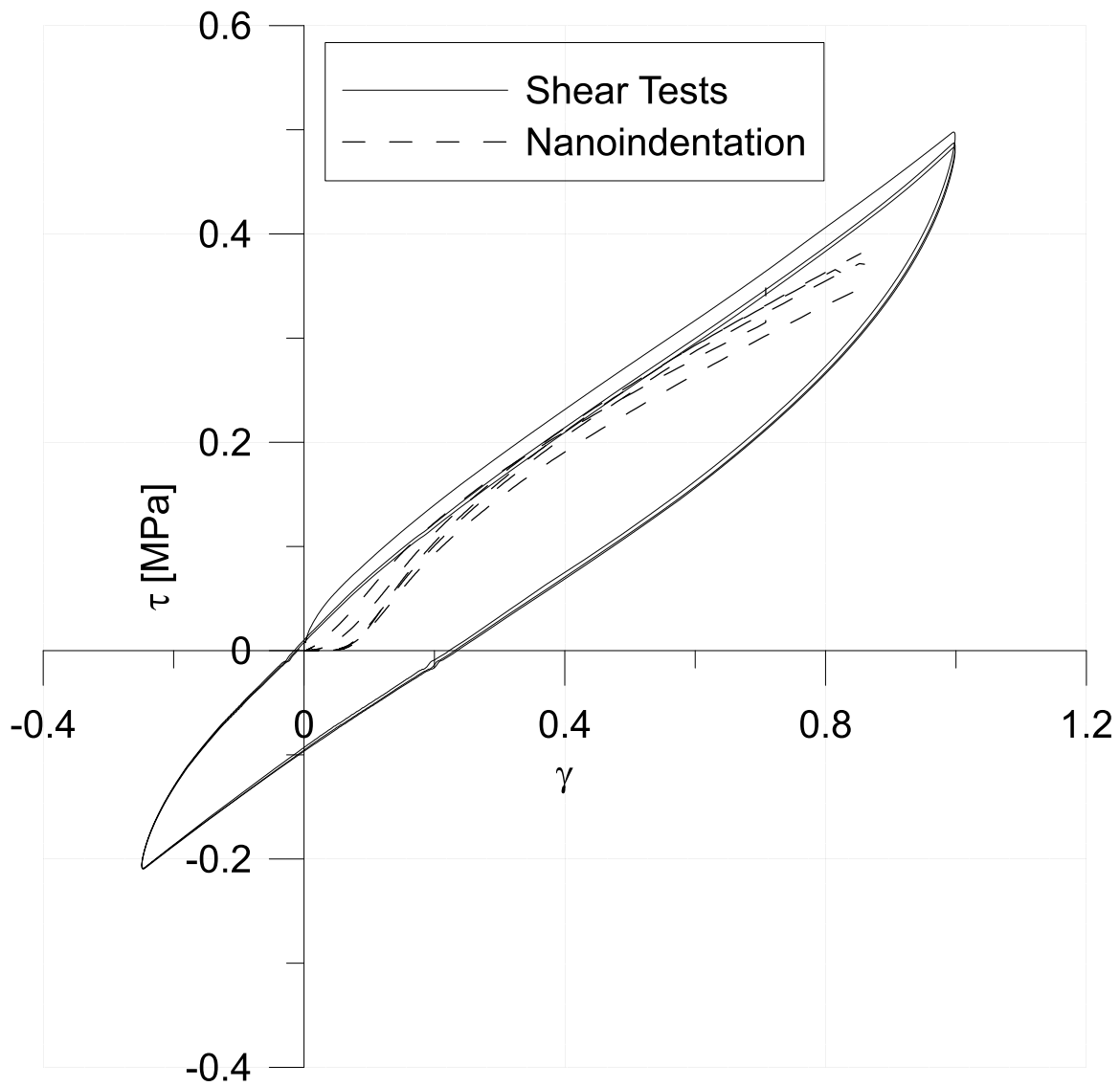


Figura 6.5: Confronti campione intermedio

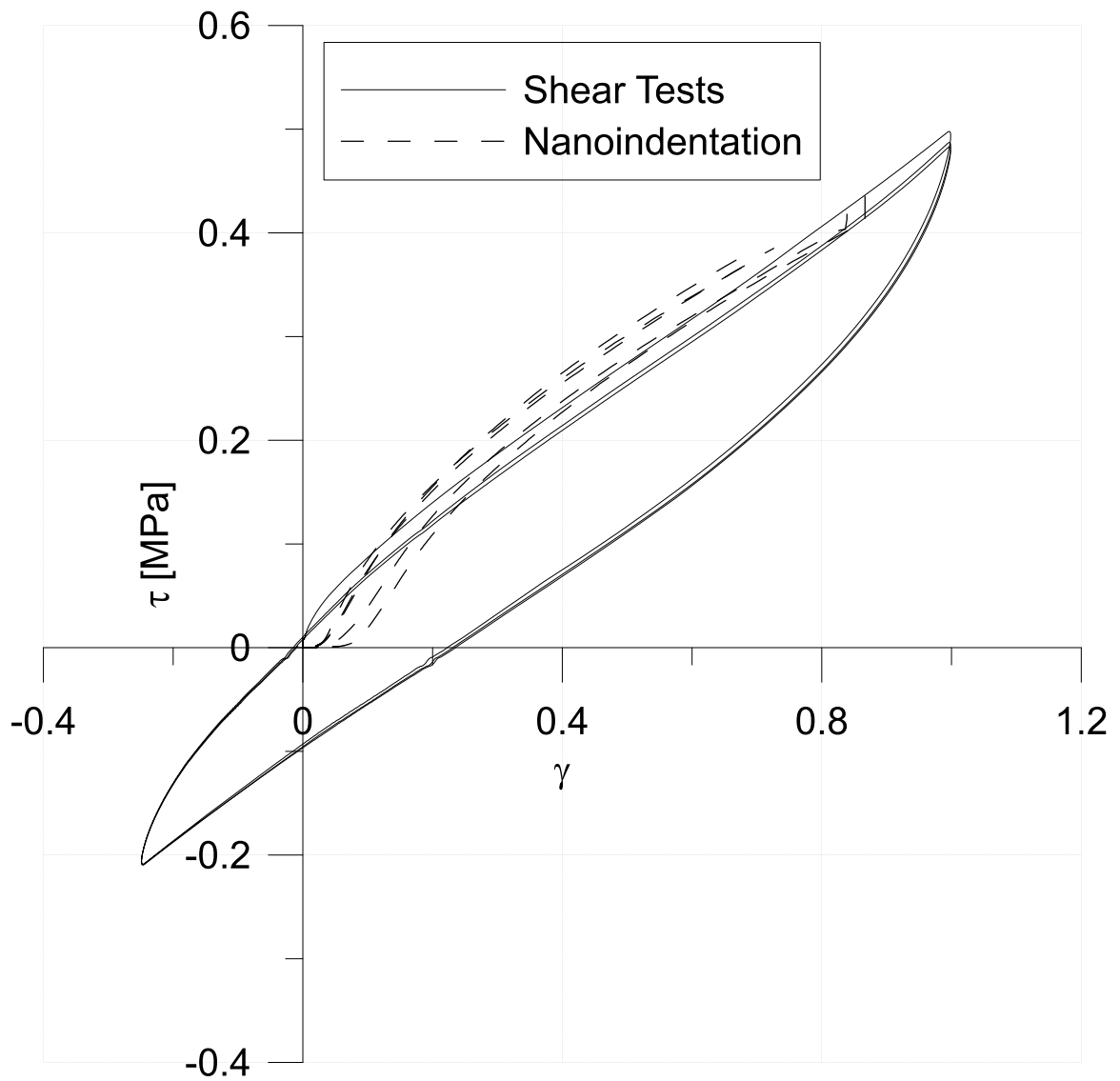


Figura 6.6: Confronti campione interno

7 Conclusioni e Sviluppi futuri

I risultati fin'ora visti risultano molto incoraggianti e mostrano come la nanoindentazione sia un tipo di tecnica in grado di integrare gli attuali metodi di ispezione e diagnosi degli isolatori elastomerici. La possibilità di ottenere il legame costitutivo dell'elastomero, a partire da un campione di dimensioni estremamente ridotte, potrebbe permettere allo stesso tempo di: ridurre i costi legati alle attività di monitoraggio, fornire uno strumento di diagnosi quantitativa e puntuale dei dispositivi e valutare l'entità del degrado all'interno di uno stesso isolatore.

A seguito dei test sperimentali sono emerse problematiche di diverso genere, prima fra tutti quella legata al prelievo dei campioni, che è risultato decisamente più problematico del previsto.

La procedura preparativa dei campioni da studiare tramite nanoindentazione risulta di notevole importanza qual'ora ci fosse un interesse a valutare il legame costitutivo del materiale a bassi livelli deformativi. Una possibile soluzione potrebbe essere quella di utilizzare un Flat Punch con un diametro maggiore, che permetterebbe di raggiungere la completa penetrazione a livelli deformativi inferiori. Ciò comporterebbe però la necessità di ridurre il numero di impronte realizzabili in un singolo campione. Una più estesa campagna sperimentale potrebbe arginare questo problema, permettendo di calibrare meglio, e quindi rendere più affidabili, le leggi di correlazione.

Tale campagna permetterebbe altresì di comprendere meglio i fenomeni anomali riscontrati durante i test di nanoindentazione, come ad esempio il blocco delle prove, consentendo, di conseguenza, di individuare i limiti di applicabilità di tale tecnica.

Lo studio fin qui svolto risulta, evidentemente, lontano dall'essere concluso. Tra le tematiche che si intende approfondire nel prossimo futuro si possono elencare:

- Lo sviluppo di un microcarotatore in grado di semplificare le operazioni di prelievo e ridurre il disturbo del campione. In particolare andrà studiato un sistema per ridurre al minimo gli attriti presenti, in fase di prelievo, fra la punta carotatrice ed il dispositivo. Tale carotore dovrà anche essere studiato per garantire un'estrazione semplice del campione conservato all'interno dello stesso.
- Lo studio del numero minimo di provini da dover estrarre da un isolatore per avere una descrizione del suo stato sufficientemente accurata. Per far ciò si necessita di uno studio incrociato sia sul dispositivo che sui campioni prelevati, andando quindi ad individuare dei punti di prelievo notevoli.
- La valutazione del disturbo arrecato al dispositivo, il quale subirà, seppur in minima parte, un danneggiamento. Occorrerà anche studiare un materiale adatto a riempire i fori lasciati dalle operazioni di prelievo. Tale materiale dovrà necessariamente avere caratteristiche compatibili con l'elastomero ed essere in grado di proteggere le piastre in acciaio dai fenomeni corrosivi che potrebbero aver luogo nell'intorno dei punti di prelievo.
- Lo sviluppo di leggi di correlazione che permettano di confrontare i parametri dissipativi del materiale.

Altre tematiche interessanti da approfondire, le quali però sono subordinate a quelle appena elencate sono:

- Sviluppo di una metodologia di caratterizzazione nanomeccanica che permetta di utilizzare una geometria più semplice di indentatore, quale quello sferico o piramidale, eliminando così i problemi legati al mancato parallelismo tra punta e campione, o, in alternativa
- Studio di processi di preparazione e lucidatura del campione automatizzati ed in grado di ridurre al minimo il mancato parallelismo tra le due facce dello stesso. Ciò, unitamente alla progettazione di un vassoio portacampioni basculante, permetterebbe di ridurre al minimo i problemi legati alla completa penetrazione di un indentatore di tipo Flat Punch nel materiale, permettendo di ottenere informazioni anche per bassi livelli di affondamento.
- Sviluppo di un macchinario in grado di eseguire test di nanoindentazione direttamente in situ, eliminando così l'onere del prelievo ed i relativi effetti collaterali come il disturbo del dispositivo.

	Misure Macromeccaniche	Test di Nanoindentazione
Curve stress-strain	SI	SI
Modulo Elastico	SI	SI
Parametri viscosi	SI	SI
Variazione delle caratteristiche nel dispositivo	NO	SI
Misura delle caratteristiche senza la rimozione del dispositivo	NO	SI
Test in situ	NO	SI

Tabella 7.1: Tabella riassuntiva delle potenzialità delle tecniche di nanoindentazione applicate alla diagnosi degli isolatori elastomerici

Bibliografia

- [1] Morteza Aria and Reza Akbari. Inspection, condition evaluation and replacement of elastomeric bearings in road bridges. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(9):918–934, sep 2013.
- [2] Anniek De Bever. Dynamic behaviour of rubber and rubberlike materials. Technical report, 1992.
- [3] A R Bixio, F Braga, M Dolce, D Nigro, F Ponzio, and M. Nicoletti. Prove dinamiche di rilascio di un edificio isolato alla base dell ' Università di Potenza.
- [4] a. R. Bixio, M. Dolce, D. Nigro, F. C. Ponzio, F. Braga, and M. Nicoletti. Repeatable Dynamic Release Tests on a Base-Isolated Building. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(3):369–393, 2001.
- [5] Franco Braga and Michelangelo Laterza. Field testing of low-rise base isolated building. *Engineering Structures*, 26(11):1599–1610, 2004.
- [6] Franco Braga, Michelangelo Laterza, Rosario Gigliotti, and D. Nigro. Prove Di Rilascio Di Un Edificio Per Civile Abitazione Costruito nel Comune di Rapolla : SISTEMA DI ISOLAMENTO ISOLATORI ELASTOMERICI. In *10^o Convegno Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, 2001.
- [7] CALTRANS - California Department of Transportation - Division of Maintenance - Structure Maintenance and Investigation. Element Level Inspection Manual, 2008.
- [8] CEN (European Committee for Standardization). prEN 15129 Anti-seismic devices, 2006.
- [9] Qingbin Chen, Bruce M. Douglas, Emmanuel a. Maragakis, and Ian G. Buckle. Extraction of hysteretic properties of seismically isolated bridges from quick-release field tests. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 31(2):333–351, feb 2002.

-
- [10] Anil K. Chopra. *DYNAMICS OF STRUCTURES Theory and Applications to Earthquake Engineering*. 1995.
- [11] Giovanni Cuomo. *L'EFFETTO DI CARICHI VERTICALI ELEVATI SUL PROGETTO DEI DISPOSITIVI DI ISOLAMENTO SISMICO*. PhD thesis.
- [12] Federico De Paoli and Alex A. Volinsky. Obtaining full contact for measuring polydimethylsiloxane mechanical properties with flat punch nanoindentation. *MethodsX*, 2(February):374–378, 2015.
- [13] Bruce M Douglas, Emmanuel A Maragakis, and Bhabananda Nath. Static Deformations of Bridges From Quick-Release Dynamic Experiments. *Journal of Structural Engineering*, 116(8):2201–2213, 1991.
- [14] A. N. Gent and O. H. Yeoh. Small Indentations of Rubber Blocks: Effect of Size and Shape of Block and of Lateral Compression. *Rubber Chemistry and Technology*, 4(79):674–693, 2006.
- [15] P B Gent A. N. Lindley. The compression of bonded rubber blocks. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1959.
- [16] J L Hay and G.M. Pharr. Instrumented Indentation Testing, 2000.
- [17] K. L. Johnson. *CONTACT MECHANICS*. 2003.
- [18] W.C. Joslin, D.L. Oliver. A new method for analyzing data from continuous depth-sensing microindentation tests. *Journal of Materials Research*, 5(1):123–126, 1990.
- [19] James M Kelly, Frederick F Tajirian, and Ian D Aiken. MECHANICS OF LOW SHAPE FACTOR ELASTOMERIC SEISMIC ISOLATION BEARINGS. Technical Report November, 1989.
- [20] Sun Young Lee, Hyun-moo Koh, Dong-ho Ha, Seung-yong Ok, Hyo Sun Ryu, Hyeong-Taek Kang, and Young-Suk Kim. Field Testing of Seismically Isolated Bridge Design Based on Minimum LCC Concept. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*, number 2827, 2004.
- [21] Alessandro Martelli and Massimo Forni. Recenti applicazioni dei sistemi di controllo passivo delle vibrazioni sismiche - Parte 1: Giappone, Cina, Federazione Russa e Stati Uniti d'America. In *Atti su DVD ANIDIS 2009 - XIII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, 2009.

- [22] Alessandro Martelli and Massimo Forni. Recenti applicazioni dei sistemi di controllo passivo delle vibrazioni sismiche - Parte 2 : Italia. In *Atti su DVD ANIDIS 2009 - XIII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, 2009.
- [23] Alessandro Martelli and Massimo Forni. Recenti applicazioni dei sistemi di controllo passivo delle vibrazioni sismiche - Parte 3 : paesi minori. In *Atti su DVD ANIDIS 2009 - XIII Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, 2009.
- [24] Ministero delle Infrastrutture. DM 14 gennaio 2008, Norme Tecniche per le Costruzioni, 2008.
- [25] Ministero delle Infrastrutture. Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche delle costruzioni, 2009.
- [26] F. Naeim and James M Kelly. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. 1999.
- [27] W. C. Oliver and G. M. Pharr. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6):1564–1583, 1992.
- [28] W.C. Oliver and G.M. Pharr. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 19(01):3–20, mar 2004.
- [29] G.M. Pharr. PROBING THE MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS AT SMALL SCALES WITH NANOINDENTATION.
- [30] Valentin L. Popov. *Contact Mechanics and Friction Physical Principles and Applications*. 2010.
- [31] Bradley N. Robson and Issam E. Harik. Pullback Testing of Seismically Isolated P/C I-Girder Bridge. *Journal of Structural Engineering*, 124(8):930–937, 1998.
- [32] David Roylance. ENGINEERING VISCOELASTICITY, 2001.
- [33] Marco Sebastiani, Edoardo Bemporad, Fabio Carassiti, Teresa Mangialardi, and Antonio Evangelista Paolini. TECNICHE DI NANOINDENTAZIONE STATISTICA PER LA CARATTERIZZAZIONE NANO-MECCANICA DI MATERIALI CEMENTIZI. In *10^o Convegno Nazionale AIMAT*, 2010.
- [34] J. Wang and C.H. Chew. Feasibility of conditioning monitoring of bearings used in a viaduct. *Applied Acoustics*, 48(3):237–247, jul 1996.

- [35] Gordon P Warn and Keri L Ryan. A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs. *Buildings*, 2(4):300–325, 2012.
- [36] M. Whelan, M. Gangone, K. Janoyan, and R. Jha. Operational modal analysis of a multi-span skew bridge using real-time wireless sensor networks. *Journal of Vibration and Control*, 17(13):1952–1963, dec 2010.