



POLITECNICO DI TORINO

Ingegneria Civile
A.A. 2020/2021
Sessione di Laurea Luglio 2021

Modellazione non lineare di un sensore capacitivo

Relatore:

Prof. Gabriele Bertagnoli

Candidato:

Emiliano Ciccone s264872

Indice

1.	La misurazione delle pressioni all'interno dei solidi	1
1.1	Stato dell'arte	1
1.1.1	Martinetti piatti	2
1.1.2	Deformometri.....	2
1.1.3	Concrete stress-meters	3
1.2	Estensimetri.....	4
1.3	Nuove tecnologie.....	5
1.3.1	Sensori ceramici.....	6
1.3.2	Sensori capacitivi	6
1.3.3	Progetto InSiSt.....	8
2	Studio preliminare del sensore capacitivo	9
2.1	Geometria preliminare.....	9
2.2	Layout di carico.....	10
2.3	Geometria del modello FEM.....	11
2.3.1	Proprietà dei materiali	12
2.4	Caratteristiche della malta	14
2.4.1	Modellazione con malta elastica	14
2.4.2	Fessurazione.....	14
2.4.3	Caratteristiche della malta secondo CEB-FIP MODEL CODE 90.....	15
2.4.4	Viscoelasticità	16
2.4.5	Ritiro	17
2.4.6	Fessurazione.....	19
2.5	Analisi preliminari.....	21
2.6	Risultati	22
2.6.1	Malta elastica con $E = 20$ GPa	22
2.6.2	Malta con $E = 30$ GPa	29
2.6.3	Risultati con malta in grado di fessurare.....	41
2.6.4	Effetto della viscoelasticità della malta	45
2.6.5	Effetto del ritiro.....	51
3	Sensore capacitivo	70
3.1	Geometria del modello FEM.....	71
3.2	Analisi	72
3.2.1	Effetto dei fenomeni lenti: viscoelasticità e ritiro	72

3.2.2	Effetto di diversi spessori dello strato dielettrico	72
3.2.3	Effetto di diversi spessori dello strato di FR4.....	72
3.2.4	Effetto della presenza delle staffe per ancoraggio in trazione	73
3.2.5	Effetto della viscoelasticità dello strato dielettrico in kapton.....	75
3.2.6	Effetto della geometria del sensore.....	77
4	Risultati.....	80
4.1	Effetto dei fenomeni lenti: viscoelasticità e ritiro	80
4.1.1	Deformazioni nel kapton	80
4.1.2	Tensioni nel kapton.....	82
4.1.3	Tensioni nell'FR4	83
4.1.4	Tensioni nella malta a distanza di 0.5 cm dal sensore	85
4.1.5	Evoluzione fessurazione nel tempo	88
4.1.6	Analisi area senziante	90
4.2	Effetto di diversi spessori dello strato dielettrico.....	91
4.2.1	Deformazioni nel kapton	91
4.2.2	Tensioni nel Kapton.....	95
4.2.3	Tensioni nell'FR4	99
4.2.4	Tensioni nella malta.....	103
4.2.5	Analisi area senziante	107
4.3	Effetto di diversi spessori dello strato di FR4.....	108
4.3.1	Deformazioni nel kapton	108
4.3.2	Tensioni nel Kapton.....	112
4.3.3	Tensioni nell'FR4	116
4.3.4	Tensioni nella malta.....	122
4.3.5	Analisi area senziante	126
4.4	Effetto della presenza delle staffe per ancoraggio in trazione	127
4.4.1	Deformazioni nel kapton	127
4.4.2	Tensioni nel Kapton.....	131
4.4.3	Tensioni nell'FR4	135
4.4.4	Tensioni nella malta.....	139
4.4.5	Evoluzione fessurazione nel tempo	143
4.4.6	Analisi area senziante	146
4.5	Effetto della viscoelasticità dello strato dielettrico in kapton	147
4.5.1	Analisi area senziante	149
4.6	Effetto della geometria del sensore	150
4.6.1	Deformazioni nel kapton	150
4.6.2	Tensioni nel Kapton.....	155
4.6.3	Tensioni nell'FR4	160
4.6.4	Tensioni nella malta.....	166
4.6.5	Analisi area senziante	172

5	Modello con muratura.....	174
5.1	Geometria e analisi	174
5.2	Analisi effettuate	176
5.3	Risultati	177
5.3.1	Deformazioni nel kapton.....	177
5.3.2	Tensioni nel Kapton	180
5.3.3	Tensioni nell'FR4	183
5.3.4	Tensioni nella malta e mattoni	186
5.3.5	Analisi area senziante.....	189
5.3.6	Considerazioni sul modello in muratura	189
6	Conclusioni.....	190
7	Bibliografia e sitografia	192

1. La misurazione delle pressioni all'interno dei solidi

Sicurezza, funzionalità, durabilità, robustezza sono le caratteristiche che le costruzioni e le infrastrutture devono garantire nel tempo, nonostante vengano sottoposte progressivamente a condizioni ambientali aggressive e all'invecchiamento dei materiali. Per controllare l'efficienza e la sicurezza delle strutture il monitoraggio strutturale è un metodo efficace. Fino ad alcuni anni fa il monitoraggio strutturale (SHM) era limitato a impieghi particolari e di notevole rilevanza, per via del costo elevato della strumentazione e del suo relativo utilizzo sulle strutture per intervalli di tempo ben delimitati.

Oggi, al contrario, grazie alla maggiore diffusione ed economicità della sensoristica, si preferisce installare sistemi di monitoraggio diffuso, che rimangono sulla struttura per lunghi periodi di tempo.

1.1 Stato dell'arte

Uno dei problemi tecnici nell'ambito del monitoraggio strutturale è costituito dalla misura dello stato tensionale all'interno dei corpi solidi realizzati con materiali da costruzione. La misura delle tensioni è una questione non banale che avviene in genere tramite la valutazione delle deformazioni sulle superfici esterne o direttamente all'interno della struttura. Le tensioni vengono poi stimate a partire dalla conoscenza della legge costitutiva del materiale.

Questo criterio può risultare agevole ed affidabile per quei materiali che presentano una legge costitutiva elastica lineare, come l'acciaio, e per i quali le caratteristiche meccaniche sono costanti nel tempo e nello spazio. I parametri meccanici dei metalli sono inoltre noti con un ottimo grado di precisione.

Può risultare più complesso applicare questo metodo per strutture costituite da materiali che presentano caratteristiche non uniformi nello spazio e nel tempo.

Il calcestruzzo, ad esempio, è un materiale eterogeneo per sua natura e può essere considerato omogeneo solo se ci si riferisce ad una scala macroscopica. Inoltre, presenta un comportamento di tipo viscoelastico e la misura delle tensioni a partire dalle deformazioni risulta difficoltosa poiché il modulo di elasticità è variabile nel tempo e le deformazioni viscosi si sovrappongono a quelle elastiche.

Ad oggi gli strumenti più comunemente utilizzati per la misura dello stato tensionale sono i martinetti piatti, mentre i deformometri sono usati per la misura degli spostamenti.

Si segnalano inoltre i concrete stress-meters, che sono strumenti di nuova concezione per la misura delle tensioni nel calcestruzzo

1.1.1 Martinetti piatti

Il martinetto piatto è costituito da due membrane in acciaio saldate sui bordi, in genere di forma semicircolare o rettangolare, che presentano due fori per il passaggio dell'olio in pressione, uno di ingresso e uno di uscita come si può vedere in Figura 1.1.



Figura 1.1 Martinetto piatto

La prova si basa sulla variazione dello stato tensionale in un punto della struttura provocato da un taglio piano eseguito in direzione normale alla superficie del solido. Tramite deformometri si misura la distanza relativa di due punti di riferimento, sopra e sotto il taglio. I due punti tendono ad avvicinarsi a causa della parziale chiusura della fessura creata. Viene dunque inserito il martinetto e tramite una pompa oleodinamica la pressione interna viene gradualmente aumentata fino ad annullare la deformazione misurata successivamente all'esecuzione del taglio. In prima approssimazione, la pressione all'interno del martinetto è uguale alla sollecitazione preesistente all'interno dell'elemento.

Questo metodo presenta degli svantaggi:

- Si rende necessario un parziale danneggiamento per l'alloggiamento del martinetto.
- Le dimensioni del martinetto possono risultare troppo invasive per elementi di piccole dimensioni.
- Non può essere sfruttato per monitoraggi di lunga durata, in quanto la pressione dovrebbe essere mantenuta costante nel tempo con una tolleranza molto ridotta e spesso questo tipo di sistemi idraulici non sono concepiti per applicazioni permanenti.

1.1.2 Deformometri

Sono strumenti per la misura dello spostamento relativo tra due punti di riscontro che costituiscono la base di misura.



Figura 1.2 Deformometro

Esistono deformometri meccanici, elettrici, elettromeccanici o ottici. A seconda della tecnologia utilizzata questi strumenti possono essere in grado di misurare diverse grandezze: variazioni di resistenza elettrica, variazioni di campo magnetico, lunghezza d'onda di una sorgente luminosa, vibrazioni di una corda. Tutte le grandezze sono poi convertite a spostamenti relativi tra i due punti di riferimento.

In questo modo, nota la legge costitutiva del materiale, si è in grado di ricavare la variazione di tensione in direzione della base di misura.

Questa soluzione ha due svantaggi principali:

- Le caratteristiche meccaniche di malta e calcestruzzo non sono costanti nel tempo e non sono note con un elevato grado di precisione a priori.
- La natura viscoelastica del calcestruzzo può indurre un incremento di deformazioni nel tempo che possono essere fino a due volte maggiori di quelle elastiche.

1.1.3 Concrete stress-meters

Una nuova soluzione per la misura dello stato tensionale nelle strutture in calcestruzzo è un dispositivo chiamato “concrete stressmeter”, costituito da una cella di carico in serie con un cilindro in calcestruzzo. Il calcestruzzo all'interno del cilindro deve avere le stesse proprietà meccaniche di quello circostante. Le pareti laterali del cilindro sono costituite da un tubo in materiale polimerico liscio e poroso.



Figura 1.3 Concrete stress- meter (GEOKON)

In questo modo viene garantita una maturazione omogenea tra il calcestruzzo all'interno dello strumento e quello fuori e viene impedito un trasferimento di tensioni sulle pareti laterali del cilindro. Di conseguenza le tensioni possono essere trasmesse solo attraverso le basi circolari del cilindro.

Questa soluzione presenta degli svantaggi:

- Si tratta di una strumentazione ingombrante, che richiede strutture sufficientemente grandi, tali da consentirne l'installazione e da non modificare significativamente il comportamento strutturale.
- Il dispositivo deve essere ancorato alle gabbie di armatura immediatamente prima della realizzazione del getto perché deve essere riempito dello stesso materiale. Questo comporta un'interferenza non trascurabile durante le fasi di getto.
- A causa delle dimensioni del contenitore, grande a sufficienza per accogliere gli aggregati, non si ottiene un'informazione puntuale sulle tensioni, ma mediata su una lunghezza di 60 cm.

1.2 Estensimetri

Gli estensimetri sono strumenti per la misura di deformazioni in corpi solidi, che possono essere generate da pressioni, momenti, variazioni termiche, ecc. Gli estensimetri più comunemente utilizzati sono quelli a resistenza elettrica, mostrati in Figura 1.4.

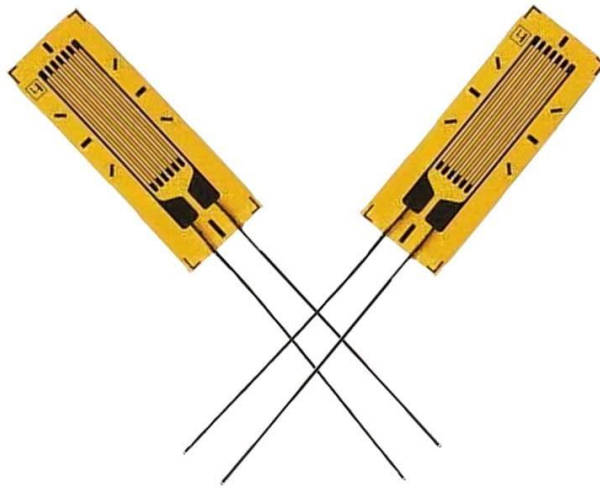


Figura 1.4 Estensimetri a resistenza elettrica

Quando un corpo solido è sottoposto ad un carico, la variazione di lunghezza viene rilevata dall'estensimetro e misurata in termini di resistenza elettrica del filamento, variabile linearmente con la stessa deformazione.

Tale strumentazione presenta però degli svantaggi:

- Il materiale che costituisce l'estensimetro è sensibile a variazioni termiche
- Il valore di resistenza tende a cambiare con il trascorrere del tempo.

Per questo motivo non sono strumenti adatti ad una misurazione continuativa, a meno di compensazioni da applicare a seconda della temperatura di esercizio e di correzioni che tengano conto della deriva del valore di resistenza.

1.3 Nuove tecnologie

Negli ultimi decenni l'evoluzione di sensori a basso costo, lo sviluppo di reti internet con velocità di trasferimento dei dati sempre maggiore, la nascita di servizi cloud e lo sviluppo di tecnologie per l'intelligenza artificiale hanno modificato il panorama del monitoraggio strutturale.

Ad oggi i sensori sono basati, per lo più, su tecnologia MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems). Lo stato dell'arte sulla tecnologia MEMS include sensori che lavorano attraverso micromovimenti meccanici, letti elettronicamente, come inclinometri, accelerometri e magnetometri. Questo tipo di sensori permettono di effettuare un monitoraggio strutturale a costi decisamente più contenuti delle tecnologie precedentemente utilizzate.

Altri nuovi sensori sono basati su tecnologie piezoresistive e capacitive. Una prima tipologia di sensori piezoresistivi, costituiti da un corpo ceramico, sono stati già utilizzati su strutture

in cemento armato, tenendo in considerazione le condizioni di carico, (Anerdi, Gino, Malavisi, Bertagnoli, 2018) e gli effetti reologici del calcestruzzo (Abbasi, Anerdi, Bertagnoli, 2020). I sensori capacitivi per impiego nel calcestruzzo che sono oggetto della presente tesi, sono ad oggi in stato prototipale.

1.3.1 Sensori ceramici

A partire dal 2015 questo tipo di sensori è stato sviluppato e brevettato da un gruppo di ricerca di ST Microelectronics, in collaborazione con il Politecnico di Torino. Lo sviluppo ha portato ad un secondo brevetto ed alla produzione dei primi prototipi nel 2016.

Il sensore consiste in un disco ceramico delle dimensioni di una moneta, composto da tre strati di Ossido di Alluminio (Al_2O_3) incollati tramite vetro bassofondente. Nello strato intermedio sono state installate delle piezo-resistenze di ossido di rutenio con orientazioni diverse, al fine di misurare le deformazioni in direzioni diverse. Due ponti Wheatstone sono realizzati nello strato ceramico intermedio. Il primo ponte è chiamato "planare" in quanto progettato per essere influenzato solo dalle deformazioni che si trovano nel piano del sensore, mentre il secondo ponte è chiamato "3D" in quanto progettato per essere influenzato dallo stato di deformazione completo all'interno del sensore.

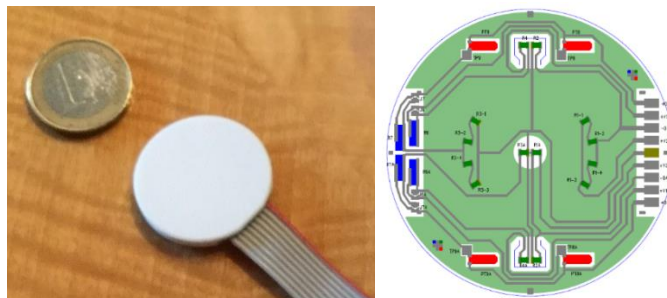


Figura 1.5 Sensore ceramico e schema elettrico interno

Poiché la ceramica è un materiale perfettamente elastico, è possibile un calcolo diretto della sollecitazione in una data direzione nel campo delle tipiche sollecitazioni del calcestruzzo. Il principio di funzionamento del dispositivo è la possibilità di misurare la forza che agisce sulle sue superfici circolari, e quindi la pressione media ortogonale a quelle superfici, senza alcuna misura diretta della deformazione del calcestruzzo.

1.3.2 Sensori capacitivi

Il sensore capacitivo che sarà analizzato in questa tesi è stato brevettato nel 2019. Esso è costituito da un condensatore a piastre parallele con materiale Kapton come strato dielettrico.

In questo caso l'area sensiente dell'elemento è quella della superficie della piastra, che può essere realizzata con un diametro variabile, a seconda delle necessità e delle caratteristiche dell'elemento strutturale da monitorare. Il sensore oggetto di studio ha un diametro di 40 mm ed uno spessore di 1.75 mm circa e può essere dotato di staffe che, in progetto, gli permettono di lavorare anche in trazione, oltre che a compressione.



Figura 1.6 Schema dielettrico e sensore capacitivo

La capacità C , misurata in picofarads (pF), cambia al variare della distanza delle piastre, a causa della compressione trasmessa al dielettrico dalle piastre stesse. Per un condensatore a facce parallele vale:

$$C = \frac{\varepsilon A}{d}$$

Dove ε , A e d , sono rispettivamente la permittività, l'area sensiente e la distanza tra gli elettrodi. Il dielettrico utilizzato (Kapton) ha una costante dielettrica pari a $\varepsilon_r = 3.4$. La permittività è assunta essere pari a $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, in cui $\varepsilon_0 = 8.8542 \cdot 10^{-3} \text{ pF/mm}$ è la costante dielettrica del vuoto.

La capacità può essere convertita in voltaggio, corrente o frequenza da un lettore che viene posto esternamente rispetto alla struttura monitorata, il più vicino possibile al sensore, per evitare dispersioni e correnti parassite. In questo modo solo il sensore è situato all'interno della struttura mentre tutte le componenti elettroniche sono poste all'esterno, rendendo agevole le operazioni di manutenzione o, eventualmente, di sostituzione.

Questo tipo di sensori dovrebbero offrire diversi vantaggi, come l'alta sensibilità, elevata stabilità, costi molto bassi e una lunga durata data l'assenza di componenti elettroniche all'interno della struttura.

1.3.3 Progetto InSiSt

Il progetto InSiSt (Sistema di monitoraggio INtelligente per la SIcurezza delle InfraSTruttture urbane) prevede un'attività di ricerca e sviluppo di sistemi di monitoraggio innovativi su strutture e infrastrutture in ambito urbano, come edifici, ponti e gallerie. Il sistema di monitoraggio si basa sull'utilizzo di sensori innovativi a basso costo (inclinometri, accelerometri e sensori di pressione) da inserire in maniera diffusa nelle strutture. I dati registrati sono elaborati attraverso modelli strutturali, in modo da avere un riscontro sulla sicurezza strutturale in tempo reale. Tale approccio consente di sviluppare un modello di monitoraggio in grado di gestire una grande quantità di dati e, grazie allo sviluppo di modelli matematici che possono fornire intelligenza artificiale al sistema, capace di gestire la sicurezza, la manutenzione predittiva, le soglie di allarme e le possibili problematiche presenti.

Attraverso l'applicazione di sistemi di monitoraggio intelligenti, le strutture civili possono essere trasformate in "smart structures" in grado non solo di verificare la loro sicurezza in tempo reale, ma anche di monitorare l'ambiente circostante, una volta che saranno sufficientemente diffuse in ambito urbano.

Il progetto, finanziato nell'ambito del Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014 – 2020, gestito dal Ministero dell'Università e della Ricerca, prevede la collaborazione di diverse realtà italiane, accademiche e non, tra cui: Politecnico di Torino, Alma Mater Studiorum - Università Di Bologna, Università degli Studi di Palermo, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata", Università degli Studi di Bergamo, Sviluppo tecnologie e ricerca per l'edilizia sismicamente sicura ed ecosostenibile - SOCIETA' CONSOR, STMicroelectronics srl, Mapei S.P.A., IoTty srl.

2 Studio preliminare del sensore capacitivo

Lo scopo del presente lavoro è comprendere il comportamento globale del sensore capacitivo sotto carico, la risposta dei singoli componenti e l’influenza che il sensore ha sulla struttura in cui è inserito. Tramite modellazione agli elementi finiti si è inoltre cercato di individuare la geometria interna ottimale del sensore per ottimizzare le sue performance e minimizzare gli errori di misura.

2.1 Geometria preliminare

La geometria preliminare prevede un diametro del sensore di 40 mm, costituito da più strati di materiale diverso, come mostrato in Figura 2.1**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

Gli spessori dei vari strati del modello sono mostrati in Tabella 2.1:

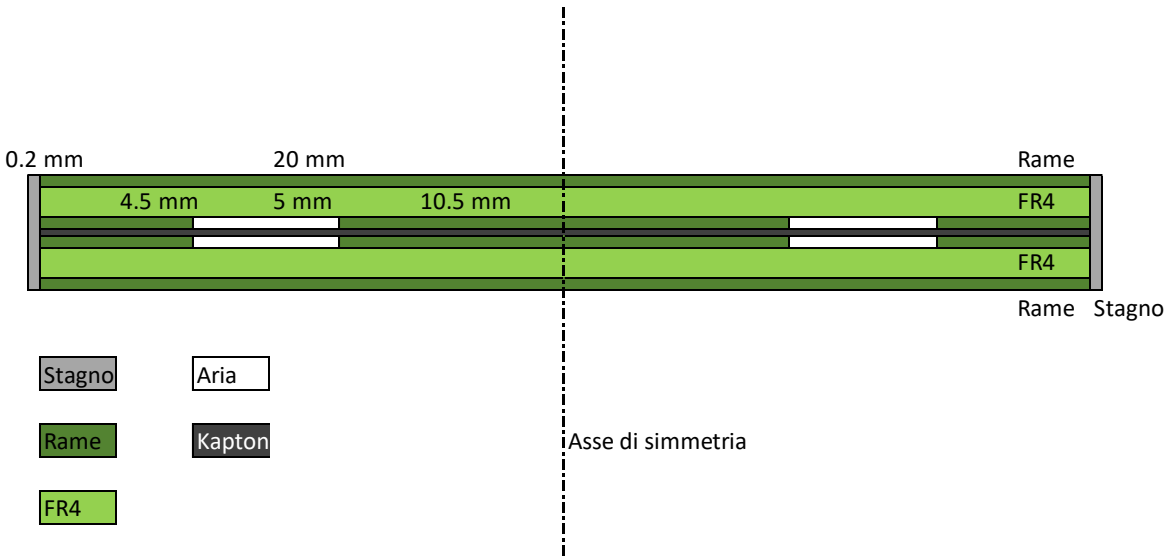


Figura 2.1 Geometria preliminare

Tabella 2.1 Materiali e spessore

Materiale	Spessore
Rame	35 μm
FR4	800 μm
Rame	35 μm
Kapton	25 μm
Rame	35 μm
FR4	800 μm

Rame	35 μm
------	------------------

Il sensore presenta un diametro di 40 mm. Lo strato dielettrico in kapton è posto tra due PCB (Printed Circuit Board). Questi ultimi sono dei supporti utilizzati in elettronica costituiti da un materiale di supporto non conduttore, la vetronite, ricoperto da uno strato sottile di materiale conduttore, il rame. Quest'ultimo viene poi intagliato per ottenere le piste del circuito. A partire dall'asse di rotazione, in direzione radiale è presente un intaglio nelle board interne di rame di dimensioni pari a 5 mm. L'intaglio ha in questo caso la funzione di limitare l'area sensiente alle sole piastre di rame a contatto con il kapton, di diametro pari a 21 mm.

All'estremità del sensore, in direzione radiale, è presente una saldatura in stagno di dimensioni pari allo spessore del sensore in direzione assiale e circa 0.2 mm in direzione radiale.

2.2 Layout di carico

Per analizzare il comportamento sotto carico del sensore sono state eseguite delle analisi agli elementi finiti tramite il software di calcolo DIANA FEA. Il sensore è stato considerato immerso in un provino cilindrico di malta cementizia di diametro pari a 15 cm e altezza pari a 30 cm. In Figura 2.2 si riporta il modello in simmetria cilindrica.

Nelle analisi eseguiti il carico è considerato uniformemente distribuito, applicato sulle facce circolari del provino di malta.

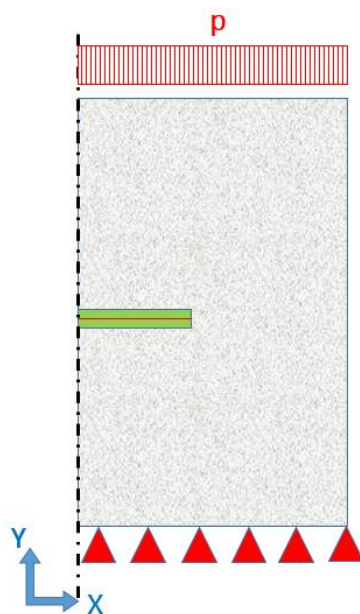


Figura 2.2 Carichi e vincoli provino in geometria assialsimmetrica

2.3 Geometria del modello FEM

Il modello è stato realizzato utilizzando una geometria assialsimmetrica con l'asse Y come asse di rotazione.

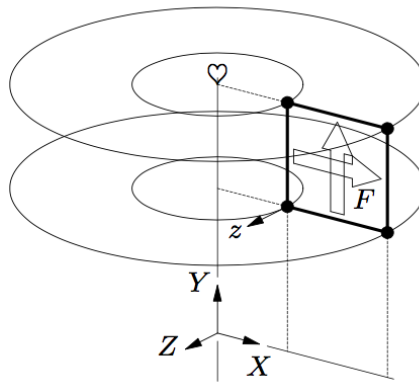


Figura 2.3 Convenzione assi geometria assialsimmetrica

Gli assi X e Z risultano essere orientati rispettivamente in direzione radiale e circonferenziale.

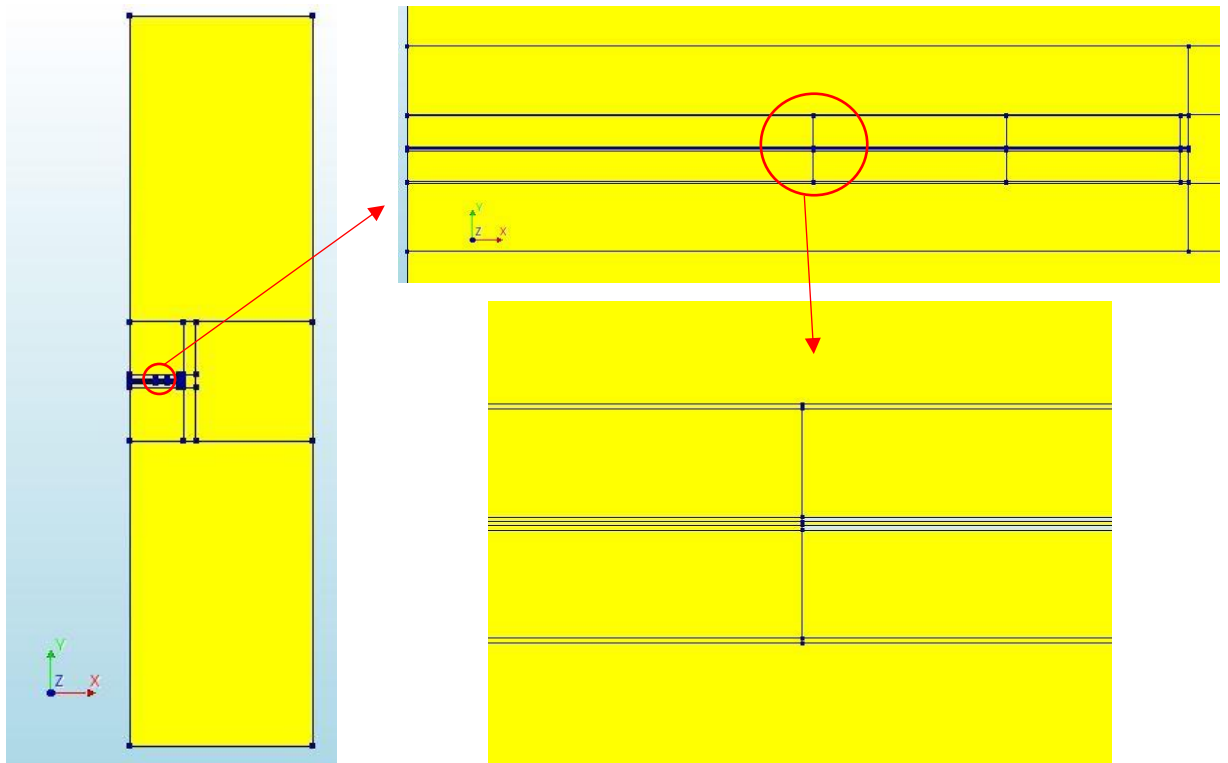


Figura 2.4 Geometria con dettaglio sul sensore

È stata usata una mesh rettangolare per il sensore ed una triangolare per la malta cementizia con raffinamento della stessa in corrispondenza del sensore. Si riporta la mesh utilizzata con dettaglio in corrispondenza dell'interfaccia tra sensore e malta in Figura 2.5.

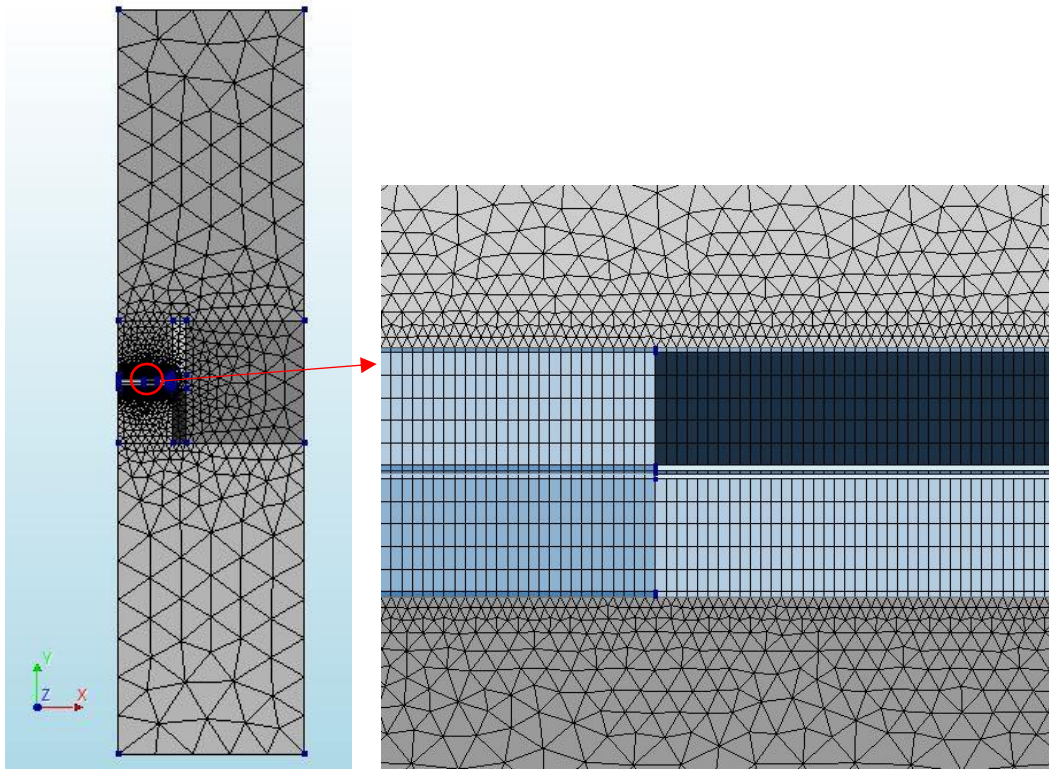


Figura 2.5 Mesh con dettaglio sul sensore

Si è chiamato rame ext il foglio di rame a contatto con la malta e rame int il foglio di rame a contatto con il kapton.

2.3.1 Proprietà dei materiali

Il rame è stato modellato come materiale elastico isotropo con le seguenti caratteristiche:

Tabella 2.2 Caratteristiche rame

Rame			
Modulo elastico	$E =$	128 000	MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,36	
Densità	$\rho =$	8960	kg/m ³

Il materiale FR4 (vetronite) è stato modellato come materiale elastico ortotropo con le seguenti caratteristiche:

Tabella 2.3 Caratteristiche FR4

FR4			
Modulo elastico	$E_x =$	23 650	MPa
	$E_y =$	9 101.4	MPa
	$E_z =$	23 650	MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu_{xy} =$	0,18	
	$\nu_{yz} =$	0,18	
	$\nu_{xz} =$	0,12	
Modulo di taglio	$G_{xy} =$	37 026	Mpa
Densità	$\rho =$	1763	kg/m ³

Il materiale Kapton è stato modellato come materiale elastico isotropo con le seguenti caratteristiche:

Tabella 2.4 Caratteristiche kapton

Kapton			
Modulo elastico	$E =$	2 500	MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,34	
Densità	$\rho =$	1420	kg/m ³

Lo stagno è stato modellato come materiale elastico isotropo con le seguenti caratteristiche:

Tabella 2.5 Caratteristiche stagno

Stagno			
Modulo elastico	$E =$	50 000	MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,357	
Densità	$\rho =$	5800	kg/m ³

Nel modello gli strati di rame e FR4 sono considerati solidali tra di loro, in quanto appartenenti alla stessa board. I contatti tra il rame interno e il kapton e tra il rame esterno e

la malta sono stati modellate delle interfacce di tipo attritivo alla Coulomb con coesione nulla e caratteristiche riportate in Tabella 2.6.

Tabella 2.6 Caratteristiche interfacce

Interfaccia	Angolo di attrito	Coefficiente di attrito (μ)
Rame – Kapton	0.43 rad	0.46
Rame – Malta	0.46 rad	0.43

2.4 Caratteristiche della malta

2.4.1 Modellazione con malta elastica

Il materiale di partenza del cilindro in cui è annegato il sensore è una malta elastica lineare isotropa. In prima analisi è stata considerata la malta con un modulo di elasticità pari a 20 GPa ed in seguito pari a 30 GPa.

Tabella 2.7 Caratteristiche malta $E=20\text{GPa}$

Malta			
Modulo elastico	$E =$	20000	MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,2	
Densità	$\rho =$	2300	kg/m ³

Tabella 2.8 Caratteristiche malta $E=30\text{GPa}$

Malta			
Modulo elastico	$E =$	20000	MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,2	
Densità	$\rho =$	2300	kg/m ³

2.4.2 Fessurazione

Successivamente alle analisi puramente elastiche eseguite con il materiale descritto nel paragrafo precedente, alla malta è stata conferita la capacità di fessurare. È stata assunta una resistenza caratteristica a compressione pari a 25 MPa ed una resistenza a trazione pari al

10% di quella di compressione, con una deformazione ultima a trazione pari a $2 \cdot 10^{-4}$, come si può osservare in Figura 2.6.

Tabella 2.9 Caratteristiche malta in grado di fessurare

Malta			
Modulo elastico	$E =$	30000	MPa
Resistenza a compressione	$f_{ck} =$	25	MPa
Resistenza a trazione	$f_{ctk} =$	2.5	MPa
Deformazione di fessurazione	$\varepsilon_{cr} =$	$8.3 \cdot 10^{-5}$	
Deformazione ultima a trazione	$\varepsilon_{cr,u} =$	$2 \cdot 10^{-4}$	
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,2	
Densità	$\rho =$	2300	kg/m ³

Si è optato per modello fessurativo diffuso che assume a trazione una legge elastica lineare fino al raggiungimento della deformazione di fessurazione e poi una legge lineare decrescente per il ramo di softening, dalla deformazione di fessurazione fino alla deformazione ultima:

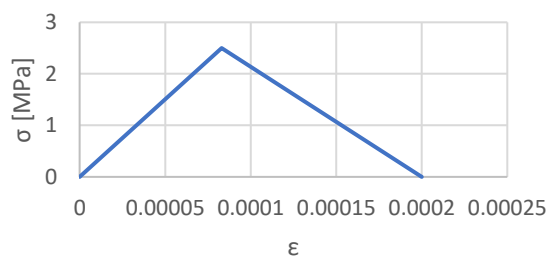


Figura 2.6 Legge costitutiva a trazione malta

2.4.3 Caratteristiche della malta secondo CEB-FIP MODEL CODE 90

Al fine di inserire nel modello gli effetti reologici della malta si è quindi deciso di modellare la malta come un calcestruzzo secondo il CEB-FIP MODEL CODE 1990 con resistenza caratteristica di 25 MPa e con le proprietà meccaniche mostrate in Tabella 2.10.

Tabella 2.10 Caratteristiche Malta secondo il MC90

Malta MC90

Resistenza caratteristica a compressione	$f_{ck} =$	25	MPa
Resistenza media a trazione	$f_{ctm} =$	2.58	MPa
Tipo di aggregati	calcarei		
Dimensione max aggregati	$d_{max} =$	8	mm
Modulo elastico a 28gg	$E_{ci} =$	28.808	GPa
Età del cls al momento del carico	$t_0 =$	7	gg
Modulo elastico al momento del carico	$E_c(t_0) =$	25.423	GPa
Umidità relativa	$RH =$	50	%
Temperatura di maturazione	$T =$	20	°C

2.4.4 Viscoelasticità

Per valutare l'effetto della natura viscoelastica della malta è stata applicata una tensione di compressione uniformemente distribuita pari a 10 MPa sulle facce circolari del provino di malta. Dopo l'applicazione del carico è stato valutato l'effetto progressivo del creep nel tempo a distanza di: 2h, 4h, 8h, 15h, 1gg, 2gg, 4gg, 8gg, 16gg, 1 mese, 2 mesi, 4 mesi, 8 mesi, 1 anno, 2 anni, 4 anni, 8 anni.

In primo luogo, è stata verificata la conformità tra risultati del software ed il MC90 usando la creep function $J(t, t_0)$:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{ci}} \right] = \sigma_c(t_0) \cdot J(t, t_0)$$

Dove:

- $\sigma_c(t_0)$ è la tensione di compressione a cui è soggetta il provino, pari a 10 MPa.
- $\phi(t, t_0)$ è il coefficiente di creep.
- $J(t, t_0)$ è la funzione di creep, che rappresenta la deformazione totale per unità di tensione.

Tabella 2.11 Confronto creep function $J(t, t_0)$ MC90 - DIANA

Tempo	[gg]	MC90	DIANA	Differenza
		$J(t, t_0)$ [mm ² /N]	$J(t, t_0)$ [mm ² /N]	[%]
1 gg	1	6.34E-05	6.56E-05	3.43
2 gg	2	6.89E-05	7.15E-05	3.76
4 gg	4	7.57E-05	7.83E-05	3.43
8 gg	8	8.40E-05	8.62E-05	2.57
16 gg	16	9.40E-05	9.64E-05	2.60
1 mese	30	1.05E-04	1.07E-04	2.57
2 mesi	60	1.18E-04	1.20E-04	1.85

4 mesi	120	1.32E-04	1.35E-04	1.81
8 mesi	240	1.46E-04	1.49E-04	1.77
1 anno	365	1.54E-04	1.56E-04	1.44
2 anni	730	1.64E-04	1.67E-04	1.37
4 anni	1460	1.71E-04	1.74E-04	1.51
8 anni	2920	1.76E-04	1.78E-04	1.17

Creep MC90 vs DIANA

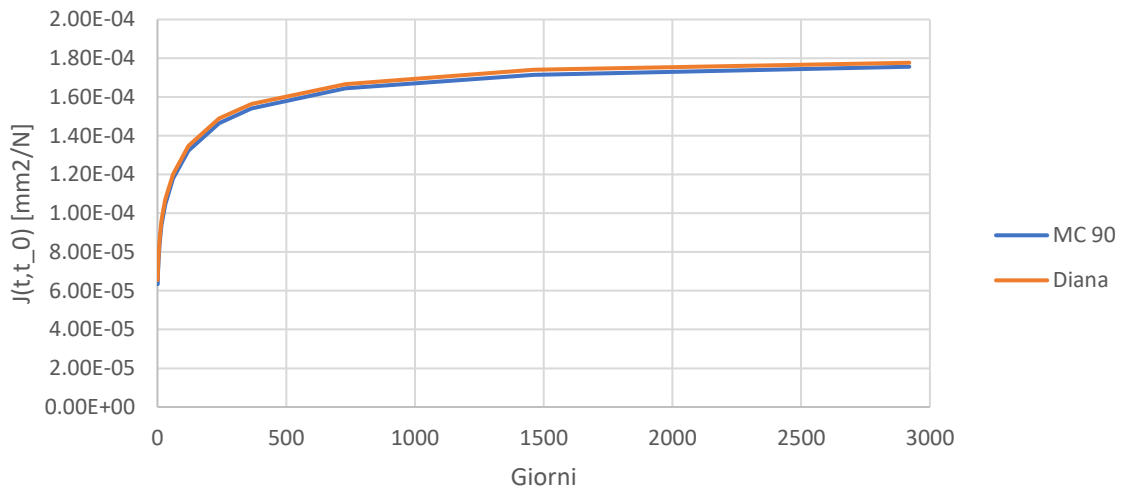


Figura 2.7 Confronto creep function MC90 – DIANA

Dalla tabella e dal grafico si deduce che la funzione di creep ottenuta tramite il software agli elementi finiti risulta sovrapponibile e conforme a quella calcolata tramite il MC90, con una differenza massima del 3.76%, del tutto accettabile. Possiamo ammettere quindi l'attendibilità dei risultati ottenuti tramite software.

A fronte di una deformazione elastica di $0.43\text{e-}3$, dopo 8 anni, a causa del creep si registra una deformazione pari a $1.77\text{e-}3$. La deformazione dovuta al creep risulta dunque pari a $1.34\text{e-}3$, cioè pari a 3.2 volte la deformazione elastica.

È bene precisare che il confronto è stato condotto non tenendo in considerazione gli intervalli temporali inferiori ad un giorno poiché la formulazione del MC90 prevede un calcolo di tempo in giorni ed è dichiarata affidabile solo a partire da 3 giorni dal getto.

2.4.5 Ritiro

Il ritiro della malta è stato implementato secondo il MODEL CODE 1990, considerando un'età della malta al termine delle operazioni di curing pari a 3 giorni. Il ritiro, quindi, avrà luogo a partire dal terzo giorno.

In primo luogo, è stata verificata la conformità tra risultati del software ed il MC90: è stata effettuata un'analisi senza alcun carico esterno allo scopo di valutare l'effetto del ritiro nel tempo, prendendo come parametro di controllo la deformazione assiale.

L'effetto è stato valutato a distanza di: 2h, 4h, 8h, 15h, 1gg, 2gg, 4gg, 8gg, 16gg, 1 mese, 2 mesi, 4 mesi, 8 mesi, 1 anno, 2 anni, 4 anni, 8 anni.

Tabella 2.12 Confronto ϵ_{sh} MC90 - DIANA

Tempo	[gg]	MC90	DIANA	Differenza
		ϵ_{sh}	ϵ_{sh}	[%]
3gg	3	0.00E+00	0.00E+00	0.039
4gg	4	-4.29E-05	-4.29E-05	0.038
5gg	5	-6.05E-05	-6.05E-05	0.037
6gg	6	-7.39E-05	-7.39E-05	0.037
7gg	7	-8.52E-05	-8.51E-05	0.037
8gg	8	-9.50E-05	-9.49E-05	0.036
9gg	9	-1.04E-04	-1.04E-04	0.035
11gg	11	-1.19E-04	-1.19E-04	0.034
15gg	15	-1.45E-04	-1.45E-04	0.032
23gg	23	-1.83E-04	-1.83E-04	0.031
1mese 1sett	37	-2.32E-04	-2.32E-04	0.030
2 mesi 1 sett	67	-2.99E-04	-2.99E-04	0.029
4 mesi 1 sett	127	-3.75E-04	-3.75E-04	0.028
8 mesi 1 sett	247	-4.49E-04	-4.49E-04	0.029
1 anno 1 sett	372	-4.87E-04	-4.87E-04	0.028
2 anni 1 sett	737	-5.36E-04	-5.36E-04	0.029
4 anni 1 sett	1467	-5.67E-04	-5.66E-04	0.030
8 anni 1 sett	2927	-5.84E-04	-5.84E-04	0.030
16 anni 1 sett	5847	-5.94E-04	-5.93E-04	0.039

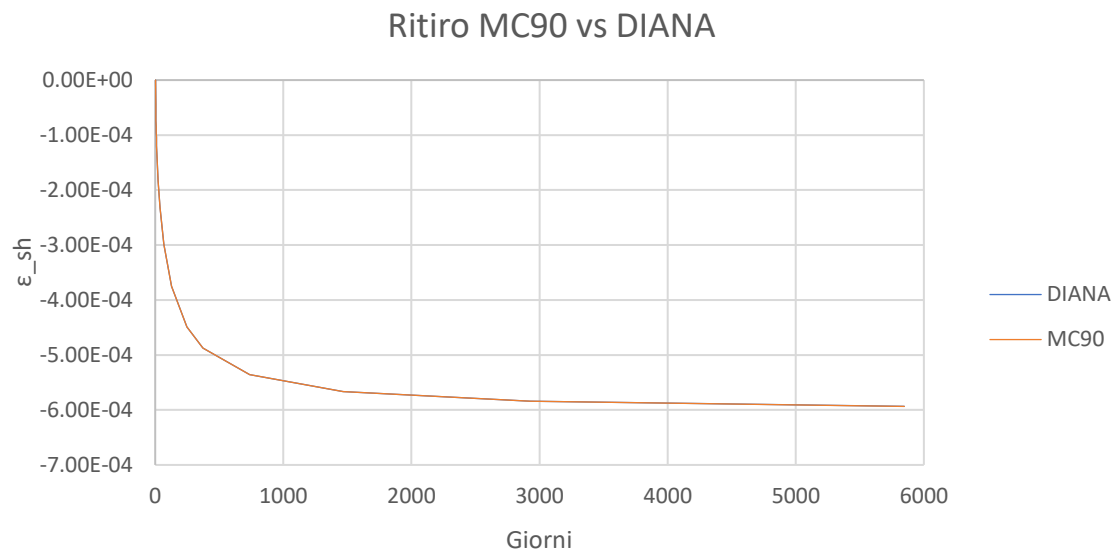


Figura 2.8 Confronto ε_{sh} MC90 – DIANA

Dalla Tabella 2.12 e dalla Figura 2.8 si evince come la curva dell'evoluzione delle deformazioni assiali nel tempo, dovute al ritiro, ottenuta tramite il software agli elementi finiti risulta sovrapponibile e conforme a quella calcolata tramite il MC90, con una differenza massima dello 0.039%. Possiamo ammettere quindi l'attendibilità dei risultati ottenuti tramite software.

Risulta interessante notare come già a distanza di quattro anni è stato sviluppato oltre il 90% del ritiro.

2.4.6 Fessurazione

Viene assunto un comportamento a trazione di tipo softening non lineare, secondo il paragrafo 2.1.4.4.2 del CEB-FIP Model Code 1990, implementato nel software:

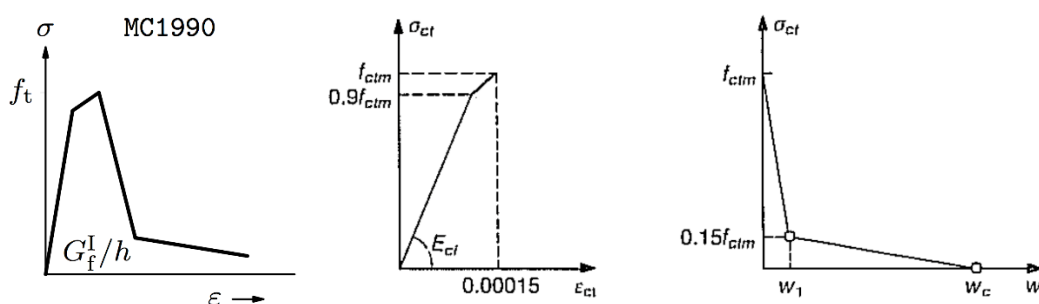


Figura 2.9 Legge costitutiva a trazione della malta

Per $\sigma_{ct} \leq 0.9 f_{ctm}$ $\sigma_{ct} = E_{ci} \varepsilon_{ct}$

$$\text{Per } 0.9 f_{ctm} < \sigma_{ct} \leq f_{ctm} \quad \sigma_{ct} = f_{ctm} - \frac{0.1 f_{ctm}}{0.00015 - 0.9 f_{ctm} / E_{ci}} (0.00015 - \varepsilon_{ct})$$

Dove:

- E_{ci} (MPa) è il modulo di elasticità tangente
- f_{ctm} (MPa) è la resistenza a trazione
- σ_{ct} (MPa) è la tensione di trazione
- ε_{ct} è la deformazione di trazione.

Dopo l'apertura della fessura il legame è bilineare, con una relazione tensione-apertura della fessura del tipo:

$$\text{per } 0.15 f_{ctm} \leq \sigma_{ct} \leq f_{ctm} \quad \sigma_{ct} = f_{ctm} \left(1 - 0.85 \frac{w}{w_1} \right)$$

$$\text{per } 0 \leq \sigma_{ct} \leq 0.15 f_{ctm} \quad \sigma_{ct} = \frac{0.15 f_{ctm}}{w_c - w_1} (w_c - w)$$

$$w_1 = 2 \frac{G_F}{f_{ctm}} - 0.15 w_c$$

$$w_c = \alpha_f \frac{G_F}{f_{ctm}}$$

Dove:

- w (mm) è l'apertura della fessura
- w_1 (mm) è l'apertura della fessura per $\sigma_{ct} = 0.15 f_{ctm}$
- w_c (mm) è l'apertura della fessura per $\sigma_{ct} = 0$
- G_F (Nmm/mm²) è l'energia di frattura
- α_f è un coefficiente che dipende dalla dimensione massima degli aggregati ed è pari a 8 per $d_{max} = 8$ mm

2.5 Analisi preliminari

Le analisi sulla geometria preliminare del modello mirano a valutare gli effetti che le caratteristiche della malta hanno sul comportamento interno del sensore, ed in particolare si sono eseguite le analisi descritte di seguito in cui la geometria e la mesh sono mantenute invariate:

- **Effetto della rigidità della malta:** sono state eseguite due analisi elastiche lineari con un carico uniformemente distribuito sulle facce circolari del provino di malta pari a 1 MPa. La prima analisi prevede una malta con modulo elastico di 20GPa, mentre nella seconda il modulo elastico della malta è pari a 30 GPa.
- **Effetto della fessurazione:** Il carico applicato consiste in una compressione uniformemente distribuita pari a 10 MPa sulle facce circolari del provino di malta. Il carico è stato applicato con 10 step di 1 MPa. È stata effettuata una doppia analisi considerando la malta elastica lineare, in assenza ed in presenza di possibilità di fessurare.
- **Effetto dei fenomeni lenti: viscoelasticità e ritiro.** Il carico di compressione uniformemente distribuita di 10 MPa in 10 step, descritto al punto precedente, è stato applicato a sette giorni dal getto e mantenuto costante per quattro anni, allo scopo di cogliere gli effetti reologici della malta e l'influenza che questi hanno sulle misure del sensore. Nel modello viene modellata la malta avente proprietà meccaniche secondo il CEB-FIP Model Code 1990 (Paragrafo 2.4.3).

2.6 Risultati

Le tensioni e le deformazioni che derivano dalle analisi sono riportate di seguito per tutte le direzioni: radiale X, assiale Y e circonferenziale Z.

Gli andamenti delle tensioni e deformazioni sono riportati lungo una sezione radiale da $x=0$ (asse di simmetria cilindrica) a $x = 20$ mm (raggio esterno del sensore).

2.6.1 Malta elastica con $E = 20$ GPa

2.6.1.1 Tensioni assiali σ_{yy}

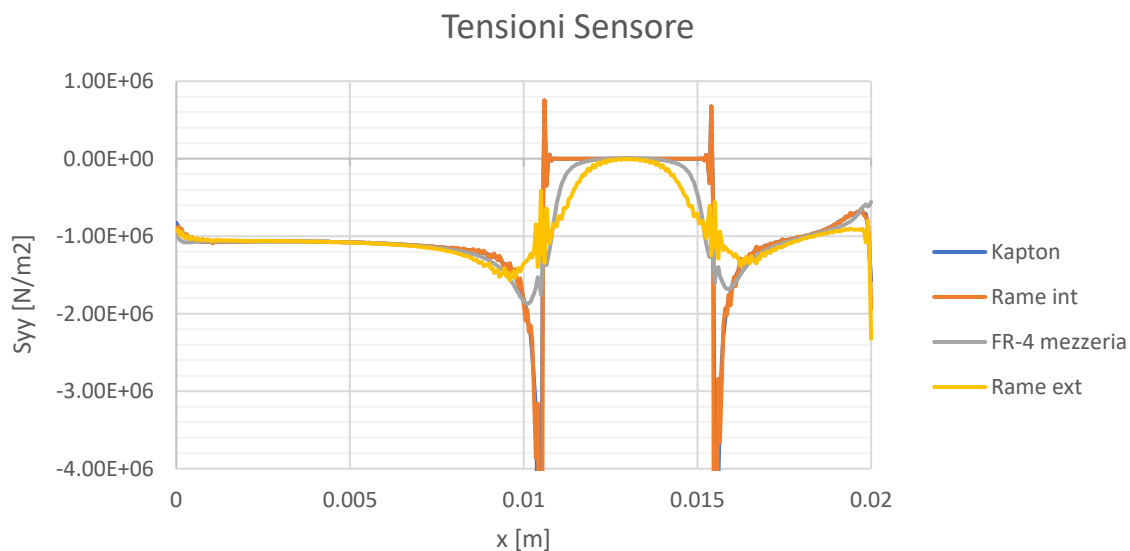
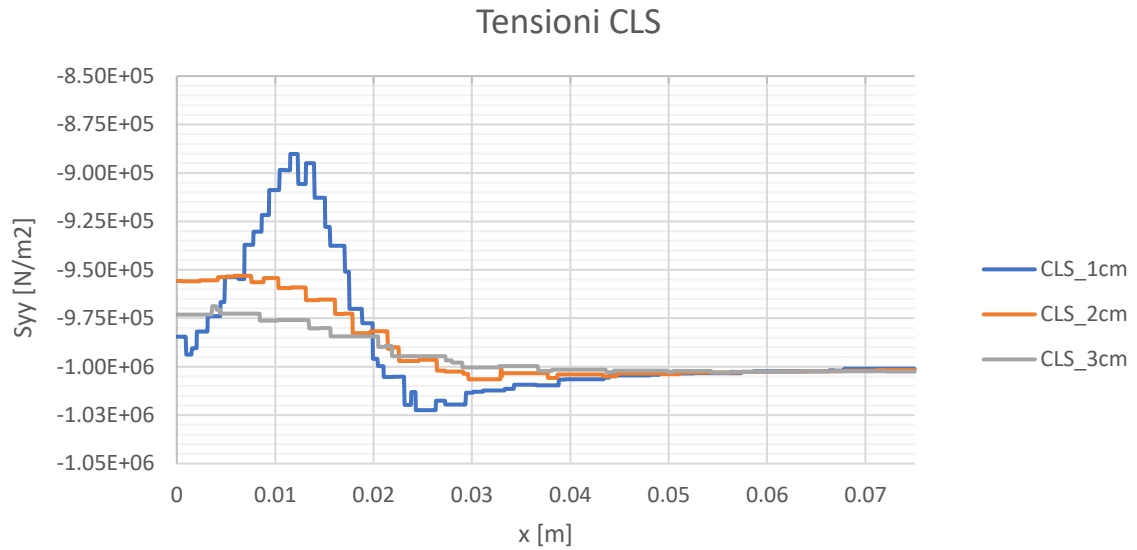


Figura 2.10 S_{yy} nel sensore

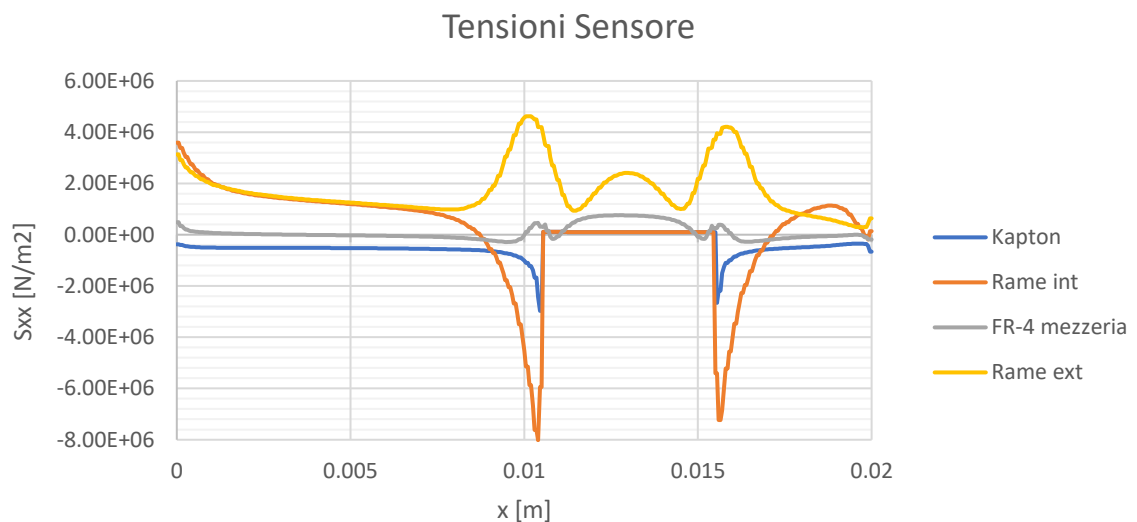
Nel grafico si riportano soltanto le tensioni nel rame e nell'FR4 che costituiscono la board superiore poiché, per simmetria, si registra lo stesso stato tensionale per la board inferiore.

Figura 2.11 S_{yy} CLS

In Figura 2.11 sono mostrate le tensioni S_{yy} in corrispondenza della malta cementizia alla distanza di 1, 2 e 3 cm dalla faccia superiore del sensore in direzione assiale Y. Si nota come all'allontanarsi dal centro del sensore, sia in direzione radiale X, sia in direzione assiale Y, le tensioni all'interno della malta tendono ad uniformarsi al valore del carico applicato alle estremità del provino, ovvero $-1.00E+06$ Pa, ovvero -1.0 MPa.

Si nota inoltre come la variazione delle tensioni assiali sia contenuta tra +3% e -12% rispetto al valore applicato.

2.6.1.2 Tensioni radiali σ_{xx}

Figura 2.12 S_{xx} nel sensore

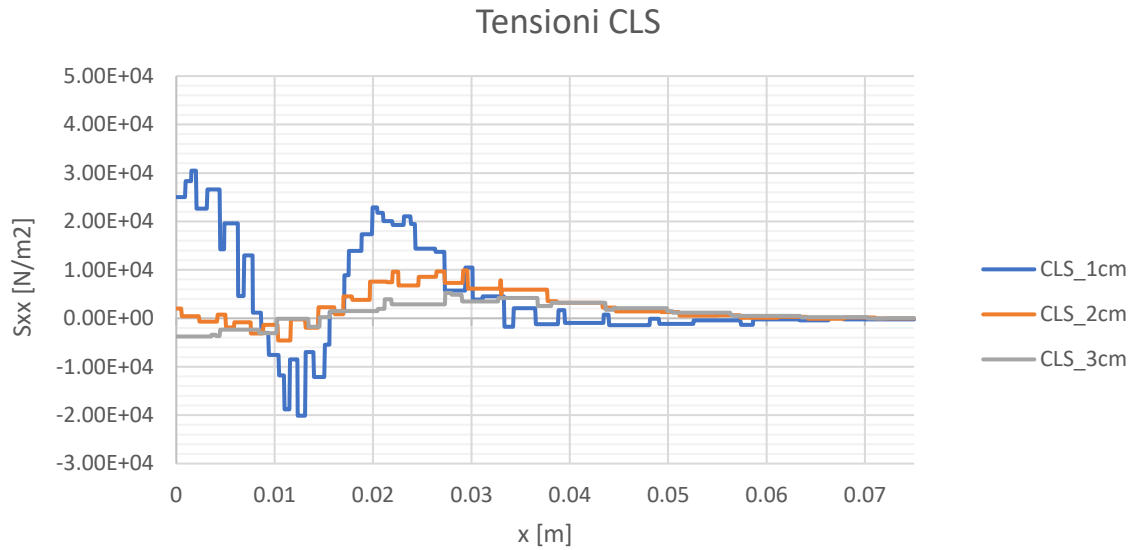


Figura 2.13 S_{xx} CLS

Si nota come all'allontanarsi dal centro del sensore, sia in direzione radiale X, sia in direzione assiale Y, le tensioni radiali all'interno della malta tendono ad uniformarsi a un valore nullo. Tale comportamento è corretto in quanto il cilindro di malta è soggetto a uno stato monoassiale di tensione applicato in direzione Y, quindi la presenza di tensioni radiali è dovuta al solo disturbo del campo tensionale applicato, indotto dalla presenza del sensore. Si sottolinea inoltre che queste tensioni sono inferiori al 3% della tensione applicata in direzione Y.

2.6.1.3 Tensioni circonferenziali σ_{zz}

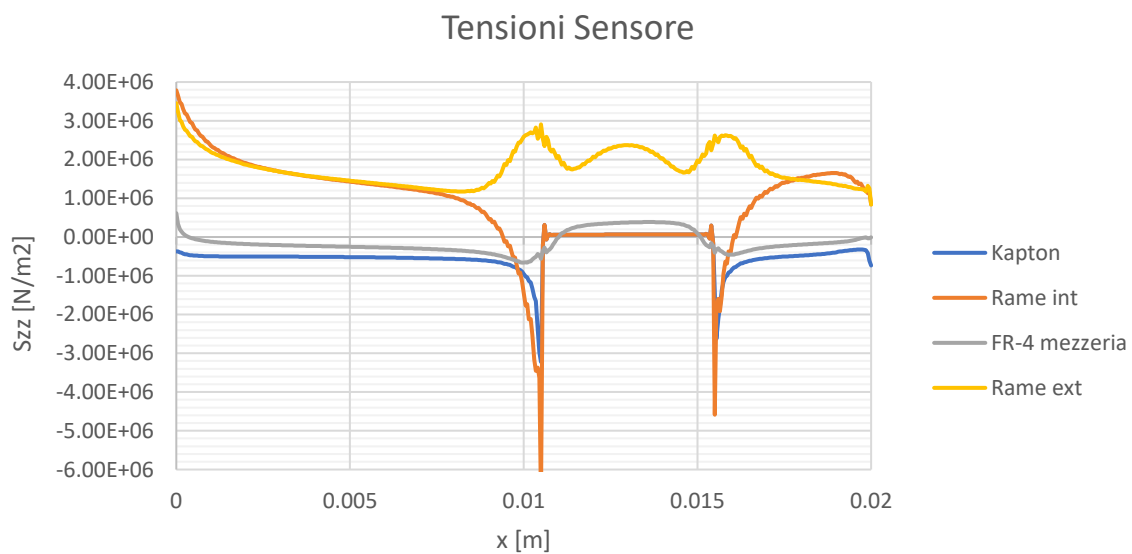
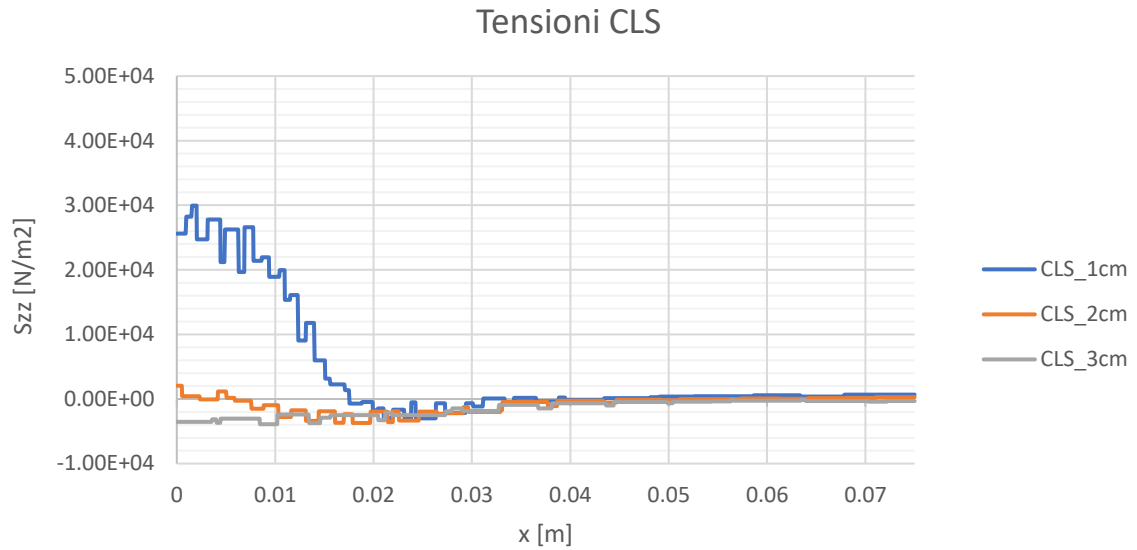


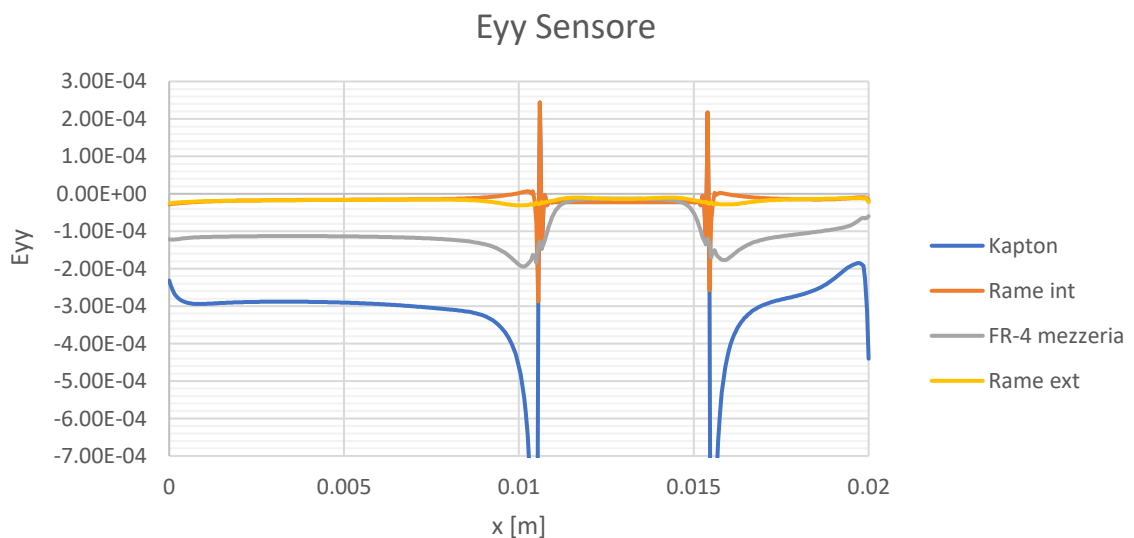
Figura 2.14 S_{zz} nel sensore

Figura 2.15 S_{zz} CLS

Si nota come all'allontanarsi dal centro del sensore, sia in direzione radiale X , sia in direzione assiale Y , le tensioni all'interno della malta tendono ad uniformarsi a un valore nullo, come osservato per le tensioni radiali S_{xx} . Questo comportamento è corretto in quanto il cilindro di malta è soggetto a uno stato monoassiale di tensione applicato in direzione Y , quindi la presenza di tensioni circonferenziali è dovuta al solo disturbo del campo tensionale applicato, indotto dalla presenza del sensore.

Come già osservato per le tensioni radiali, le tensioni circonferenziali sono inferiori al 3% delle tensioni assiali applicate.

2.6.1.4 Deformazioni assiali ϵ_{yy}

Figura 2.16 E_{yy} sensore

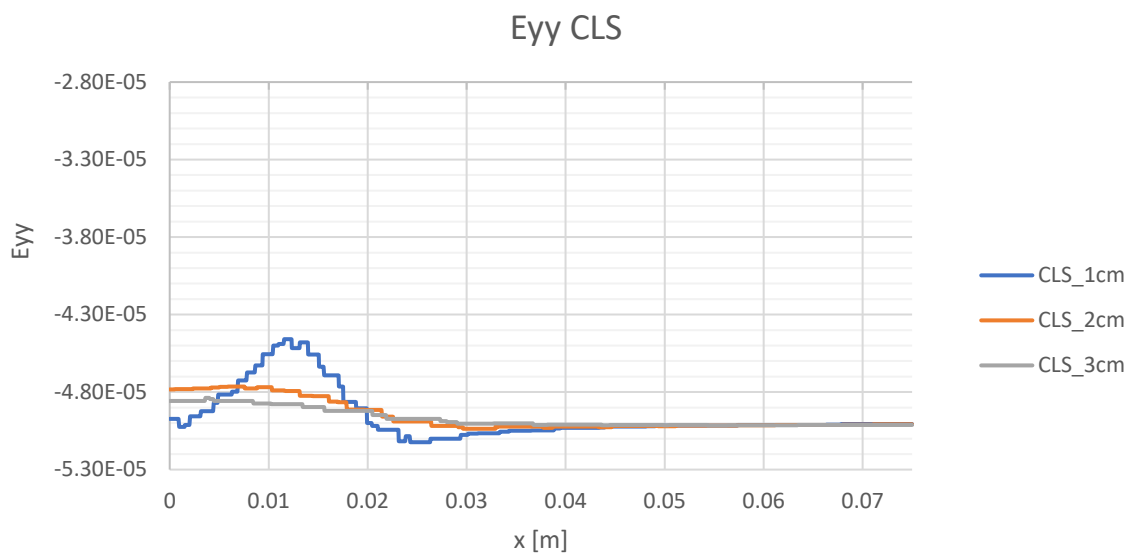


Figura 2.17 Eyy CLS

2.6.1.5 Deformazioni radiali ϵ_{xx}

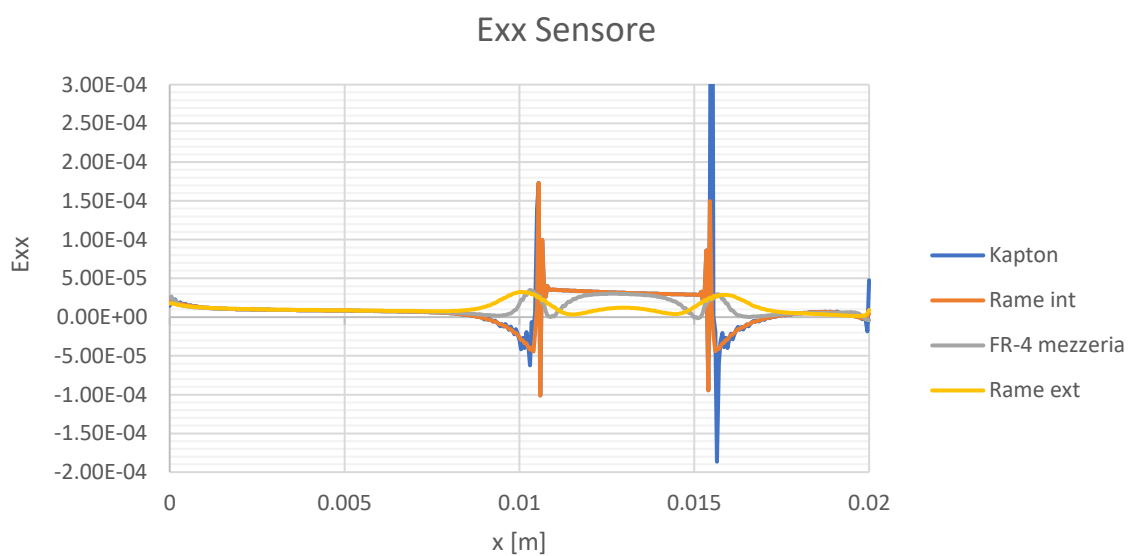


Figura 2.18 Riepilogo deformazioni radiali Exx sensore

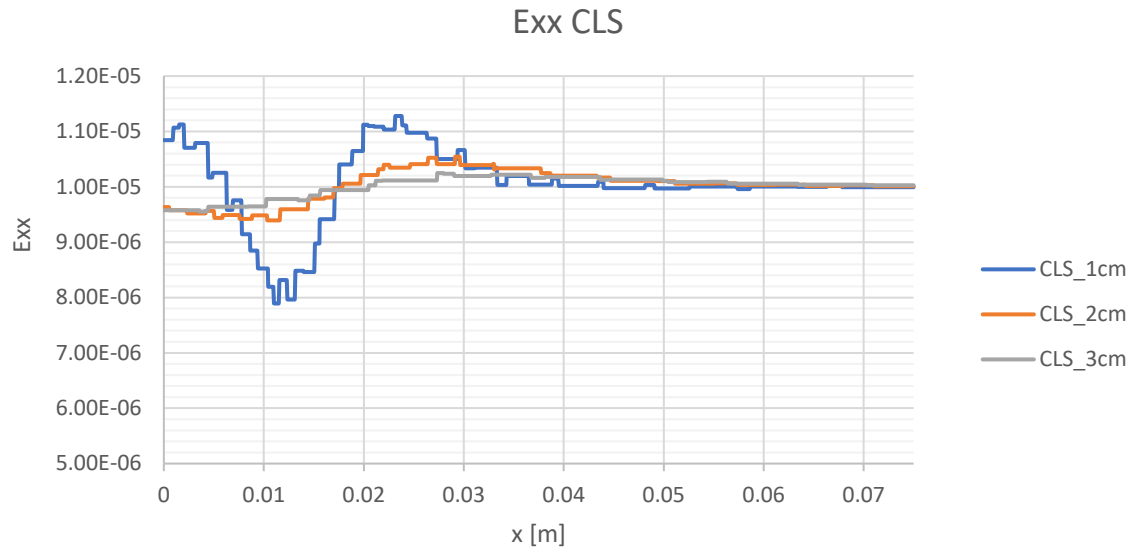


Figura 2.19 Exx CLS

2.6.1.6 Deformazioni circonferenziali ϵ_{zz}

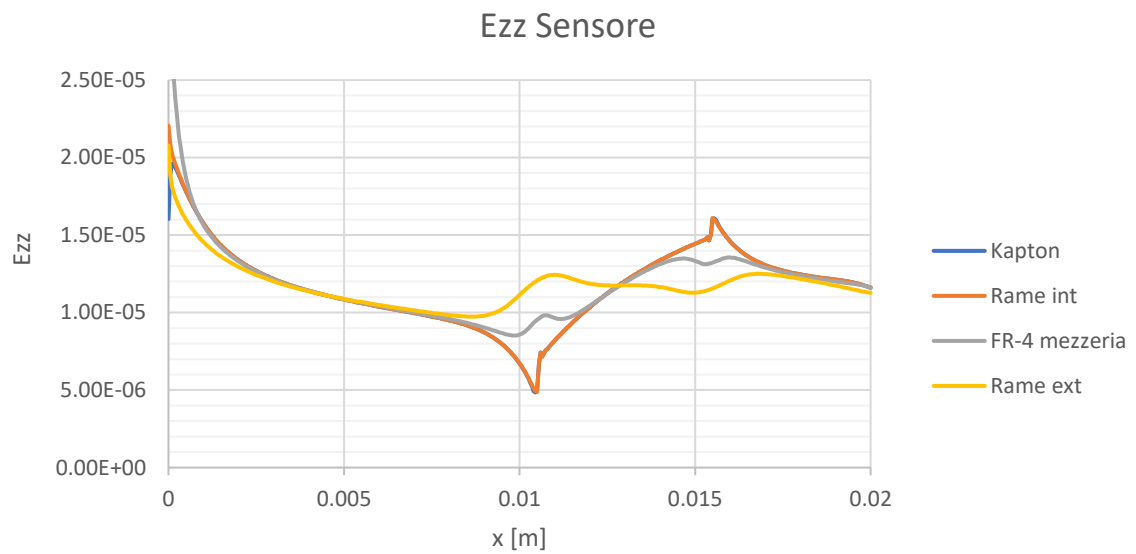


Figura 2.20 Ezz sensore

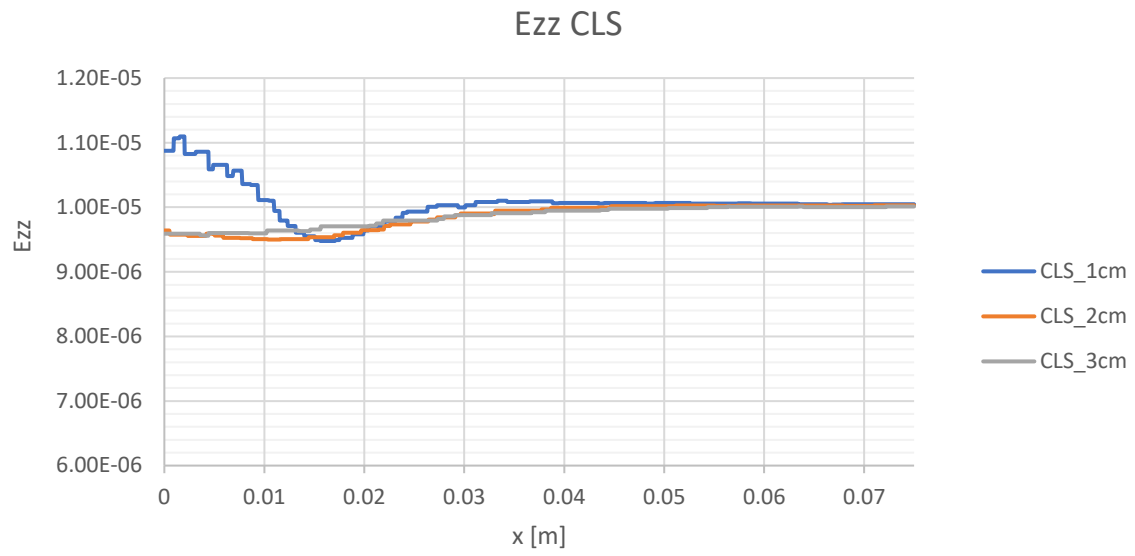


Figura 2.21 Ezz CLS

2.6.2 Malta con $E = 30 \text{ GPa}$

2.6.2.1 Tensioni assiali σ_{yy}

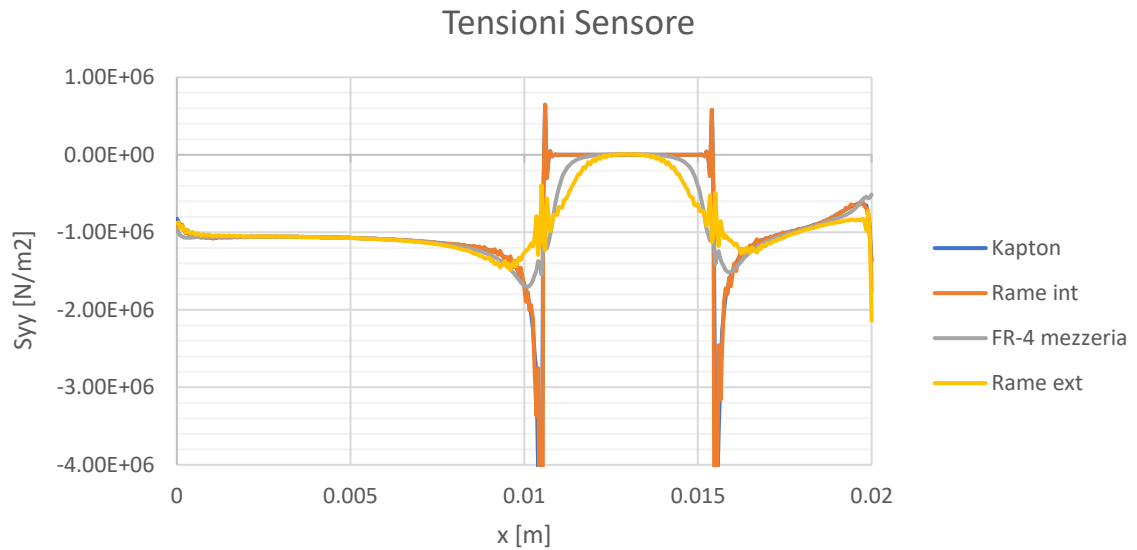


Figura 2.22 S_{yy} sensore

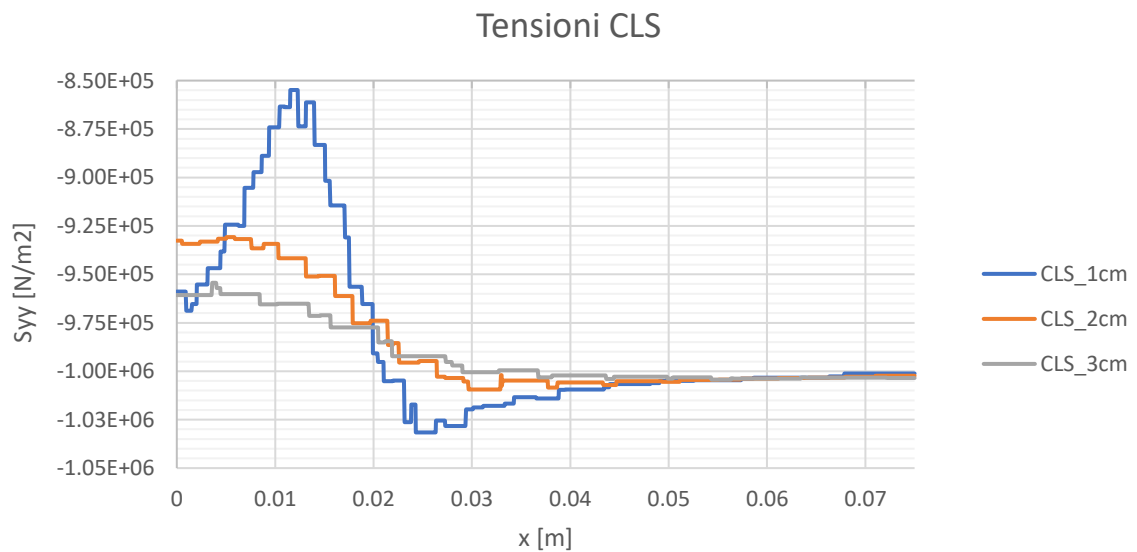


Figura 2.23 S_{yy} CLS

Sono state analizzate le tensioni in corrispondenza della malta cementizia alle distanze di 1, 2 e 3 cm dal sensore in direzione assiale Y.

2.6.2.2 Confronto tensioni assiali σ_{yy}

Si riportano in Figura 2.24 e Figura 2.25 dei grafici di confronto tra il modello con malta con modulo $E = 20$ GPa e il modello con malta con modulo $E = 30$ GPa.

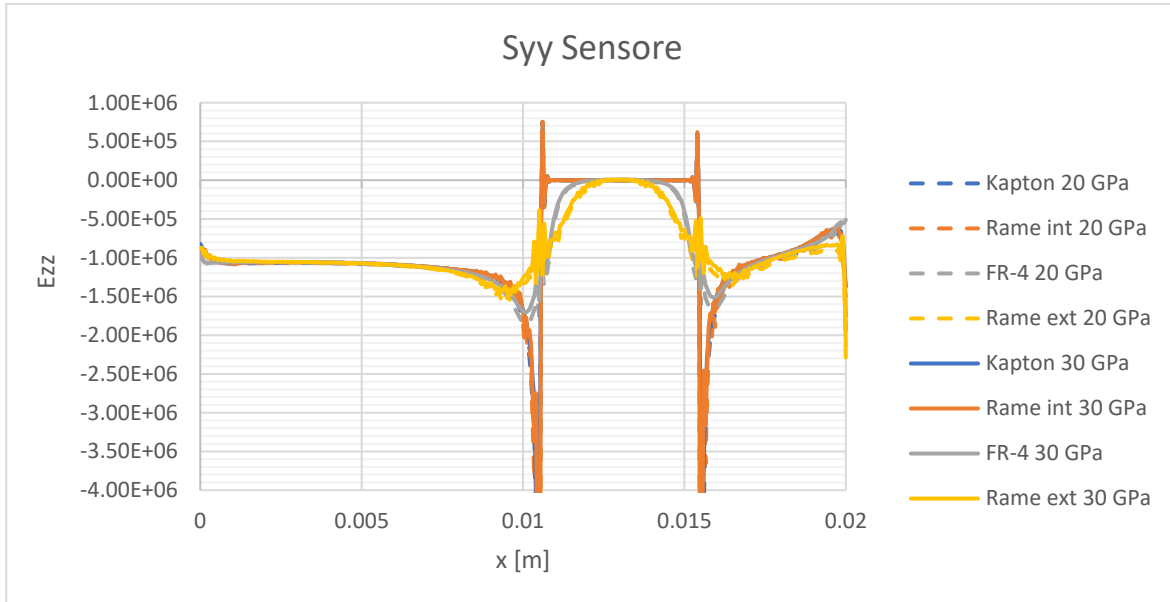


Figura 2.24 Confronto tensioni assiali nel sensore

In direzione assiale la maggiore rigidezza della malta non comporta delle differenze significative di tensioni sui materiali costituenti il sensore.

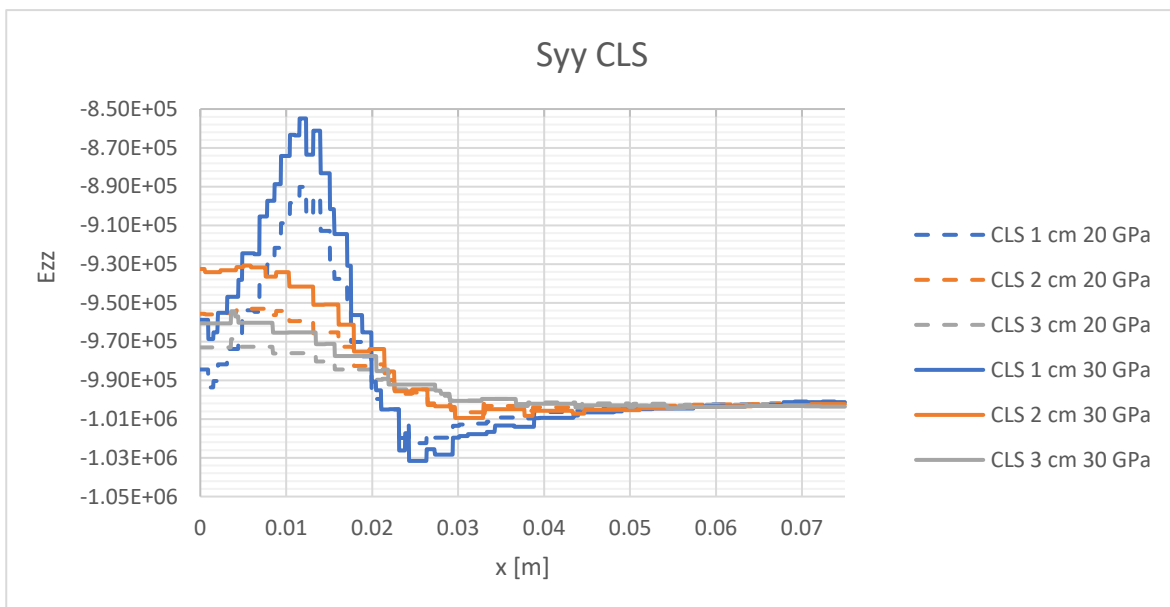


Figura 2.25 Confronto tensioni assiali CLS

A distanza di 1, 2 e 3 cm la malta con $E = 20$ GPa risulta leggermente più compressa, ma la differenza è poco significativa e si annulla allontanandosi dalla zona in cui il campo di tensioni è disturbato dalla presenza del sensore.

2.6.2.3 Tensioni radiali σ_{xx}

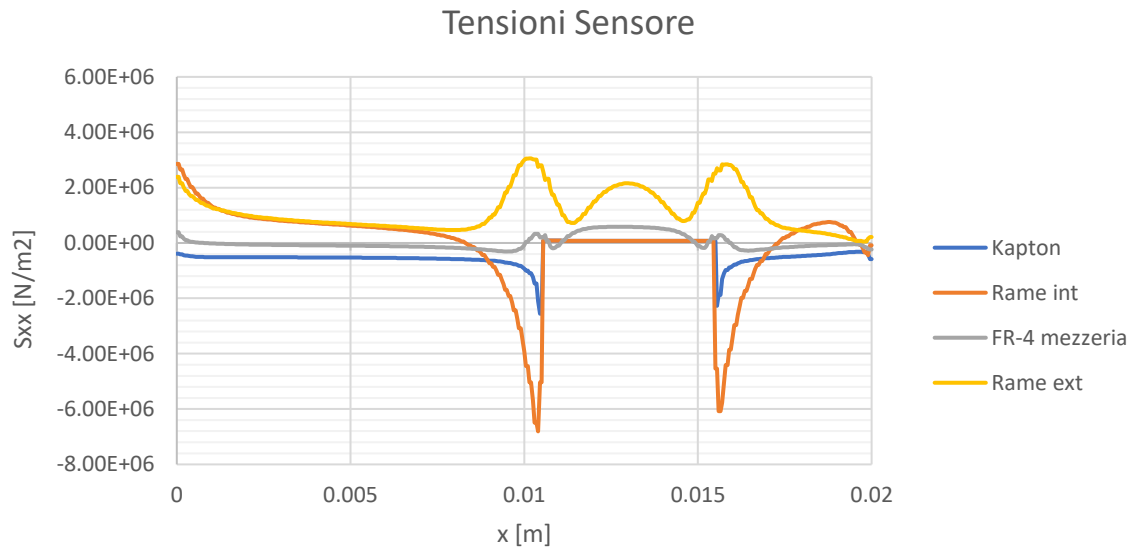


Figura 2.26 S_{xx} sensore

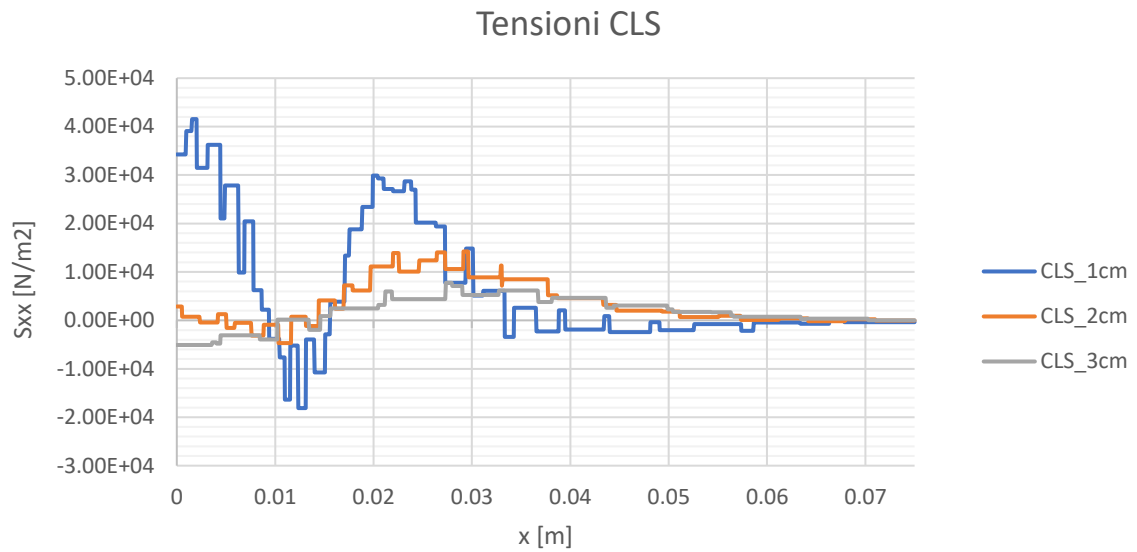


Figura 2.27 S_{xx} CLS

2.6.2.4 Confronto tensioni radiali σ_{xx}

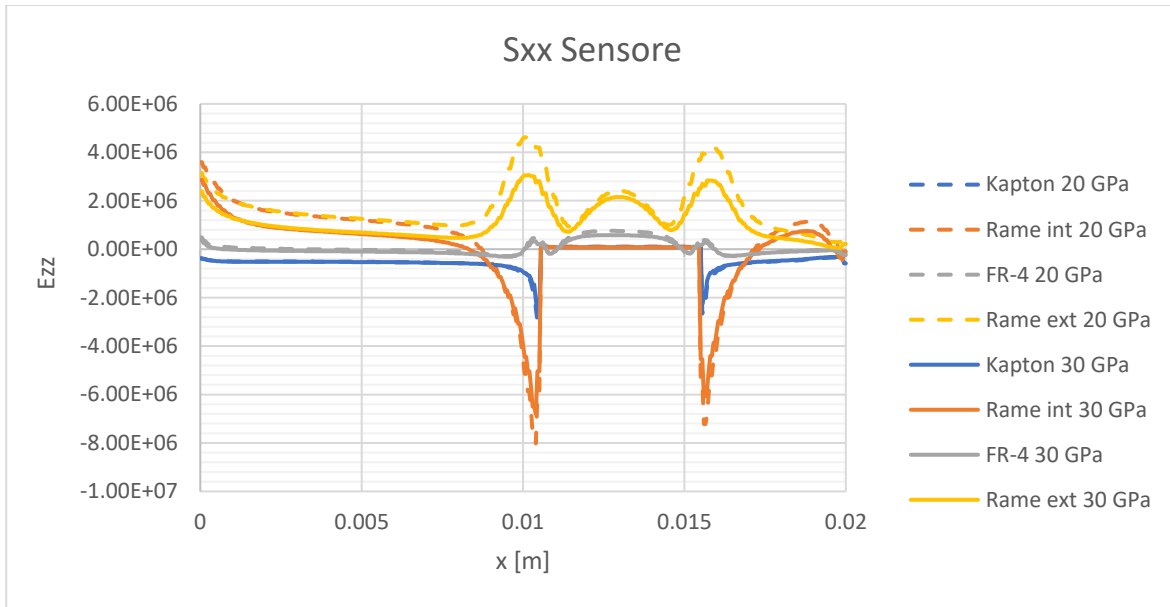


Figura 2.28 Confronto tensioni radiali nel sensore

In direzione radiale, nel modello con la malta più rigida ($E = 30$ GPa), si registrano delle differenze di tensioni solo nel rame, esterno e interno, che risultano più sollecitati. Per gli altri materiali non si osservano delle differenze di tensioni degne di nota.

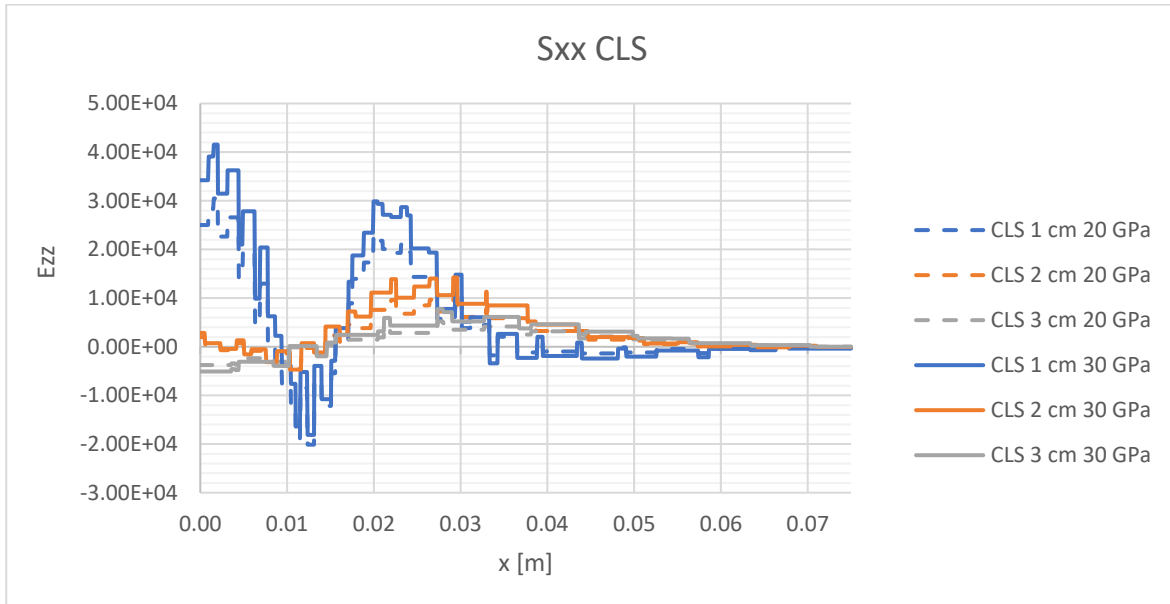


Figura 2.29 Confronto tensioni radiali CLS

In direzione radiale, ad 1 cm dal sensore la malta con $E = 30$ GPa risulta essere leggermente più tesa. A 2 e 3 cm la differenza di tensioni si riduce, così come si riduce allontanandosi dalla zona di influenza del sensore.

2.6.2.5 Tensioni circonferenziali σ_{zz}

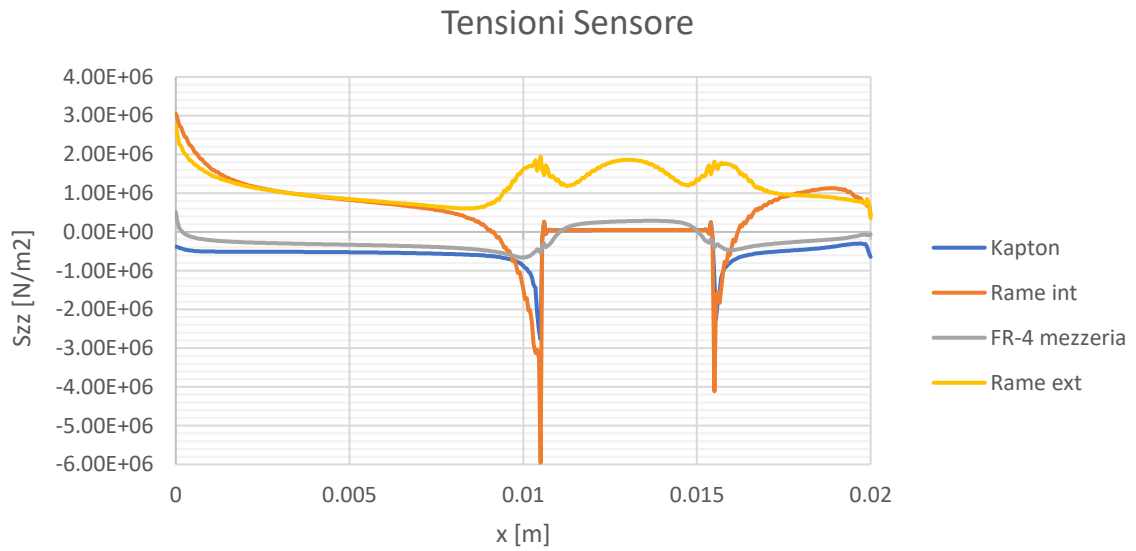


Figura 2.30 S_{zz} sensore

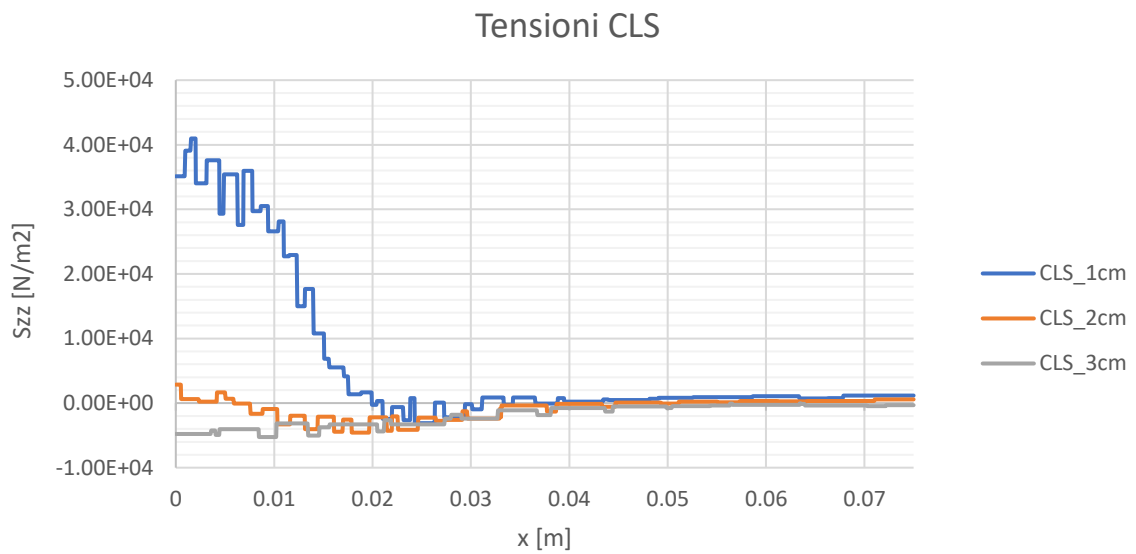


Figura 2.31 S_{zz} CLS

Si nota come all'allontanarsi dal sensore, sia in direzione radiale X, sia in direzione circonferenziale Z, le tensioni all'interno del calcestruzzo tendono ad uniformarsi a un valore nullo.

2.6.2.6 Confronto tensioni circonferenziali σ_{zz}

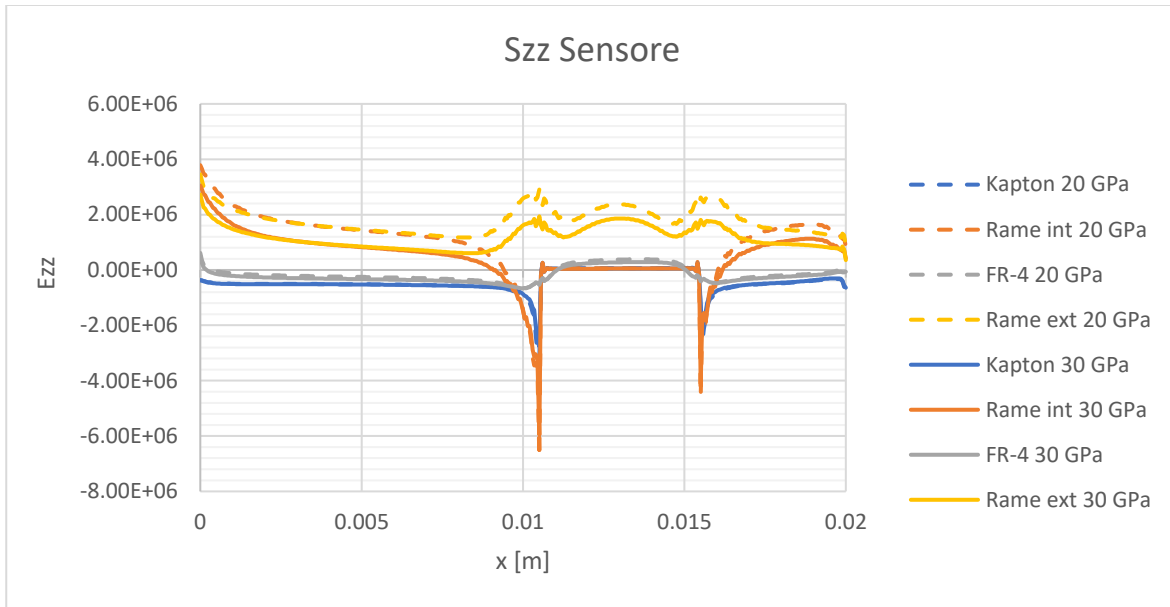


Figura 2.32 Confronto tensioni circonferenziali nel sensore

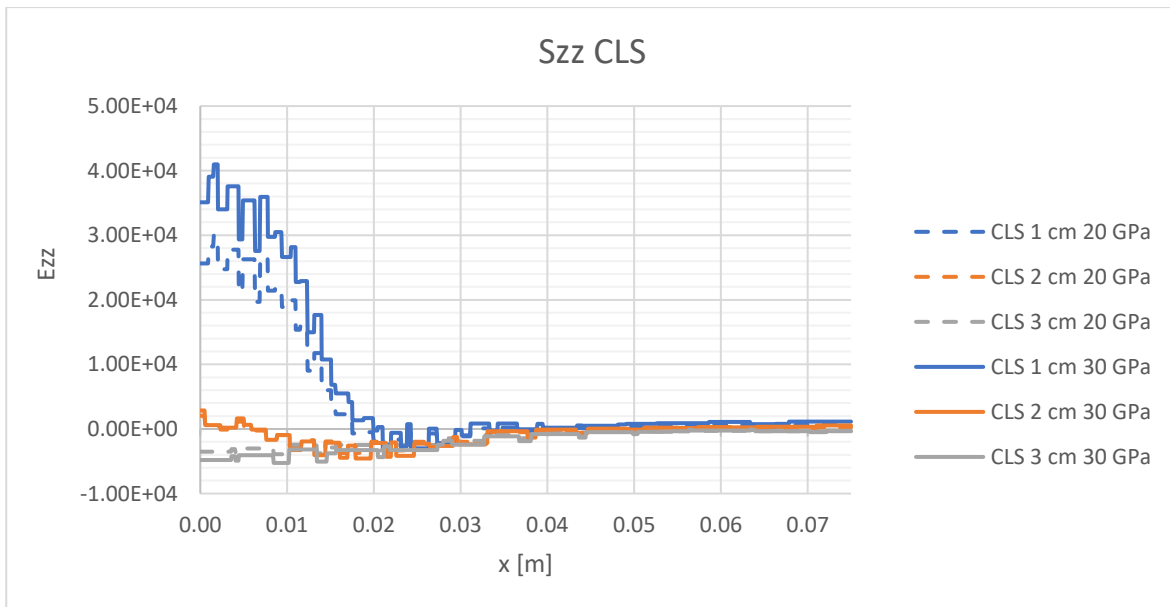


Figura 2.33 Confronto tensioni circonferenziali CLS

Il comportamento in direzione circonferenziale è analogo a quello visto in direzione radiale, e valgono le stesse considerazioni.

2.6.2.7 Deformazioni assiali ϵ_{yy}

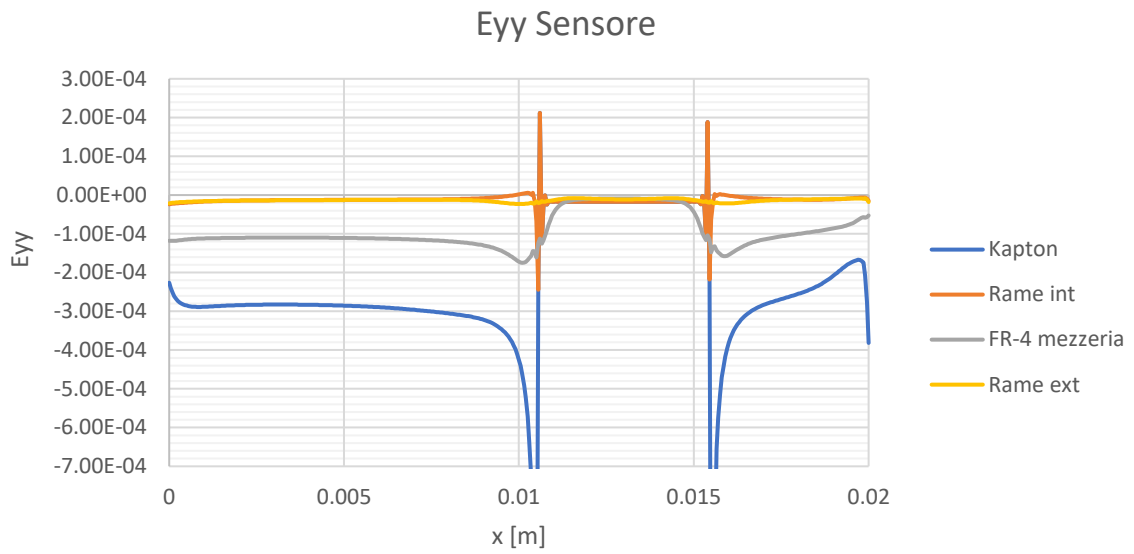


Figura 2.34 Eyy sensore

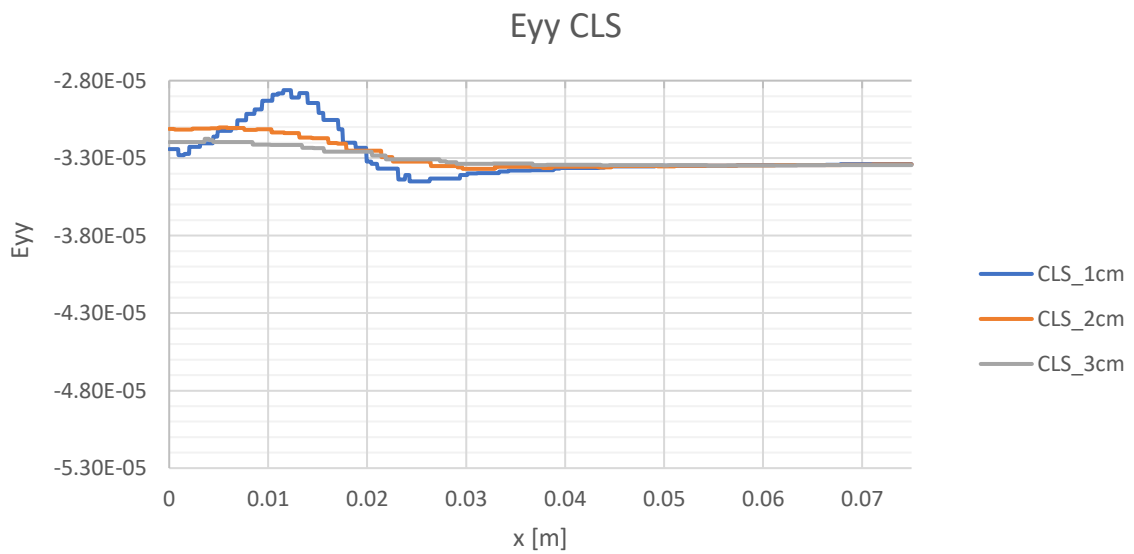


Figura 2.35 Eyy CLS

2.6.2.8 Confronto deformazioni assiali ϵ_{yy}

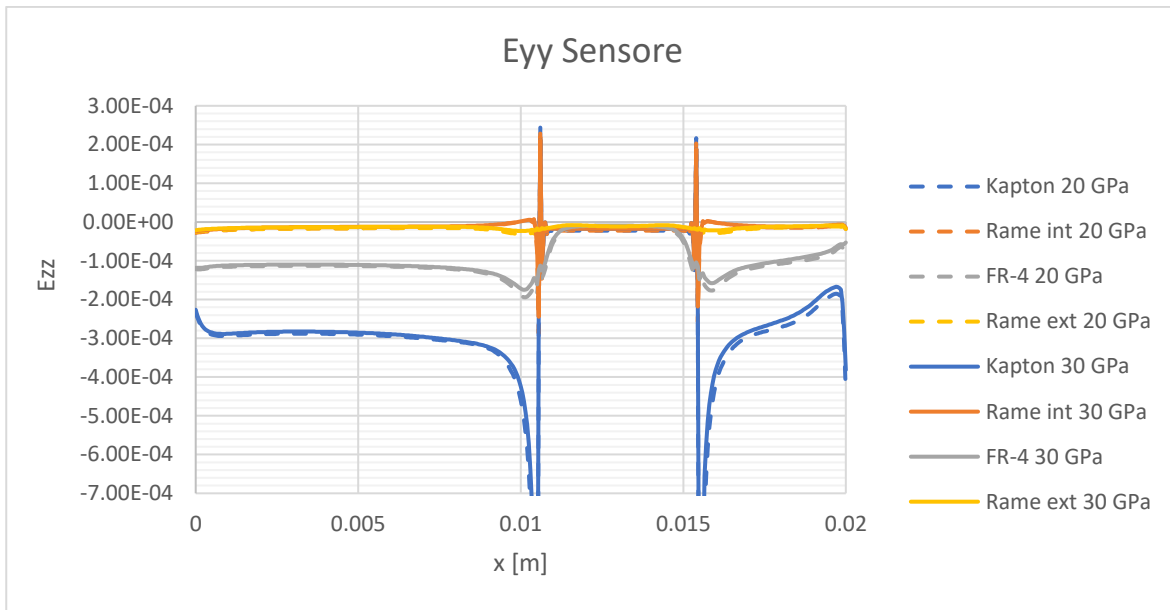


Figura 2.36 Confronto deformazioni assiali nel sensore

In direzione assiale la maggiore rigidità della malta non comporta delle differenze significative di tensioni sui materiali costituenti il sensore, come si nota nel grafico di Figura 2.36.

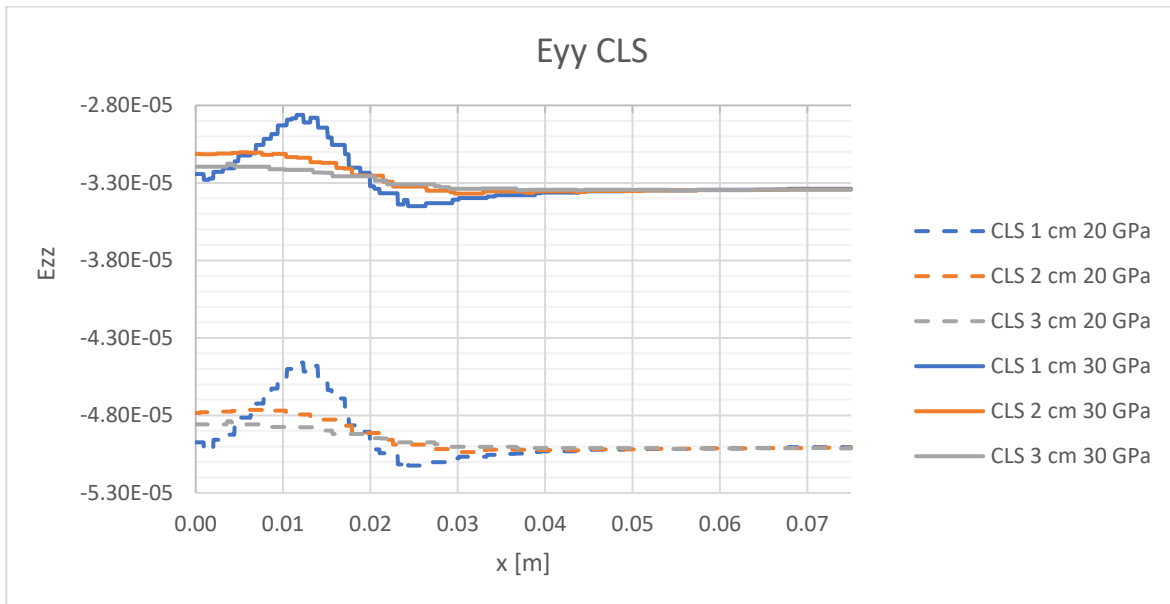


Figura 2.37 Confronto deformazioni assiali CLS

Come era lecito aspettarsi la malta meno rigida subisce delle deformazioni circa 1,5 volte maggiori, rispecchiando il rapporto tra i moduli elastici.

2.6.2.9 Deformazioni radiali ϵ_{xx}

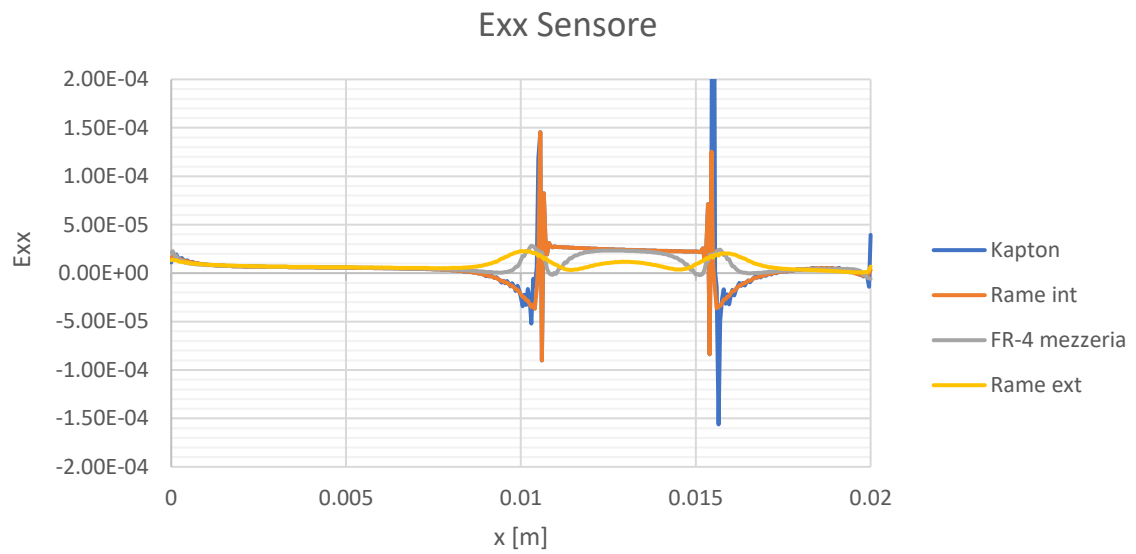


Figura 2.38 Exx sensore

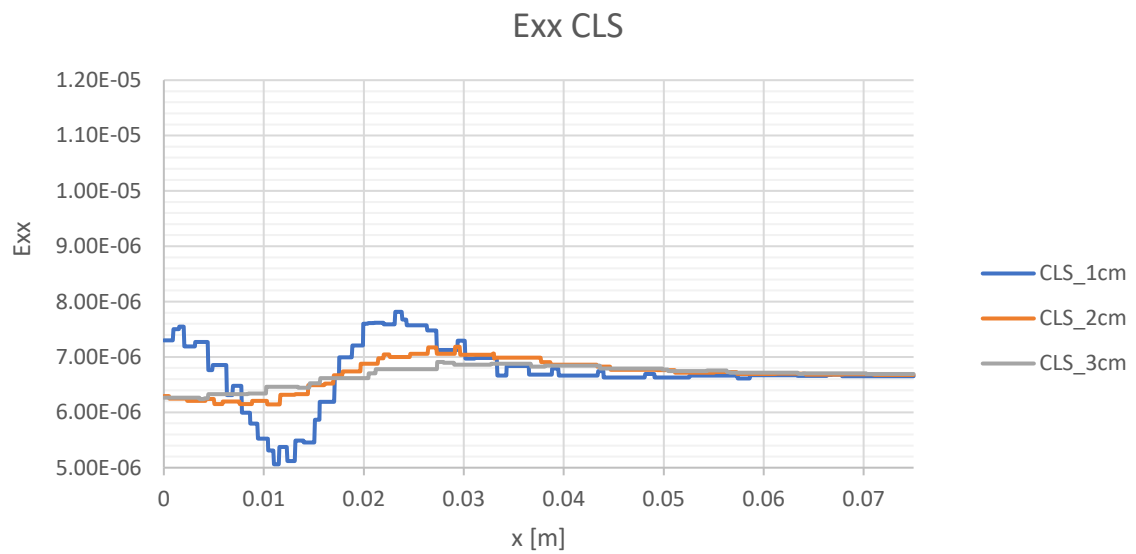


Figura 2.39 Exx CLS

2.6.2.10 Confronto deformazioni radiali ϵ_{xx}

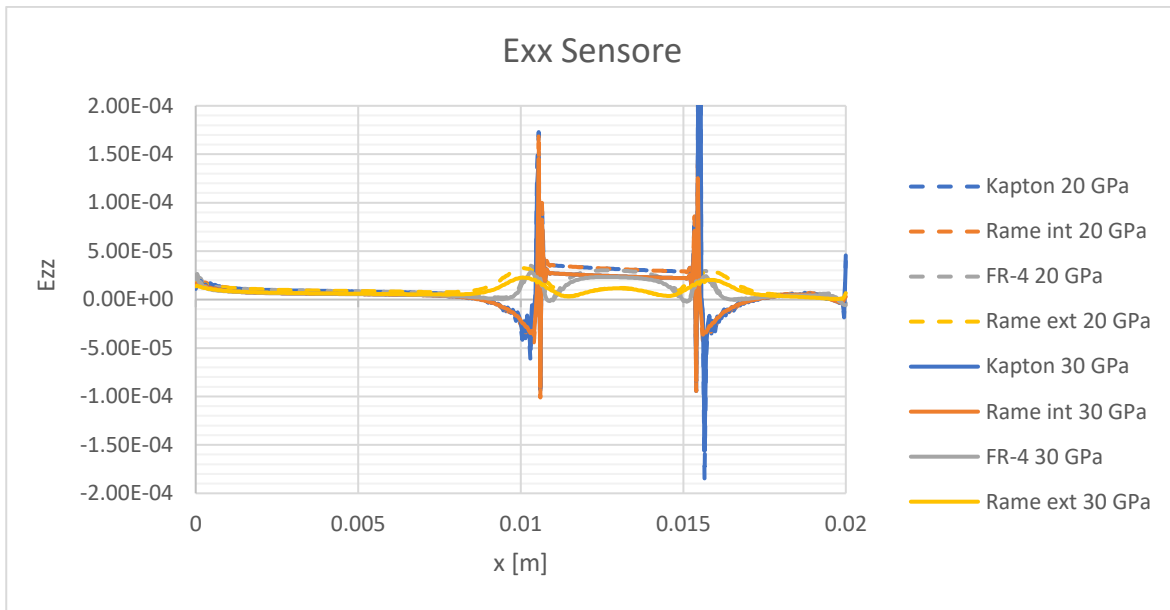


Figura 2.40 Confronto deformazioni radiali nel sensore

In direzione radiale, nei materiali costituenti il sensore, non si osservano delle differenze sostanziali di deformazioni.

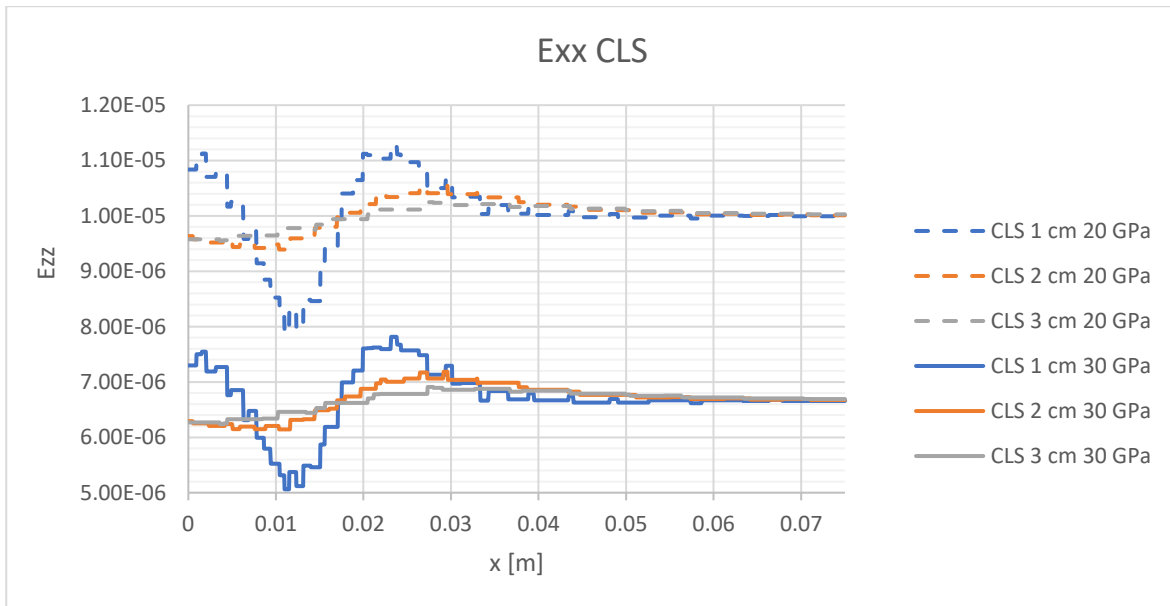
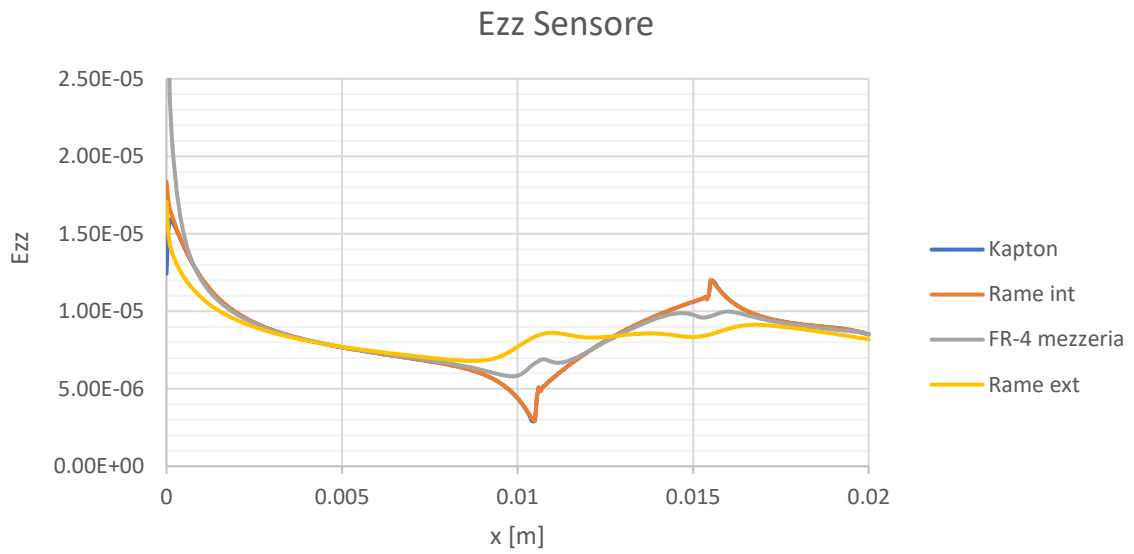
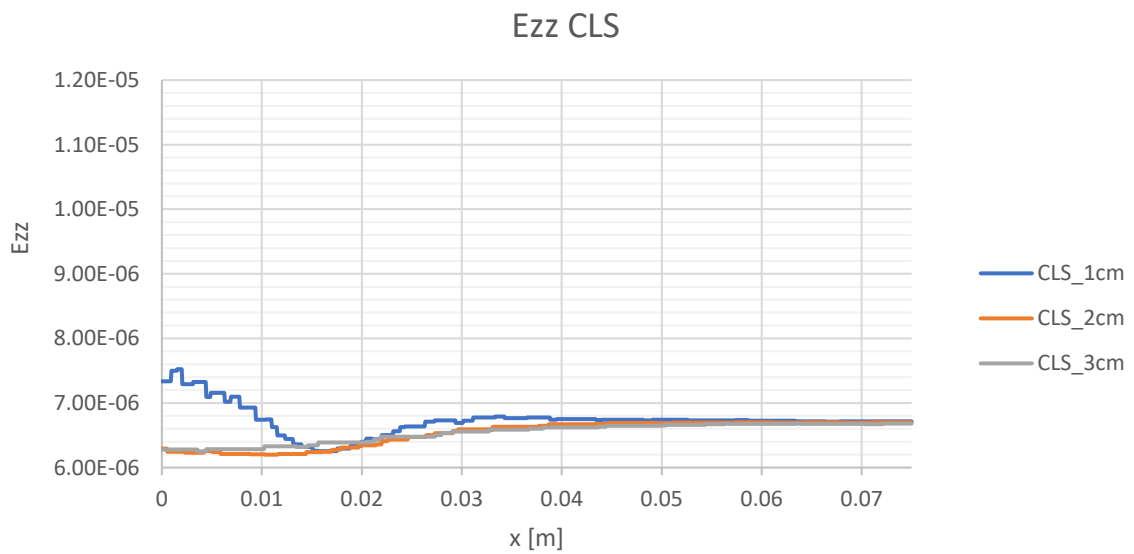


Figura 2.41 Confronto deformazioni radiali CLS

Come per le deformazioni assiali, anche per le deformazioni radiali la malta con $E = 20$ GPa subisce delle deformazioni maggiori a causa della minore rigidità. In questo caso le deformazioni sono però di trazione.

2.6.2.11 Deformazioni circonferenziali ϵ_{zz} *Figura 2.42 Ezz sensore**Figura 2.43 Ezz CLS*

2.6.2.12 Confronto deformazioni circonferenziali ε_{zz}

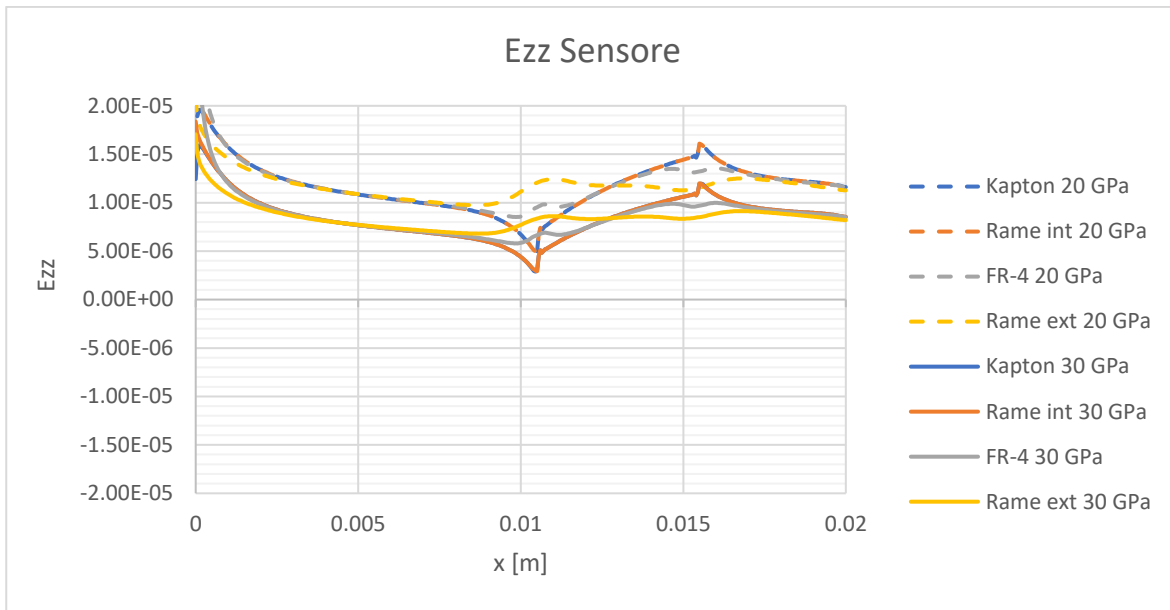


Figura 2.44 Confronto deformazioni circonferenziali nel sensore

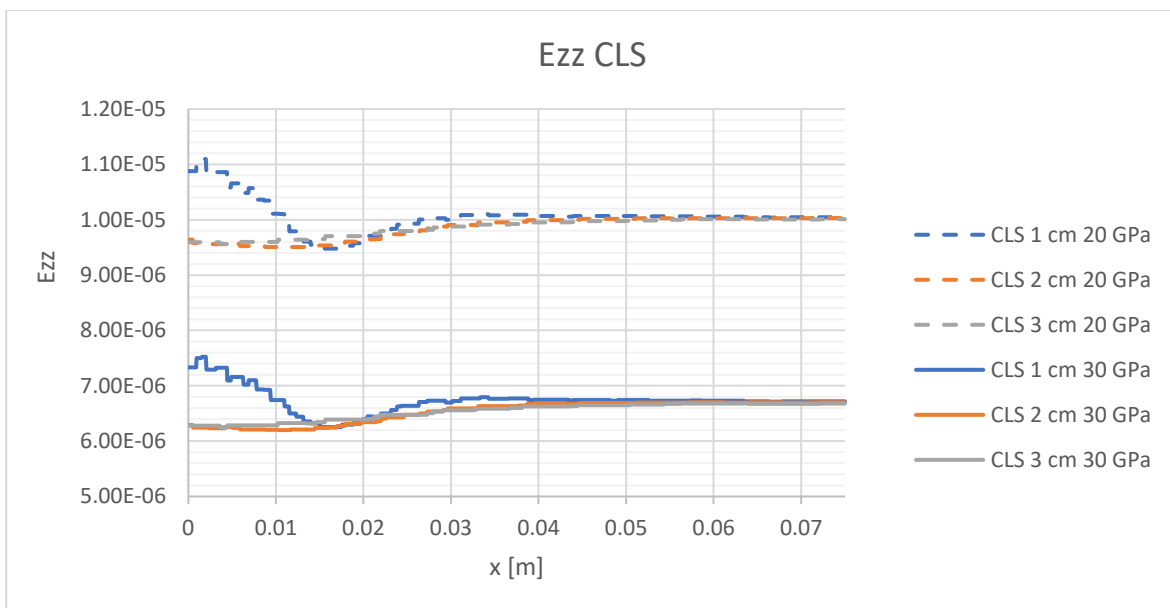


Figura 2.45 Confronto deformazioni circonferenziali CLS

Il comportamento in direzione circonferenziale è analogo a quello visto in direzione radiale, e valgono le stesse considerazioni.

2.6.3 Risultati con malta in grado di fessurare

In termini di tensioni, per tutti i materiali e ogni direzione (assiale, radiale e circonferenziale), non si verificano delle variazioni significative in seguito alla diversa modellazione della malta, alla quale viene conferita la capacità di fessurare. Tuttavia, in alcuni punti si registra una debole fessurazione nella malta e per comprenderne il comportamento è stata presa in considerazione una sezione perpendicolare all'asse di rotazione, passante per la malta, e distante 1 mm dalla faccia superiore del sensore in direzione assiale.

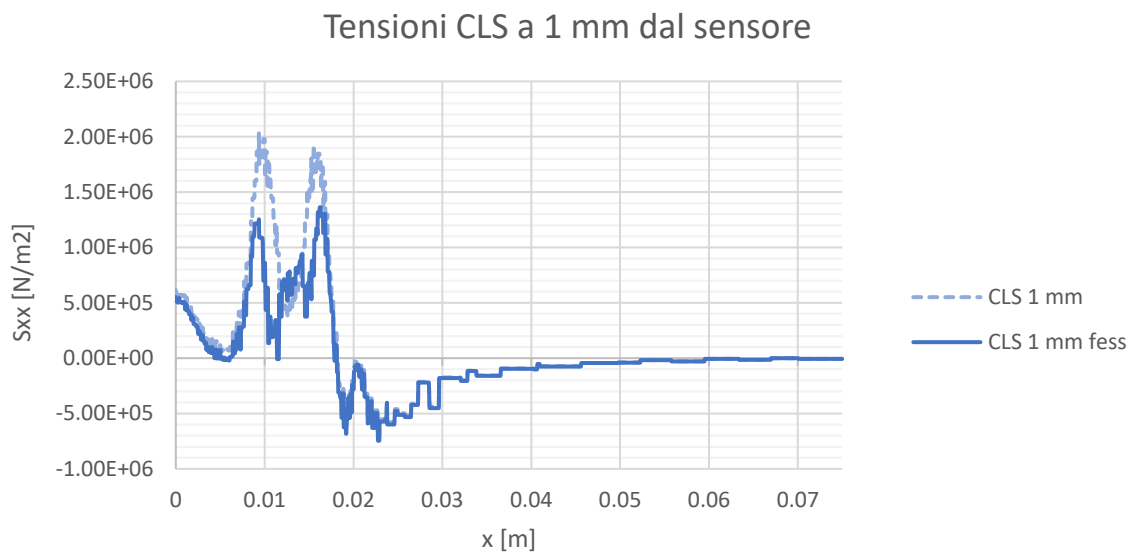


Figura 2.46 S_{xx} CLS a 1 mm dal sensore

Si osserva come la presenza di tensioni radiali è dovuta al solo disturbo del campo tensionale applicato, indotto dalla presenza del sensore.

La variazione di tensioni radiali è presente, tra 9mm e 17mm, a cavallo della zona in cui il rame nella board interna è assente. Tale variazione è dovuta al fatto che la malta risulta fessurata al termine dell'analisi. In particolare, si osservano due picchi di discrepanza tra i grafici, che corrispondono alle zone in cui la fessurazione è più marcata.

La tensione massima in direzione radiale nel modello con malta fessurata risulta pari al 14% della tensione applicata in direzione Y a fronte del 20% del modello con malta elastica.

2.6.3.1 Fessurazione

La fessurazione è riportata in termini di deformazioni ortogonali al piano della fessura $\varepsilon_{k,nn}$: nel modello ogni fessura presenta un sistema di riferimento locale $n - t$, dove n è la direzione normale alla fessura e t la direzione tangenziale, come mostrato in Figura 2.47:

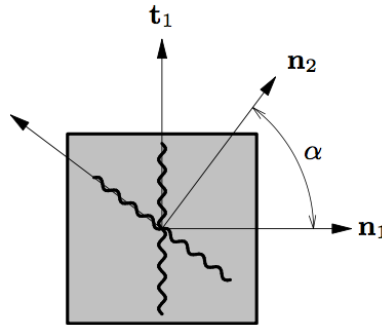


Figura 2.47 Sistema di riferimento per le generiche fessure 1 e 2

In questo modo è possibile riportare le deformazioni sia in direzione normale n che in direzione tangenziale t rispetto alla fessura.

Per analizzare l'eventuale fessurazione e l'entità delle fessure è stata eseguita una analisi con 10 step di carico di 1 MPa fino ad arrivare al carico complessivo di 10 MPa applicato sulle facce circolari del provino di malta.

Si nota che fino allo step 3, a cui corrisponde dunque un carico assiale di 3 MPa non si verifica alcuna fessurazione.

Con una pressione di 4 MPa è possibile osservare l'inizio della fase fessurativa in corrispondenza della discontinuità dovuta all'assenza del Rame a contatto con il kapton a 10.5 mm dall'asse di rotazione Y:

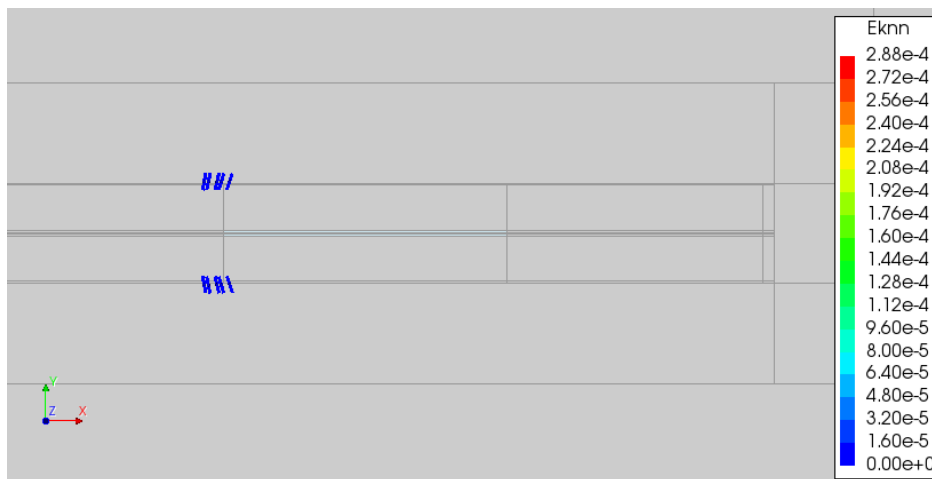


Figura 2.48 Stato fessurativo a 4 MPa

Con 5 MPa possiamo apprezzare la nascita fessure anche a distanza di 15.5 mm dall'asse di rotazione.

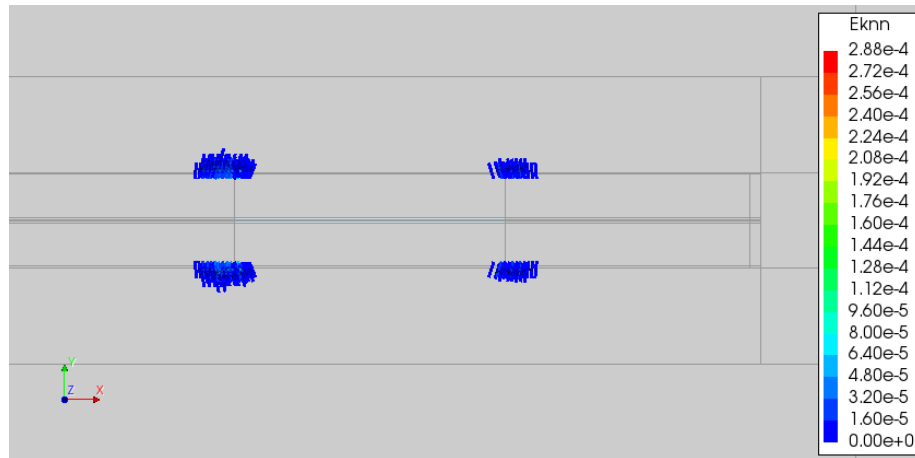


Figura 2.49 Stato fessurativo a 5 MPa

A 6 MPa nascono delle fessure anche all'estremità esterna del sensore, a circa 20 mm dall'asse di rotazione Y.

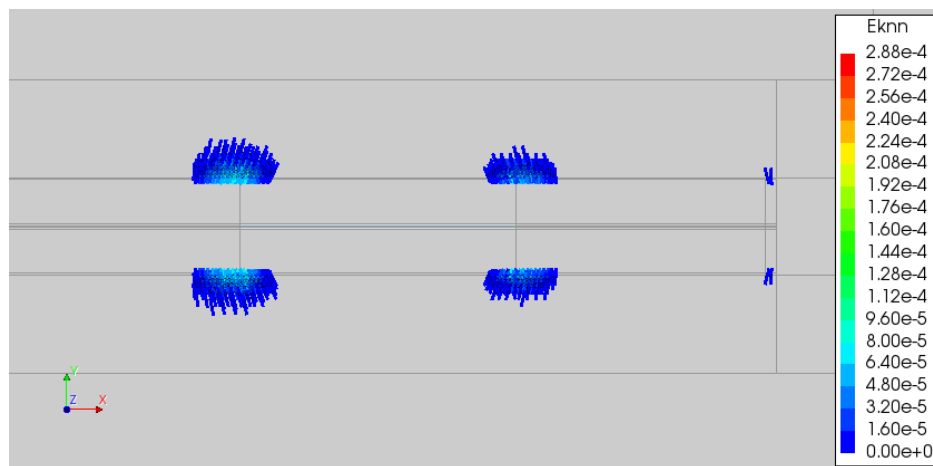


Figura 2.50 Stato fessurativo a 6 MPa

Si osserva poi l'aumentare delle deformazioni di fessurazione fino alle deformazioni riportate in Figura 2.51 che sono quelle corrispondenti all'ultimo step di carico, in cui il carico complessivo risulta pari a 10 MPa.

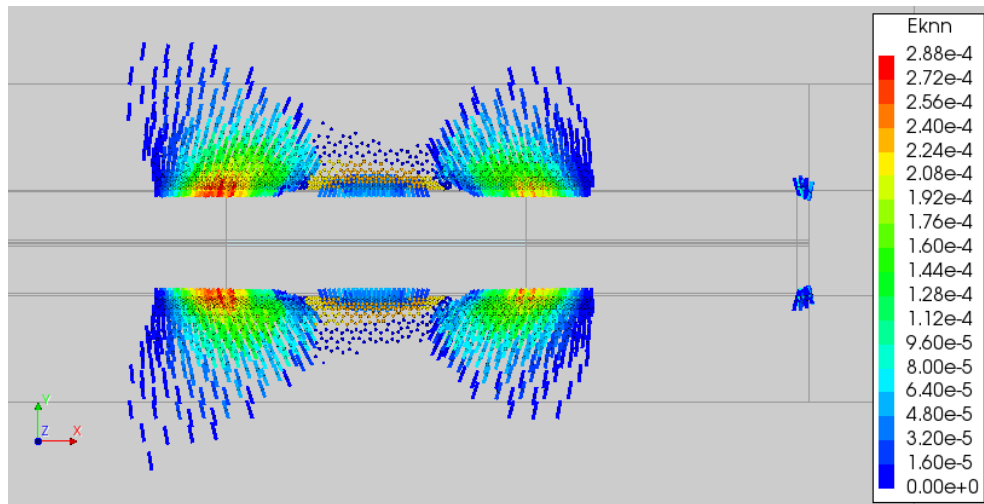


Figura 2.51 Stato fessurativo a 10 MPa

Con un carico applicato di 10 MPa la fessurazione si manifesta con una deformazione normale al piano delle fessure $\varepsilon_{k,nn}$ massima pari a circa $2.88e-4$.

Considerando la zona fessurata, le deformazioni di fessurazione medie si attestano su $1e-4$, per le quali corrisponde un'apertura delle fessure trascurabile.

2.6.4 Effetto della viscoelasticità della malta

Da questo punto in poi si indicherà con tempo 0 il tempo corrispondente al momento dell'applicazione del carico, 7 giorni dopo il getto. Si indicherà con tempo infinito un tempo di 4 anni, al quale il calcestruzzo avrà sviluppato completamente i fenomeni viscosi.

2.6.4.1 Deformazione assiale ϵ_{yy} nel kapton

La deformazione assiale, in direzione y, nel kapton risulta di fondamentale importanza perché è quella che determina la variazione di capacità del sensore. È stato quindi analizzato l'effetto che il creep del calcestruzzo ha su tale deformazione, e quindi la sua evoluzione nel tempo, che viene riportata nei grafici in Figura 2.52 e Figura 2.53:

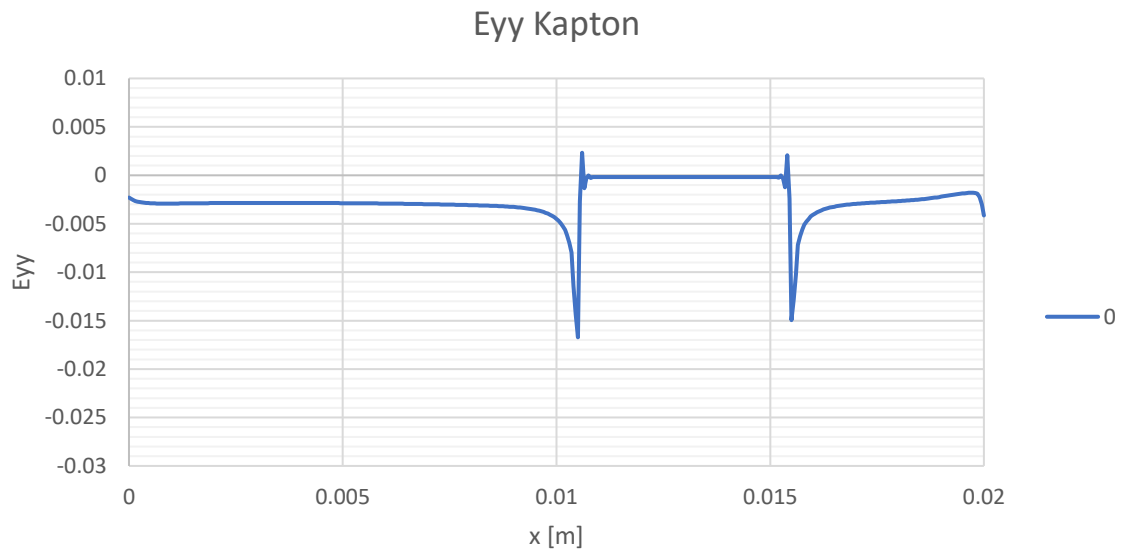


Figura 2.52 Eyy kapton al tempo 0

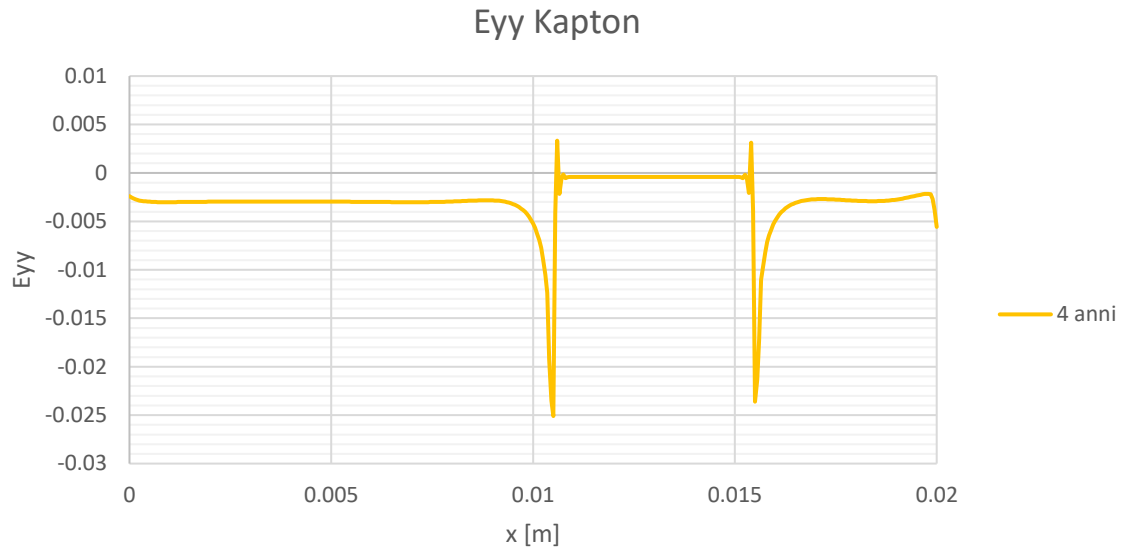


Figura 2.53 Eyy kapton a viscosità completamente sviluppata

Si evince dai grafici che nelle zone di discontinuità i picchi dovuti ad effetti di bordo aumentano progressivamente nel tempo. Tuttavia, nelle altre zone le deformazioni assiali non subiscono variazioni significative.

2.6.4.2 Tensioni nella malta a distanza di 0.5 cm dal sensore

Allo stesso modo delle deformazioni nel kapton è stata analizzata l'evoluzione delle tensioni assiali a causa del creep, in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione posta nella malta a 0.5 cm dal sensore come mostrato in Figura 2.54:

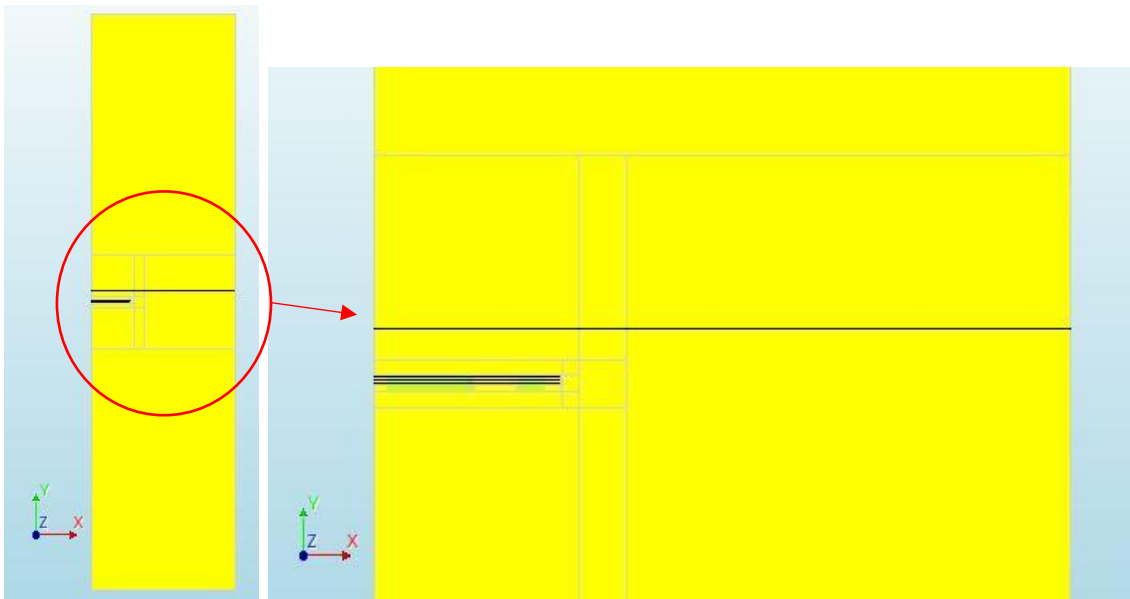


Figura 2.54 Posizione malta posta a 0.5 cm dal sensore in direzione assiale Y

Le tensioni assiali σ_{yy} sono riportate in Figura 2.55:

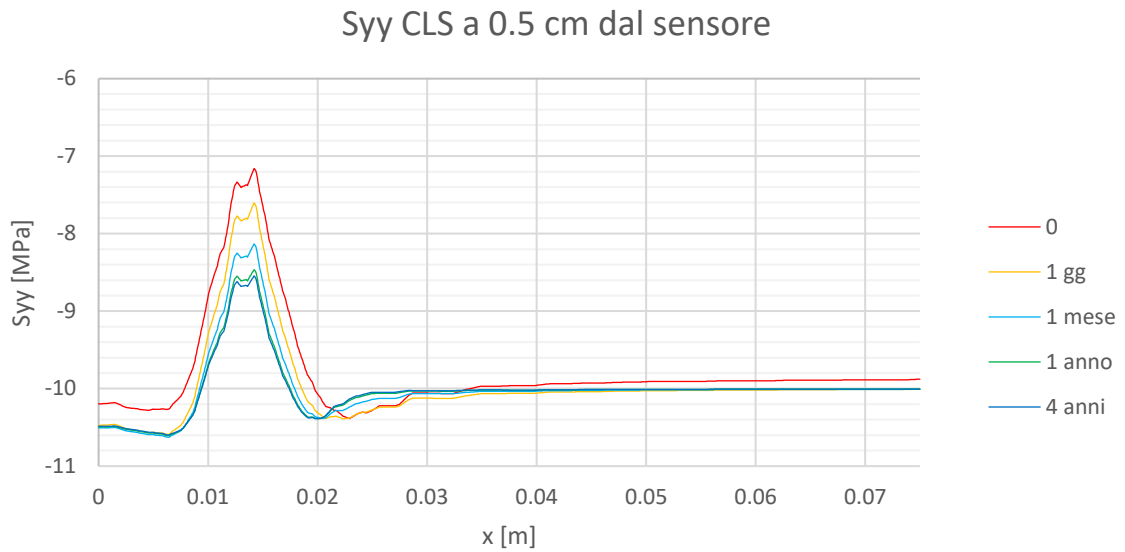


Figura 2.55 Syy CLS a 0.5 cm dal sensore al tempo: 0, 1gg, 1 mese, 1 anno, 4 anni

Come ci si può aspettare le variazioni maggiori di tensioni si registrano nelle ore e nei giorni successivi all'applicazione del carico, invece da 1 anno in poi le variazioni di tensione risultano significativamente ridotte.

Nella stessa maniera è stata analizzata l'evoluzione nel tempo delle tensioni in direzione radiale X della malta posta a distanza di 0.5 cm dal sensore in direzione assiale e riportata in Figura 2.56.

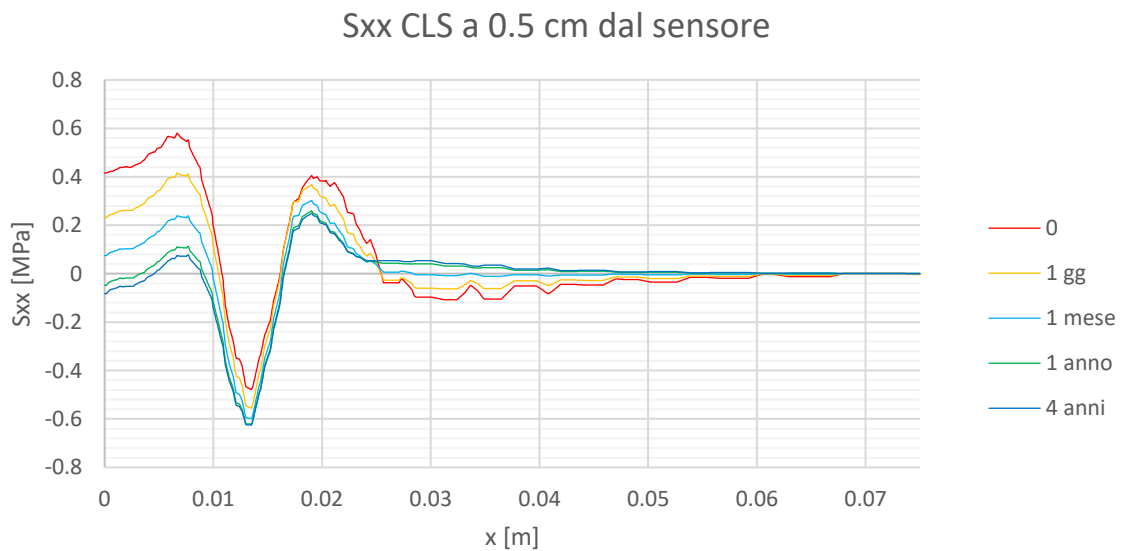


Figura 2.56 Sxx CLS a 0.5 cm dal sensore al tempo: 0, 1gg, 1 mese, 1 anno, 4 anni

2.6.4.3 Deformazioni nella malta a distanza di 0.5 cm dal sensore

Per la malta è stata analizzata anche l'evoluzione nel tempo della deformazione radiale ϵ_{xx} .

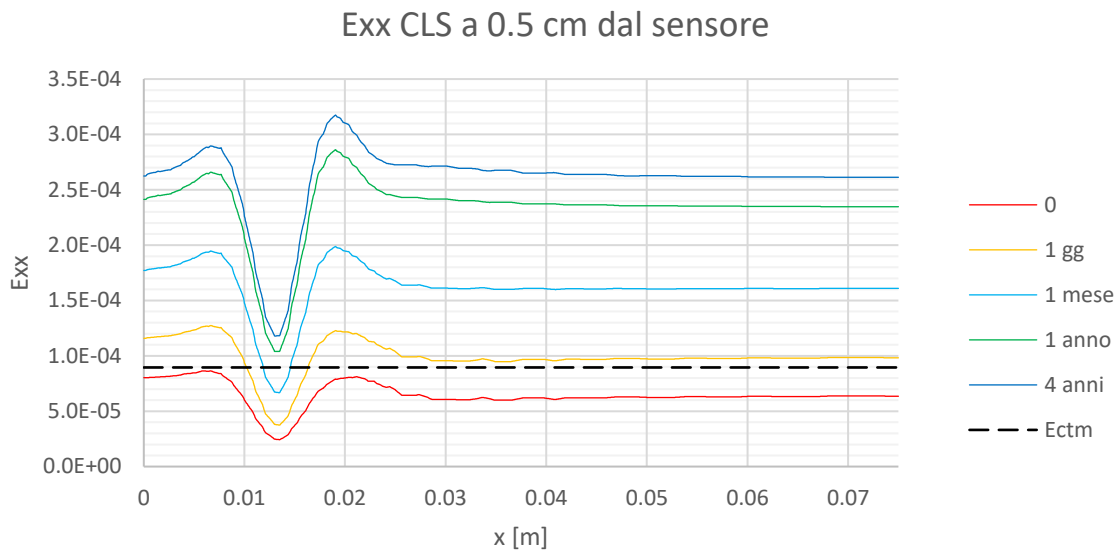


Figura 2.57 Exx CLS a 0.5 cm dal sensore al tempo: 0, 1 gg, 1 mese, 1 anno, 4 anni

Nel grafico di figura XX è stata riportata anche la deformazione di fessurazione $\epsilon_{ctm} = f_{ctm} / E_c$ (E_{ctm} nella legenda del grafico) per poter fornire un termine di raffronto alle deformazioni ottenute dalla simulazione. Si sottolinea che essendo in presenza di viscosità si possono raggiungere deformazioni superiori a ϵ_{ctm} anche in assenza di fessurazione.

2.6.4.4 Evoluzione fessurazione nel tempo

Appena dopo l'applicazione della pressione di 10 MPa, quindi al tempo 0, si ha uno stato fessurativo mostrato in Figura 2.58

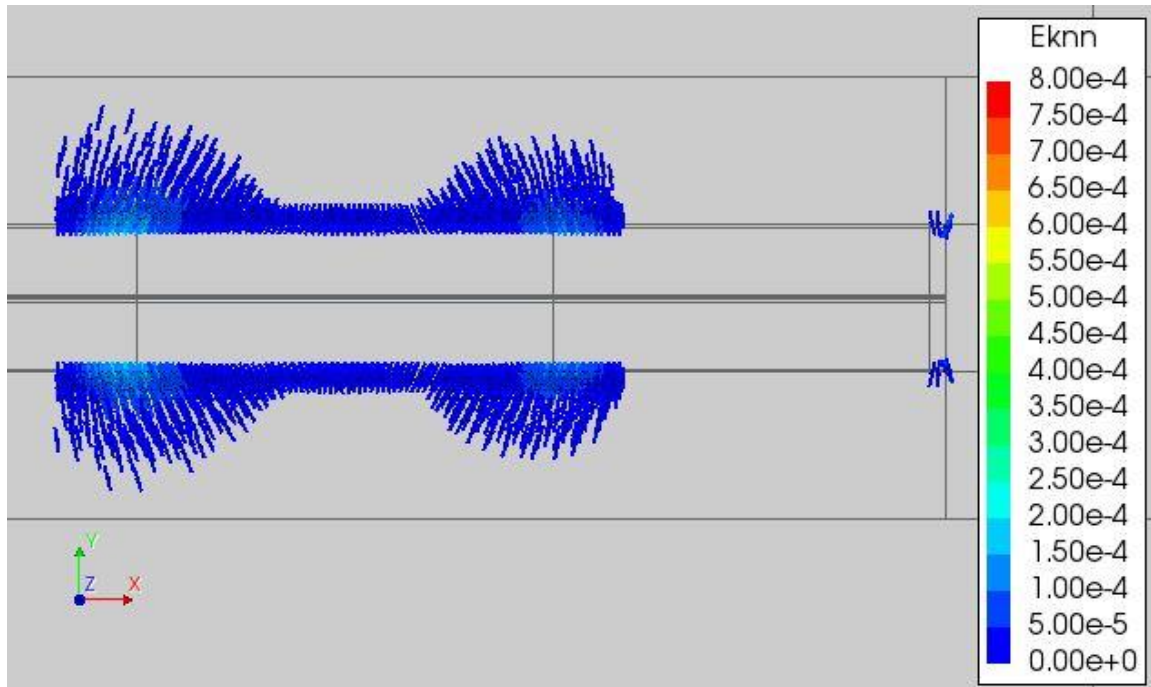


Figura 2.58 Stato fessurativo al tempo 0

A distanza di un mese dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 2.59

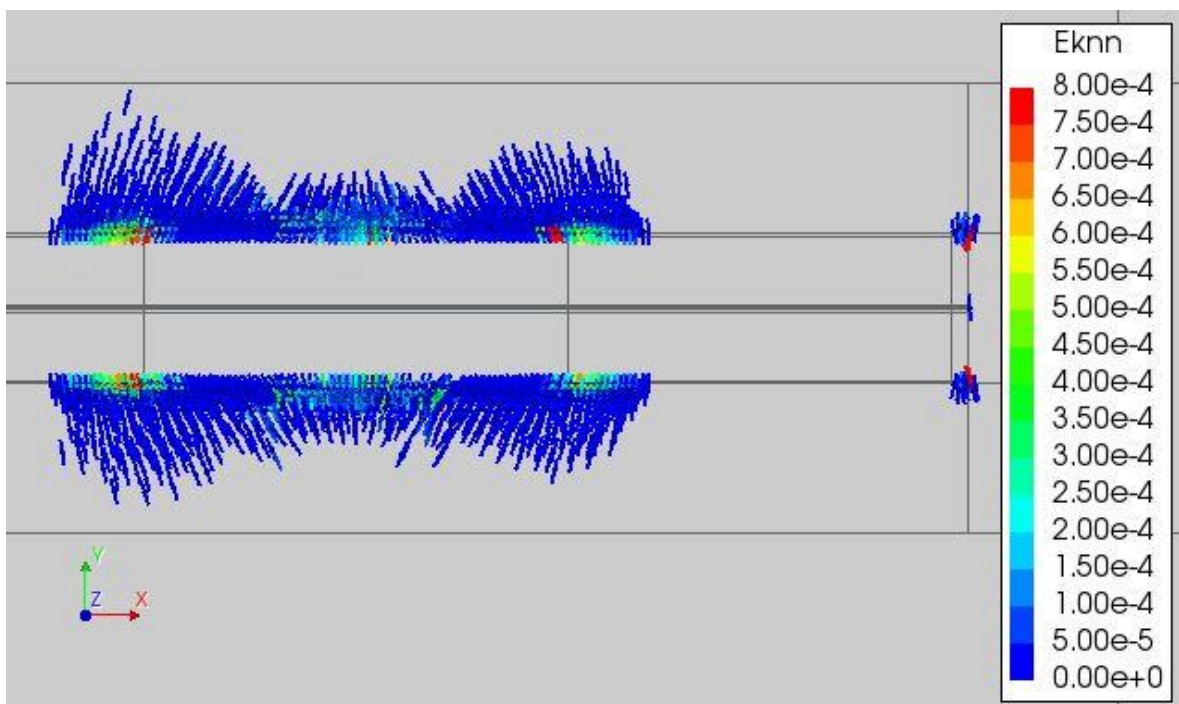


Figura 2.59 Stato fessurativo a distanza di 1 mese dall'applicazione del carico

Si osserva come lo stato fessurativo si evolva ed aumenti nel tempo, concentrandosi in maniera particolare nelle zone di discontinuità, cioè tra 9 e 17 mm circa dall'asse di rotazione Y, in cui non è presente l'armatura interna di rame, e all'estremità del sensore.

A distanza di un anno lo stato fessurativo appare come in Figura 2.60:

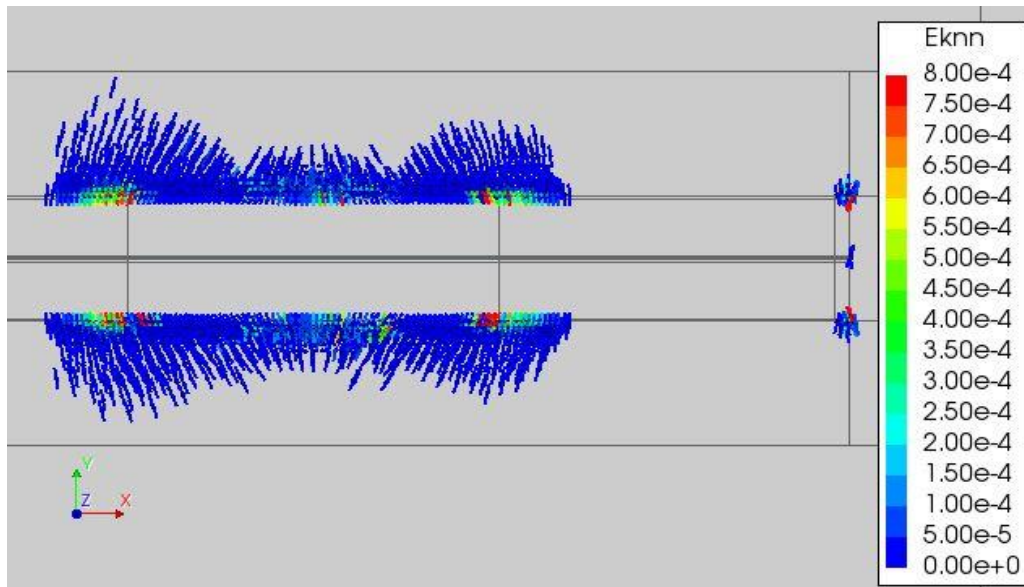


Figura 2.60 Stato fessurativo a distanza di 1 anno dall'applicazione del carico

A distanza di quattro anni lo stato fessurativo appare come in Figura 2.61:

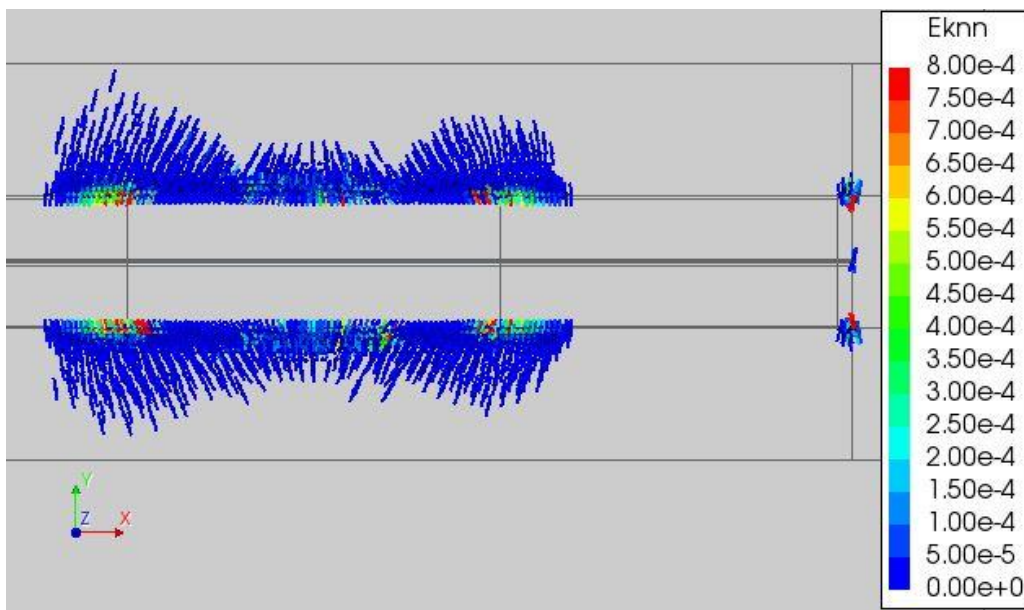


Figura 2.61 Stato fessurativo a distanza di 4 anni dall'applicazione del carico

Risulta evidente come lo stato fessurativo si evolva più velocemente nel primo anno per poi avanzare più lentamente negli anni successivi. Si manifesta una deformazione normale al

piano delle fessure $\varepsilon_{k,nn}$ massima pari a circa $8.00e-4$ a fronte di $2.88e-4$ registrato nel modello senza creep.

Tuttavia, anche se la deformazione di fessurazione massima risulta maggiore nel modello con malta viscoelastica, la deformazione media nella zona fessurata è dell'ordine di $1e-4$, per la quale corrisponde un'apertura delle fessure trascurabile.

2.6.5 Effetto del ritiro

Nelle simulazioni viene assunta un'età della malta al termine delle operazioni di curing pari a 3 giorni. Il ritiro, quindi, avrà luogo a partire dal terzo giorno (Paragrafo 2.4.5), mentre il carico viene applicato a 7 giorni dal getto.

Di conseguenza nei 4 giorni tra il termine delle operazioni di curing e l'applicazione del carico lo sviluppo del ritiro comporta degli effetti riscontrabili a 7 giorni (assunto come tempo zero nel Paragrafo 2.6.4).

2.6.5.1 Deformazioni nel Kapton

Le deformazioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 2.62 e Figura 2.63.

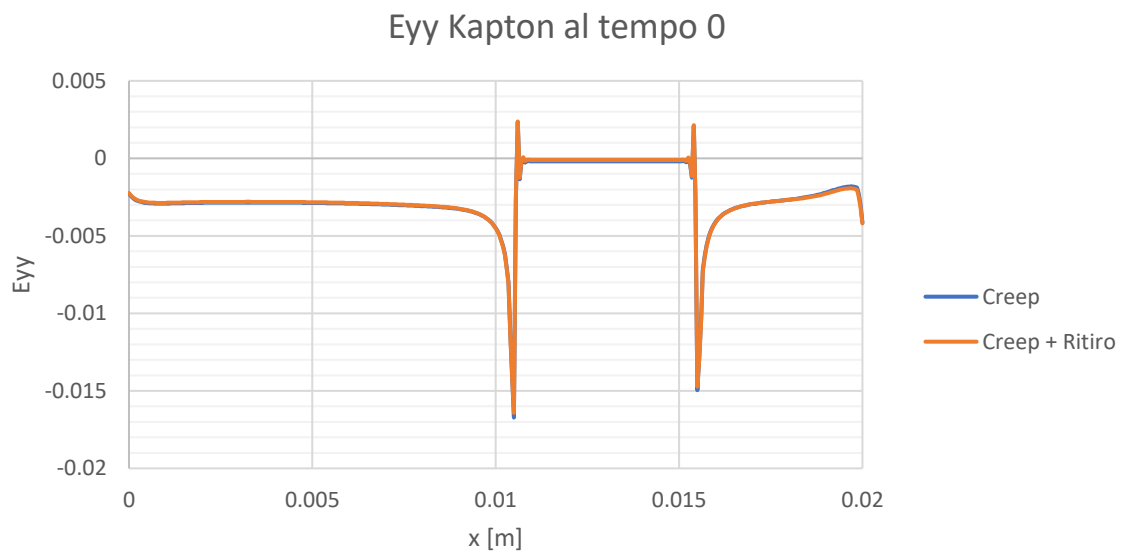


Figura 2.62 Eyy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

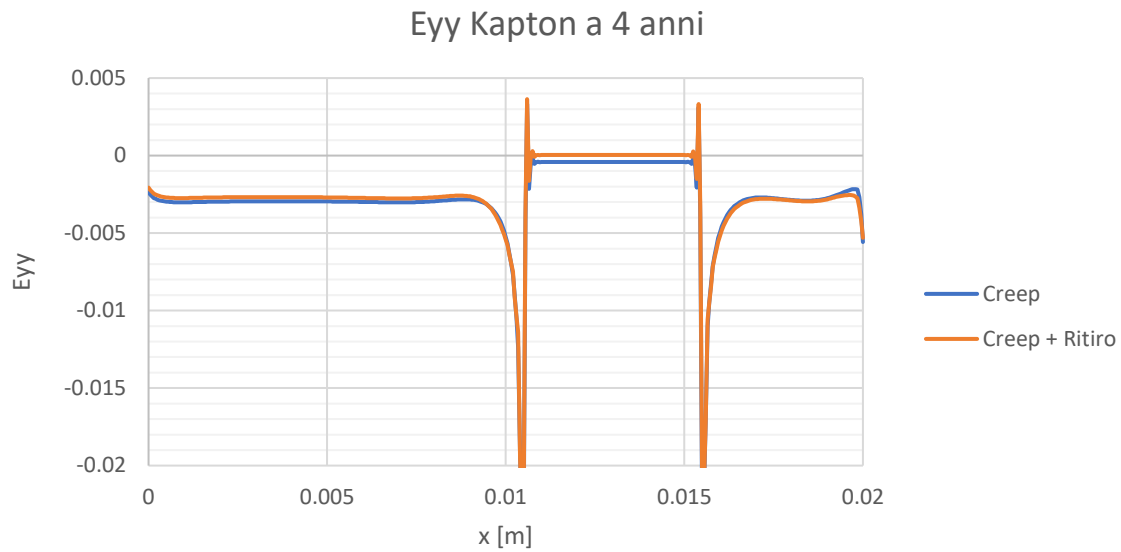


Figura 2.63 Eyy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Non si apprezzano quindi sostanziali variazioni (<5%) delle deformazioni assiali a causa del ritiro.

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 2.64 e Figura 2.65.

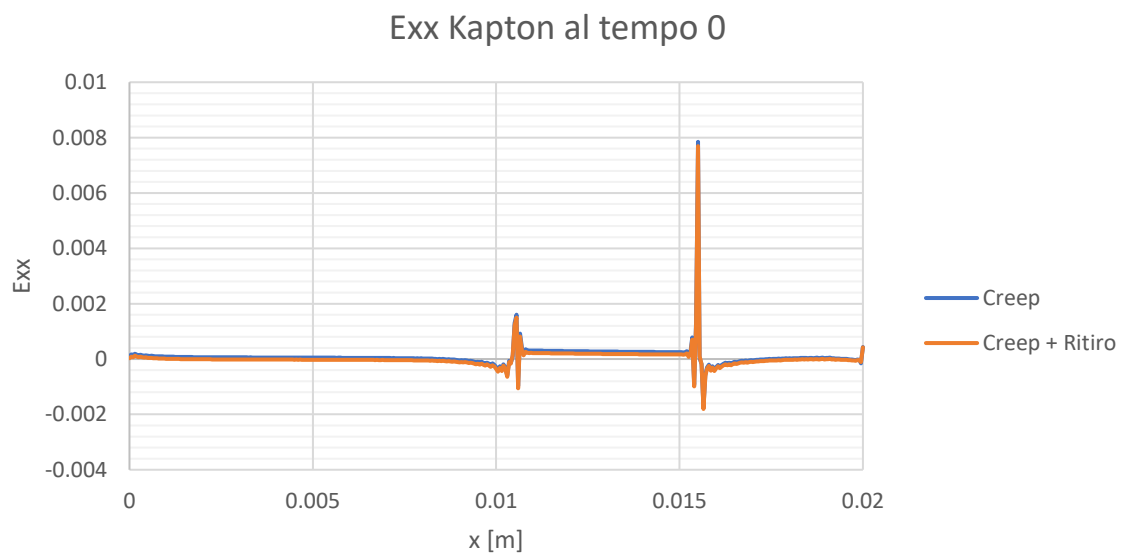


Figura 2.64 Exx nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

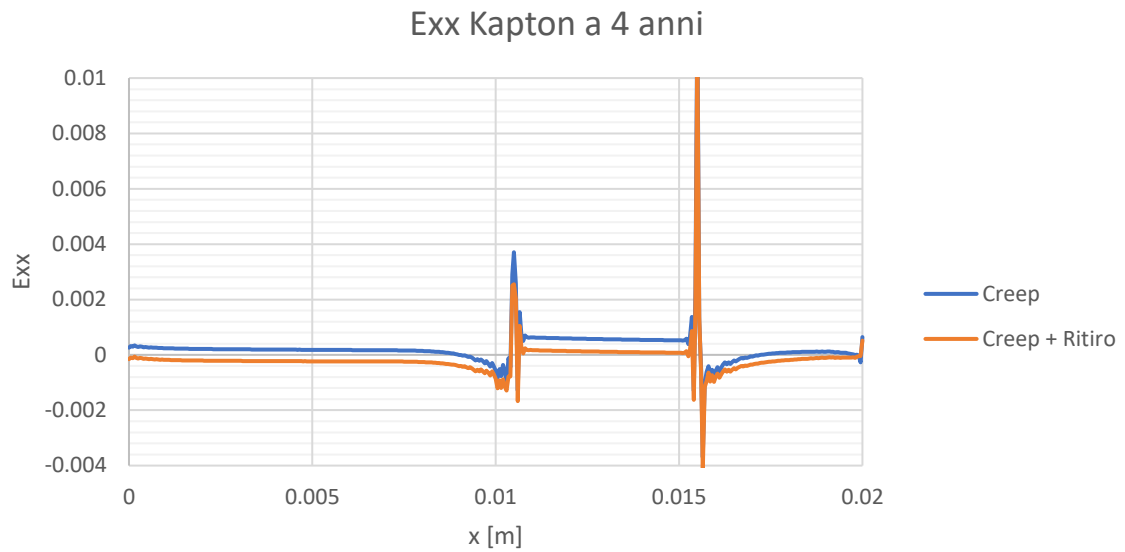


Figura 2.65 Exx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Si apprezza una variazione di $-4e-4$ delle deformazioni radiali in compressione a causa del ritiro.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 2.66 e Figura 2.67.

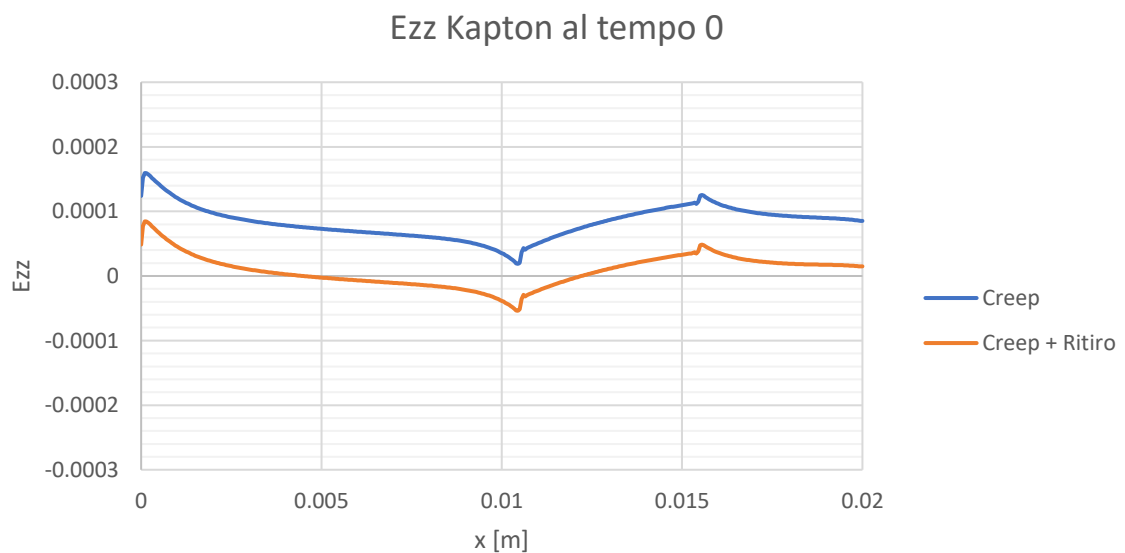


Figura 2.66 Ezz nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

Si nota l'effetto dello sviluppo del ritiro prima dell'applicazione del carico.

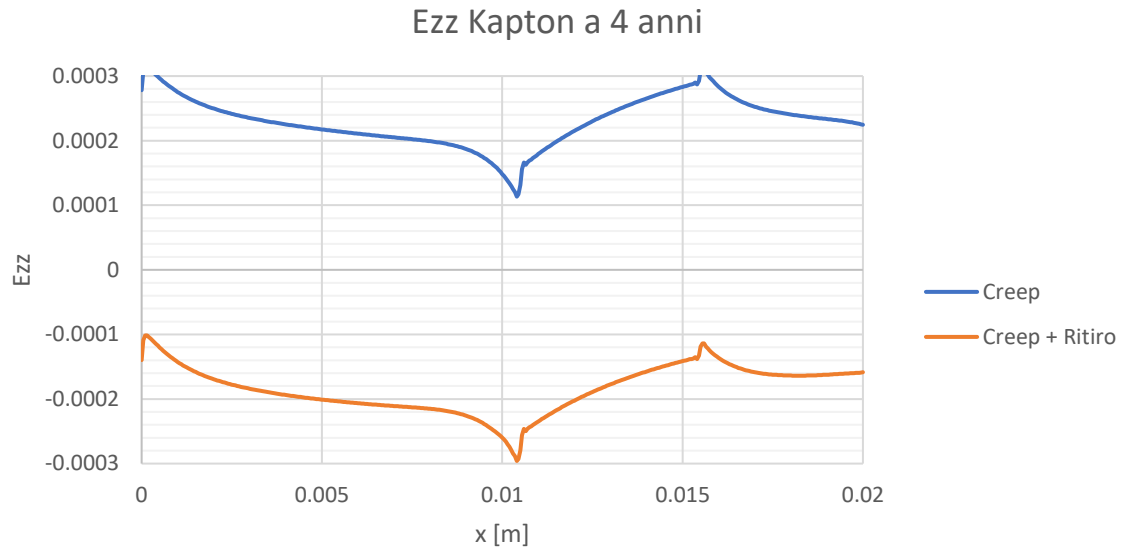


Figura 2.67 Ezz nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Si apprezza una variazione delle deformazioni circonferenziali di circa $-4e-4$ in compressione a causa del ritiro.

2.6.5.2 Deformazioni nell'FR4

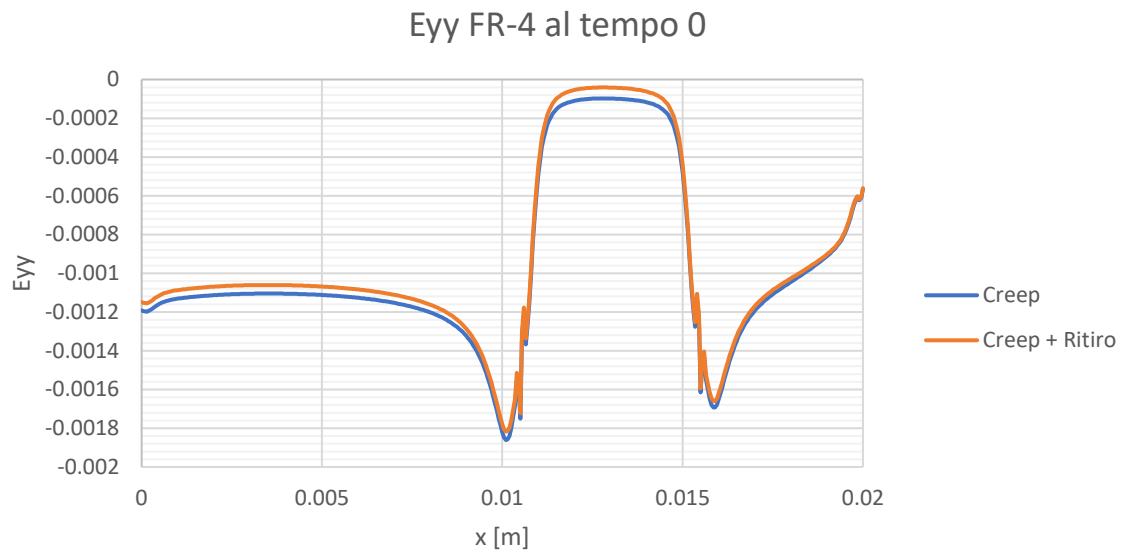


Figura 2.68 Eyy nell'FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

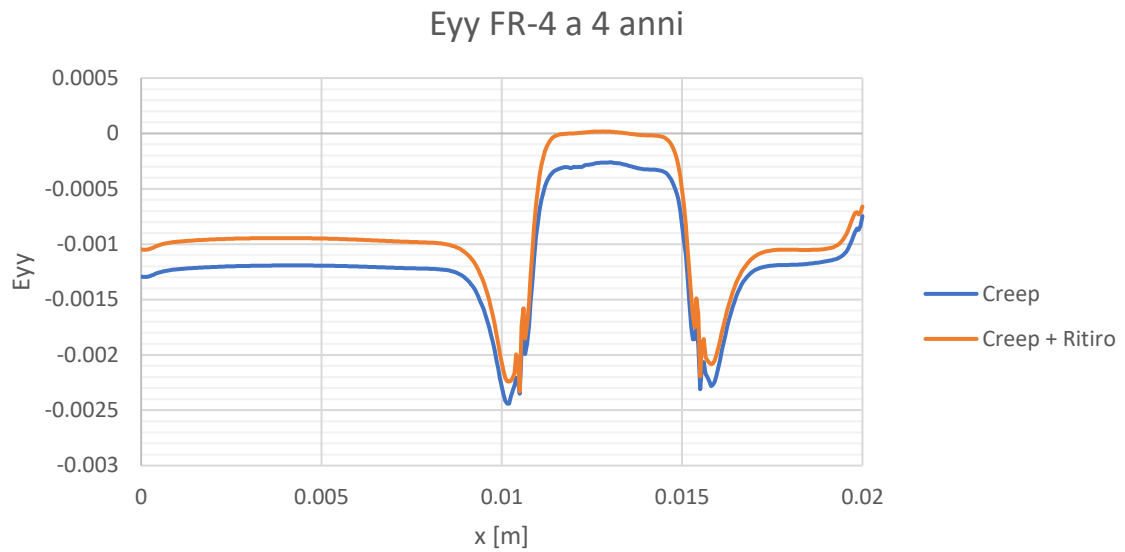


Figura 2.69 Eyy nell'FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

A causa del ritiro si apprezzano delle differenze di deformazione di circa il 16% in direzione assiale.

Le deformazioni radiali nell'FR4 sono riportate nei grafici di Figura 2.70 e Figura 2.71.

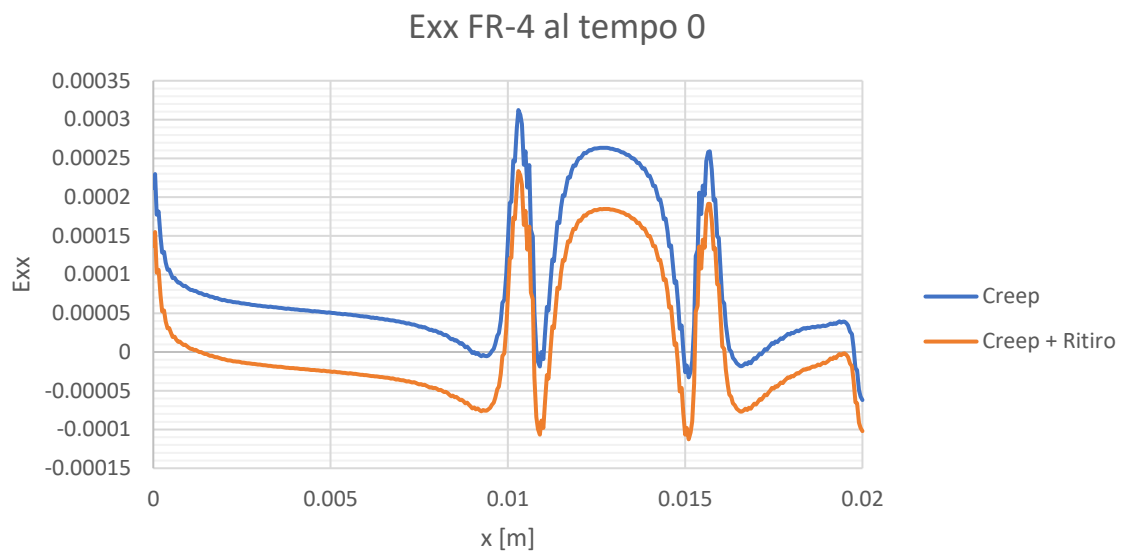


Figura 2.70 Exx nell'FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

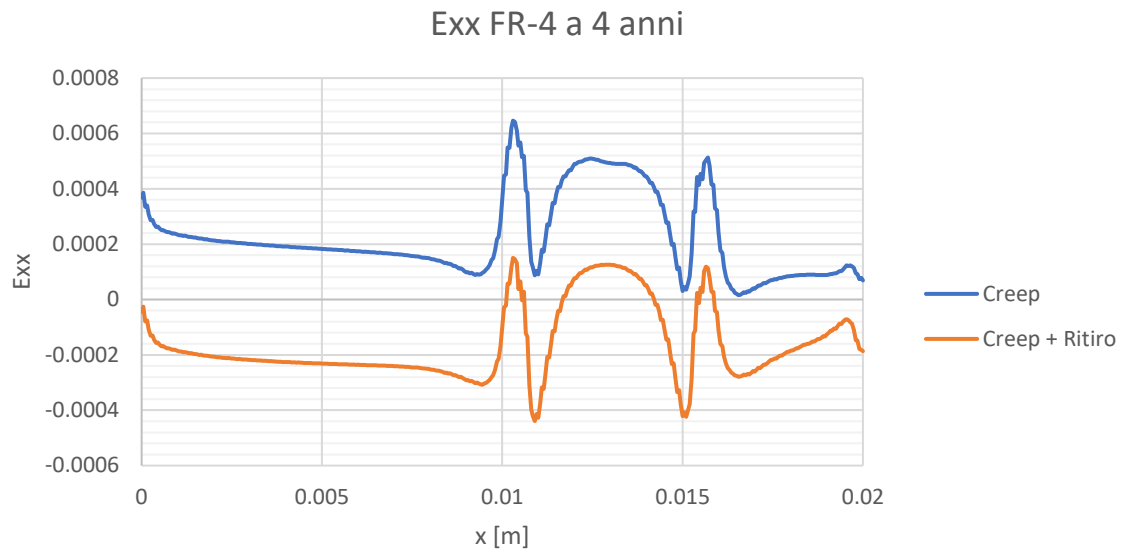


Figura 2.71 Exx nell'FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Le deformazioni circonferenziali nell'FR4 sono riportate in Figura 2.72 e Figura 2.73.

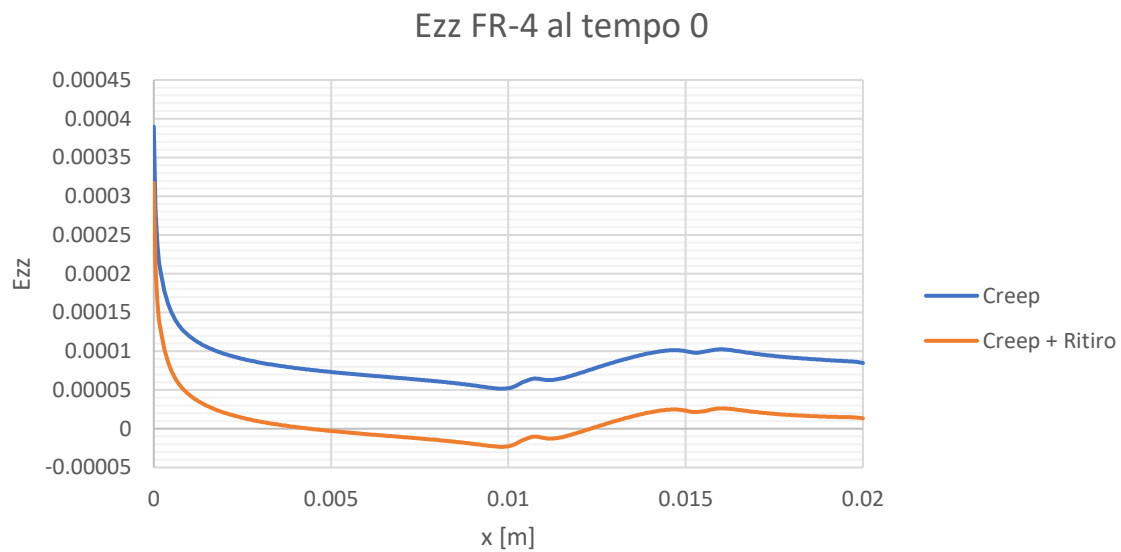


Figura 2.72 Ezz nell'FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

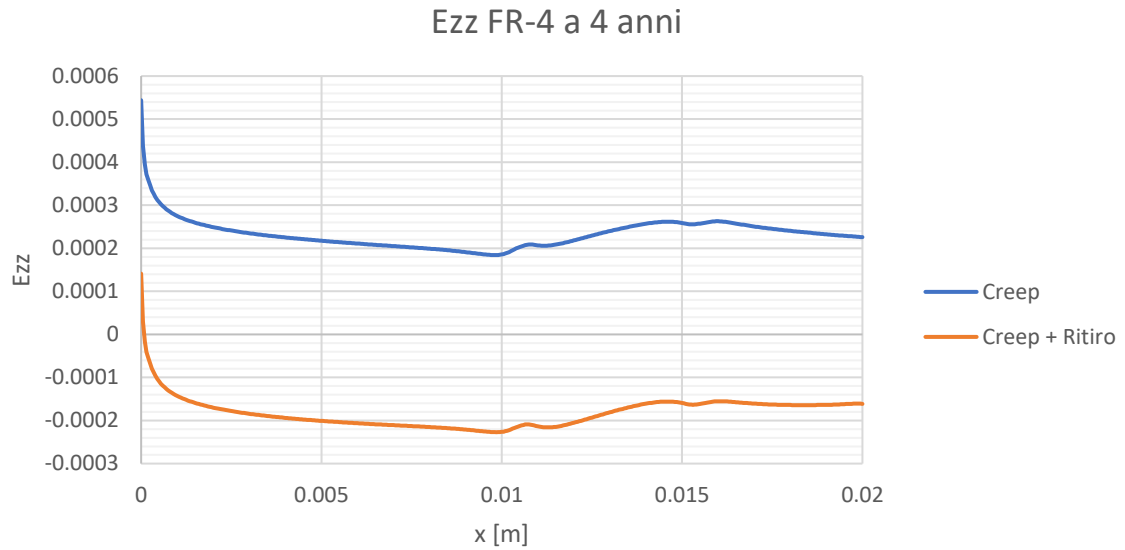


Figura 2.73 Ezz nell'FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Si apprezza una variazione delle deformazioni radiali e circonferenziali di circa $-4e-4$ in compressione a causa del ritiro.

La differenza risulta essere identica a quella registrata per il kapton. Questo comportamento ci indica che non c'è scorrimento relativo tra gli strati all'interno del sensore, ed in particolare tra le board e lo strato dielettrico in kapton.

Inoltre, la differenza risulta essere praticamente costante lungo tutto il raggio del sensore. Questo conferma l'assenza di scorrimento relativo. Si può escludere dunque che le tensioni di compressione in direzione radiale e circonferenziale siano dovute ad attrito laterale ma dovute esclusivamente al contatto ortogonale (in direzione assiale YY).

2.6.5.3 Tensioni nel Kapton

Le tensioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 2.74 e Figura 2.75.

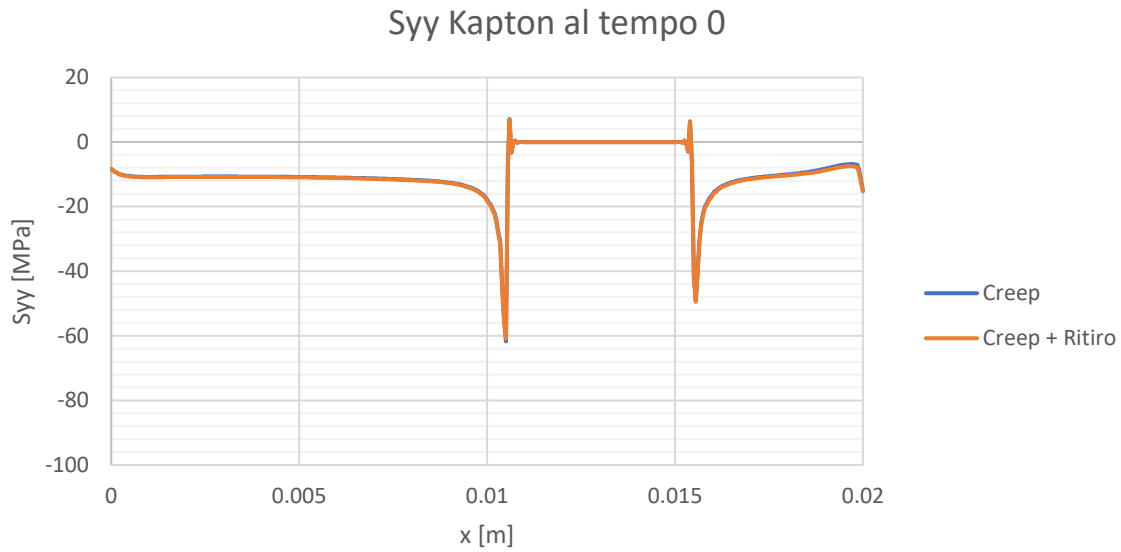


Figura 2.74 Syy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

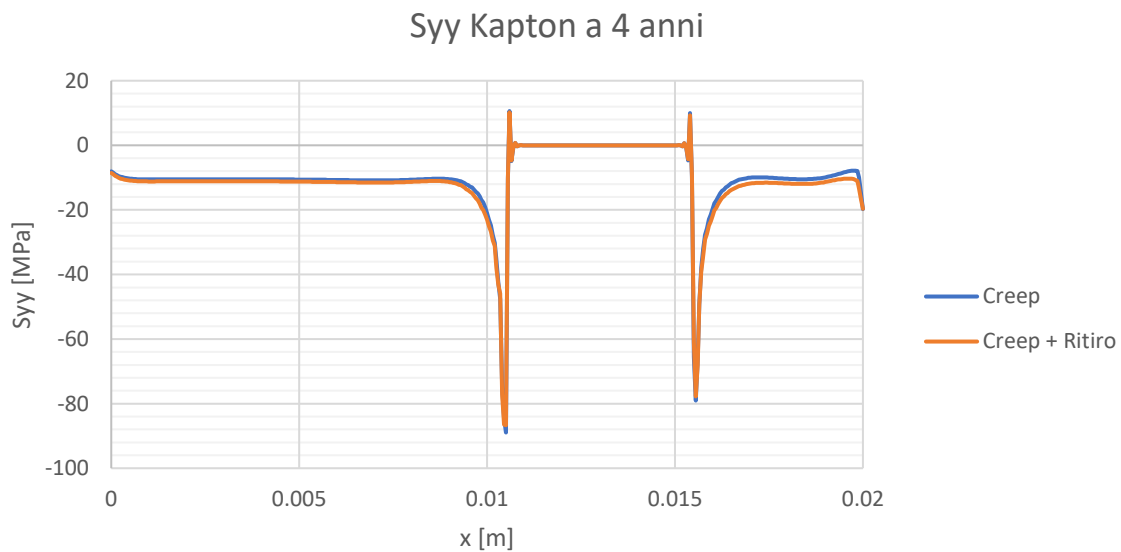


Figura 2.75 Syy nelkapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Non si apprezzano quindi sostanziali variazioni (<5%) delle tensioni assiali a causa del ritiro.

Il kapton risulta soggetto a 10 MPa circa di compressione nelle zone lontane dal disturbo causato dall'intaglio del rame. Soltanto le zone perturbate sono affette da variazioni di tensione degne di nota dovute al fluage.

Le tensioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 2.76 e Figura 2.77.

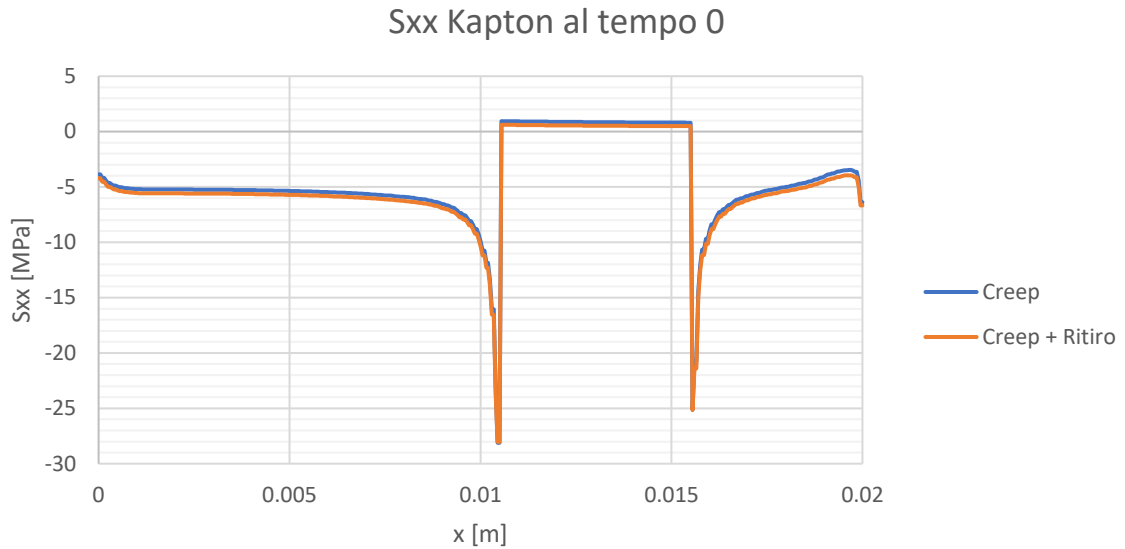


Figura 2.76 Sxx nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

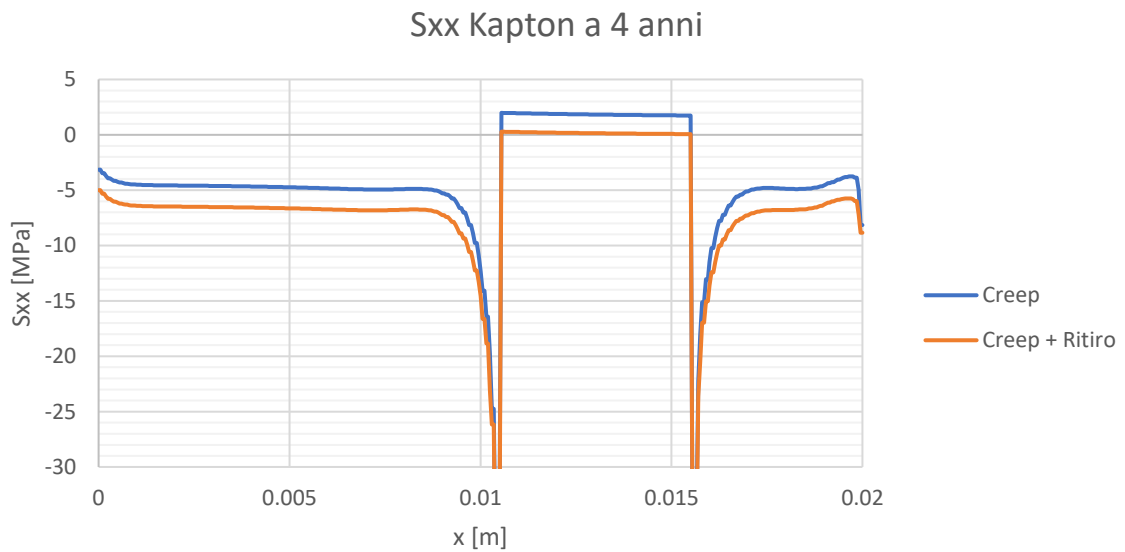


Figura 2.77 Sxx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Si apprezza una variazione delle tensioni radiali (in direzione XX) di circa -2 MPa a causa del ritiro. Nel modello si è infatti supposto che i materiali del sensore siano elastici quindi risultano compressi dalla variazione di volume della malta causata dal ritiro, esattamente come capita per gli inerti del calcestruzzo.

Le tensioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 2.78 e Figura 2.79.

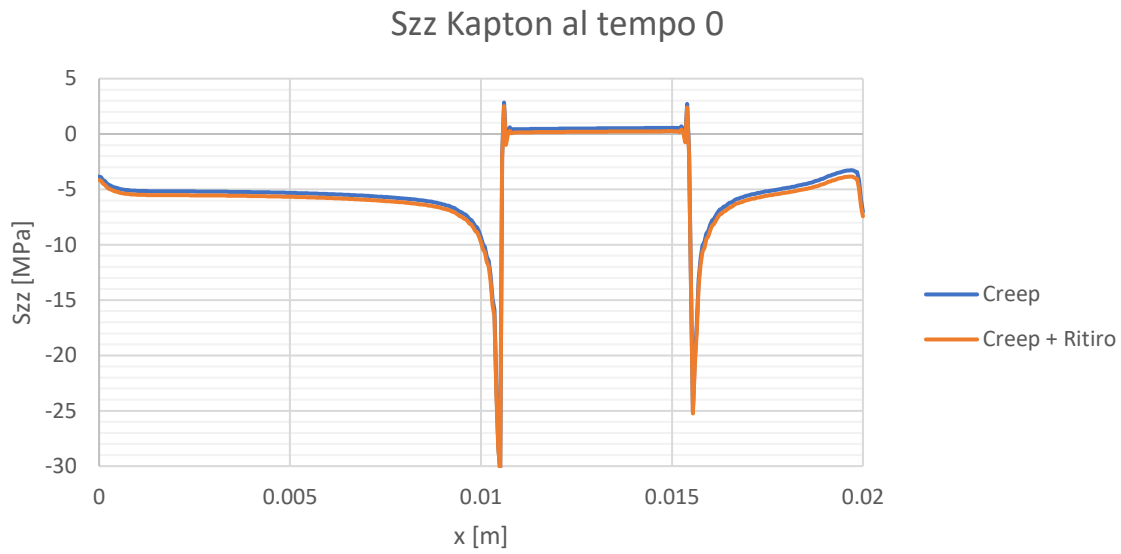


Figura 2.78 S_{zz} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

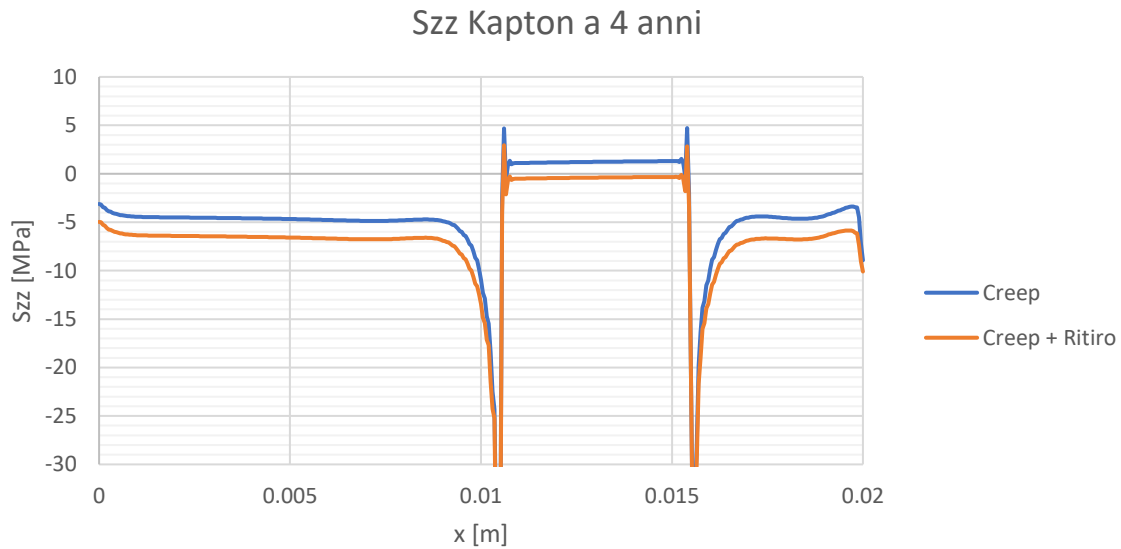


Figura 2.79 S_{zz} nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Si apprezza una variazione delle tensioni circonferenziali (in direzione ZZ) di circa -2 MPa a causa del ritiro. Questa variazione è identica a quella registrata in direzione XX a causa della simmetria cilindrica del sensore e del provino.

2.6.5.4 Tensioni nell' FR4

Le tensioni assiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 2.80 e Figura 2.81.

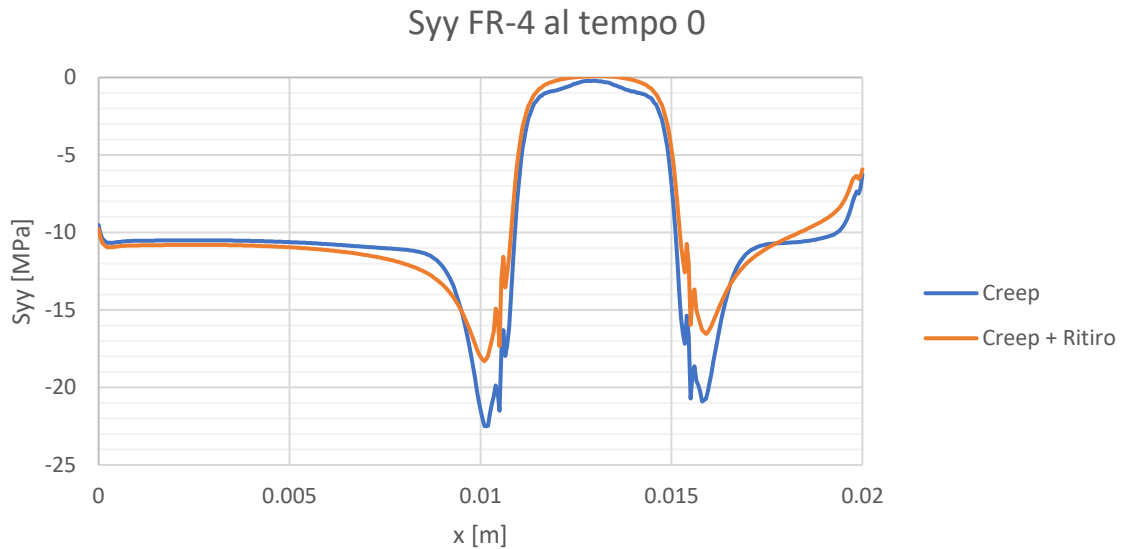


Figura 2.80 Syy nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

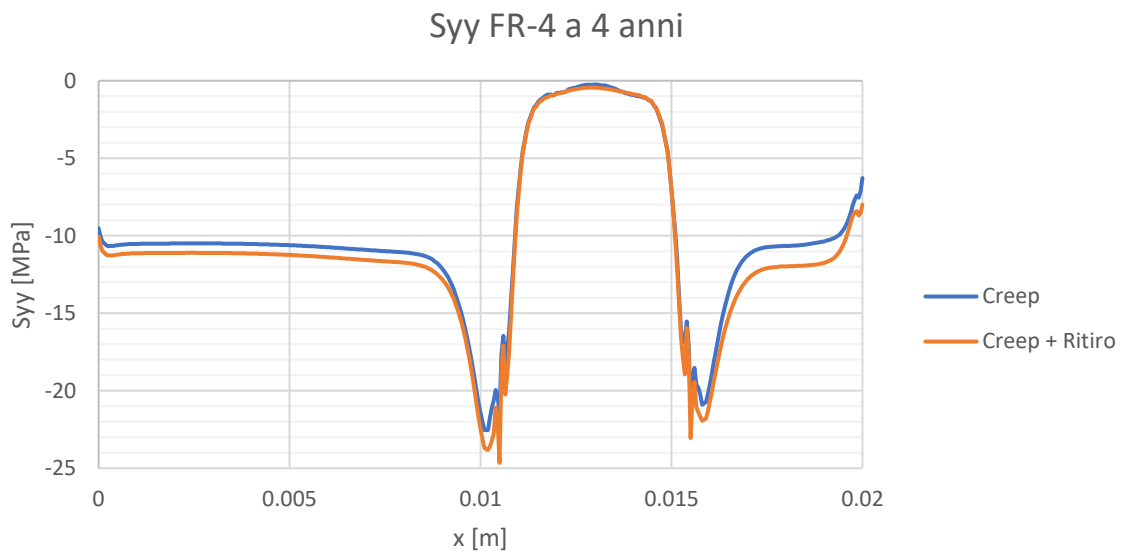


Figura 2.81 Syy nel FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Non si apprezzano quindi sostanziali variazioni delle tensioni assiali dovute al ritiro. Le differenze maggiori si apprezzano al tempo 0 (7 giorni dal getto) nelle zone vicino alla discontinuità dovuta all'intaglio, ma queste differenze si riducono per effetto del fluage a tempo infinito.

Le tensioni radiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 2.82 e Figura 2.83.

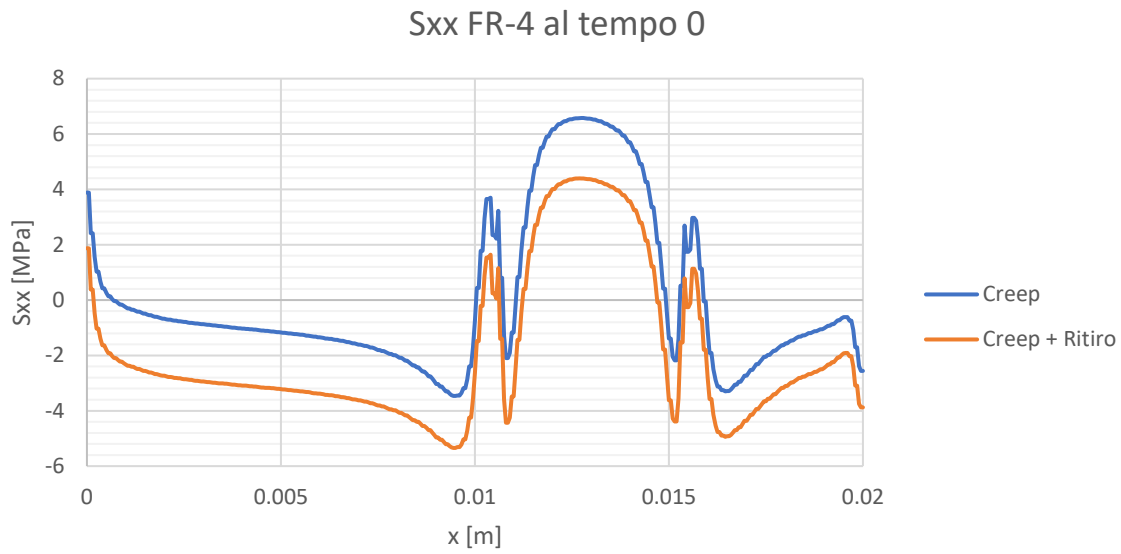


Figura 2.82 Sxx nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

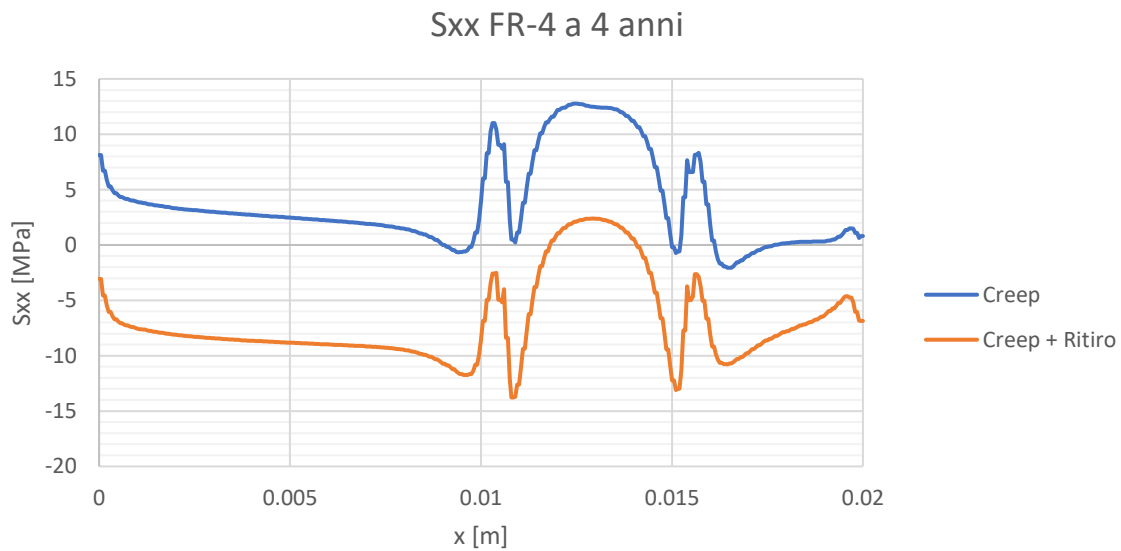


Figura 2.83 Sxx nel FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Il ritiro aggiunge una compressione uniformemente distribuita sul sensore, che varia da circa 2 MPa a 7 giorni dal getto fino a circa 10 MPa dopo quattro anni (equivalenti a tempo infinito nelle simulazioni)

Le tensioni circonferenziali nell'FR4 sono mostrate nelle figure seguenti.

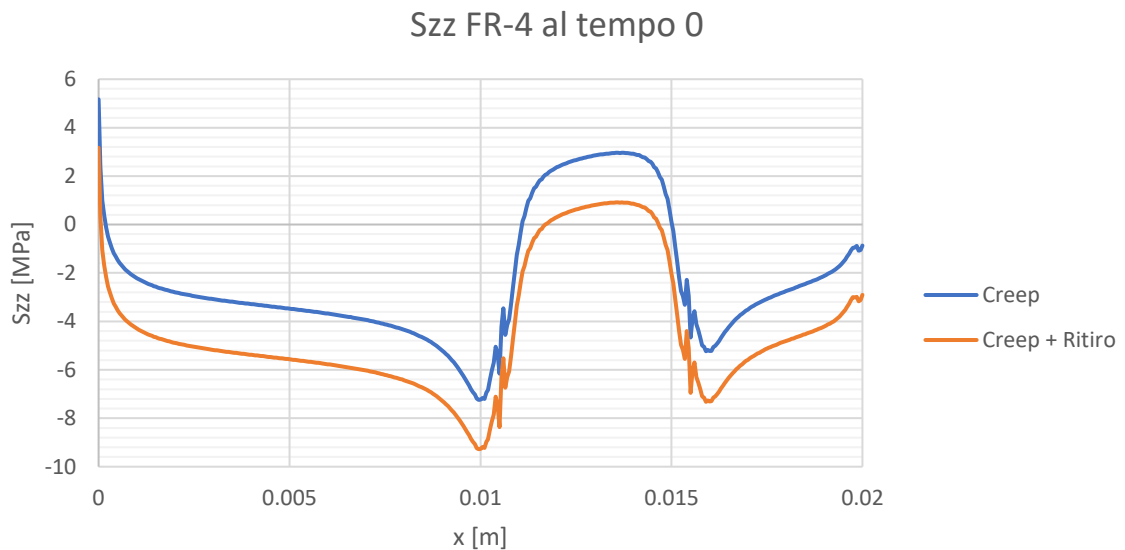


Figura 2.84 S_{zz} nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

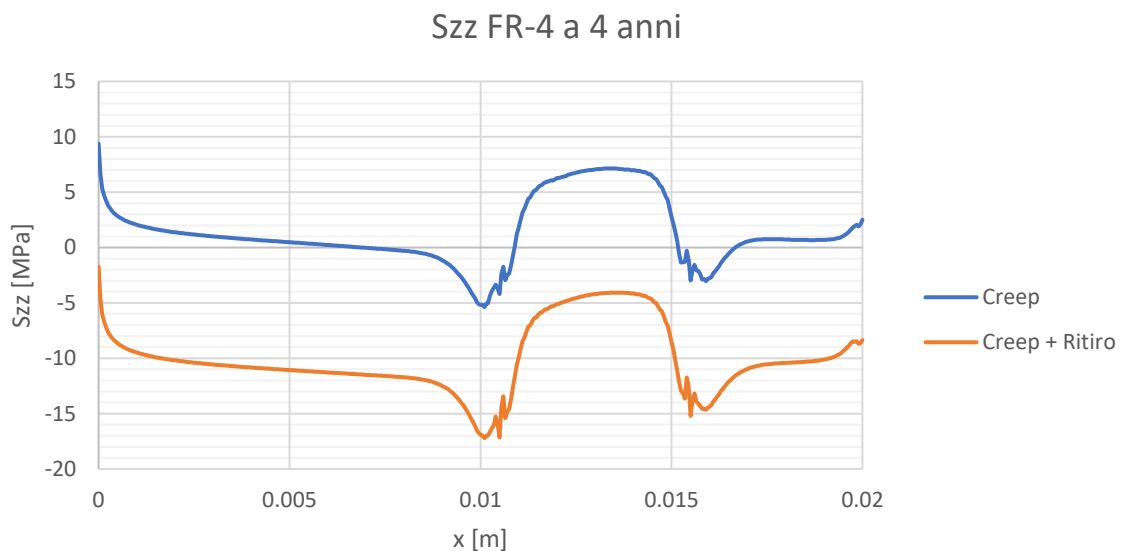


Figura 2.85 S_{zz} nel FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Si apprezzano quindi sostanziali variazioni delle tensioni circonferenziali a causa del ritiro.

In particolare, come per le tensioni radiali, il ritiro aggiunge una compressione variabile da circa 2 MPa a circa 10 MPa dopo quattro anni.

2.6.5.5 Tensioni nella malta

Le tensioni assiali in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione posta nella malta a 0.5 cm dal sensore sono mostrate in Figura 2.86 e Figura 2.87.



Figura 2.86 Syy CLS a 0.5 cm al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

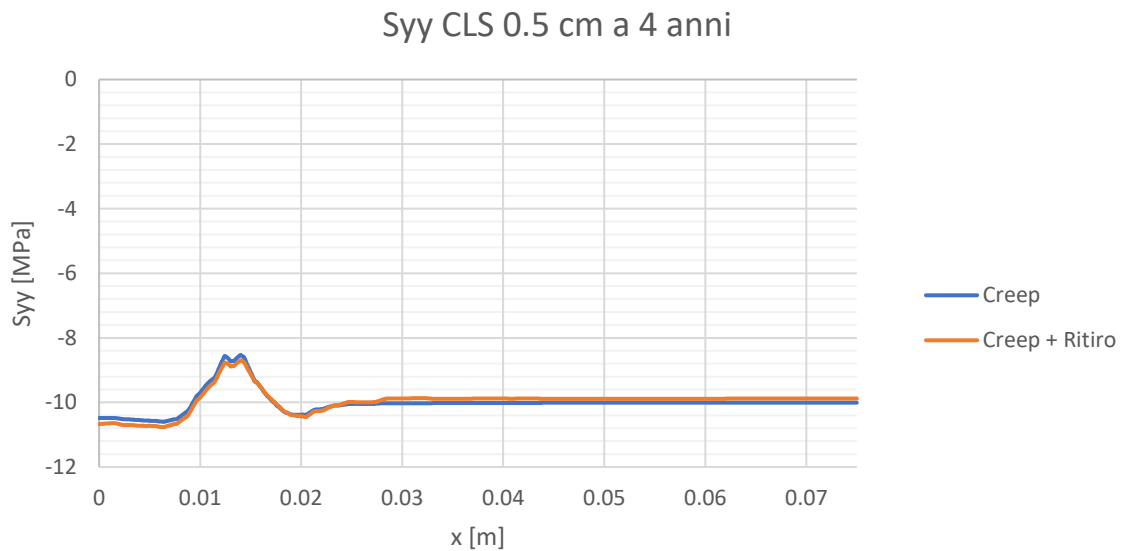


Figura 2.87 Syy CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Nella malta, in direzione assiale, non si osservano delle variazioni significative (<5%) di tensioni a causa del ritiro.

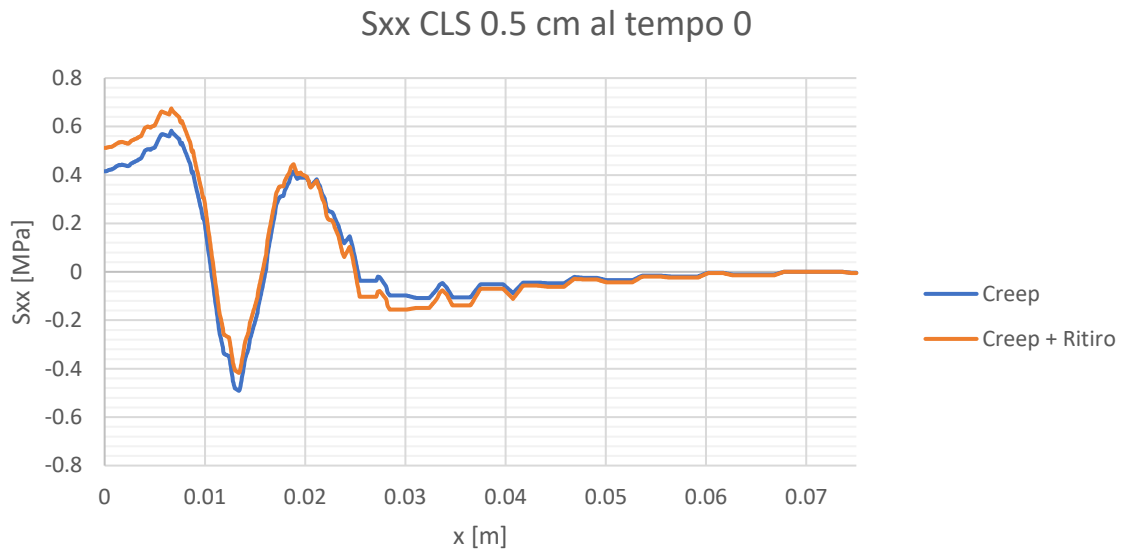


Figura 2.88 Sxx CLS a 0.5 cm al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

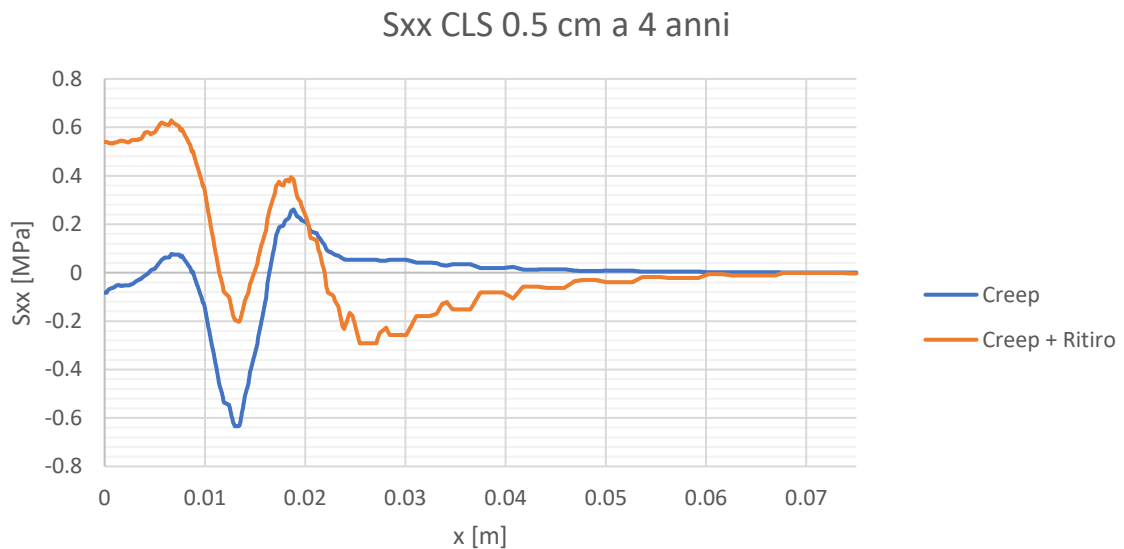


Figura 2.89 Sxx CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Si apprezzano quindi sostanziali variazioni delle tensioni radiali a causa del ritiro. Si notano due zone del grafico in Figura 2.89: da 20 mm in poi in direzione radiale, quindi al di fuori della zona interessata dalla presenza del sensore, in cui si riscontra una compressione nella malta dovuta al ritiro, con una differenza massima rispetto alla curva con solo creep di circa 0.3 MPa che tende ad annullarsi gradualmente procedendo verso l'esterno del cilindro di malta. La seconda zona è quella influenzata dalla presenza del sensore, che costituisce un vincolo nei confronti della malta. In questa zona quindi a causa del ritiro si instaura una trazione rispetto al modello con solo creep, con una differenza massima pari a 0.6 Mpa.

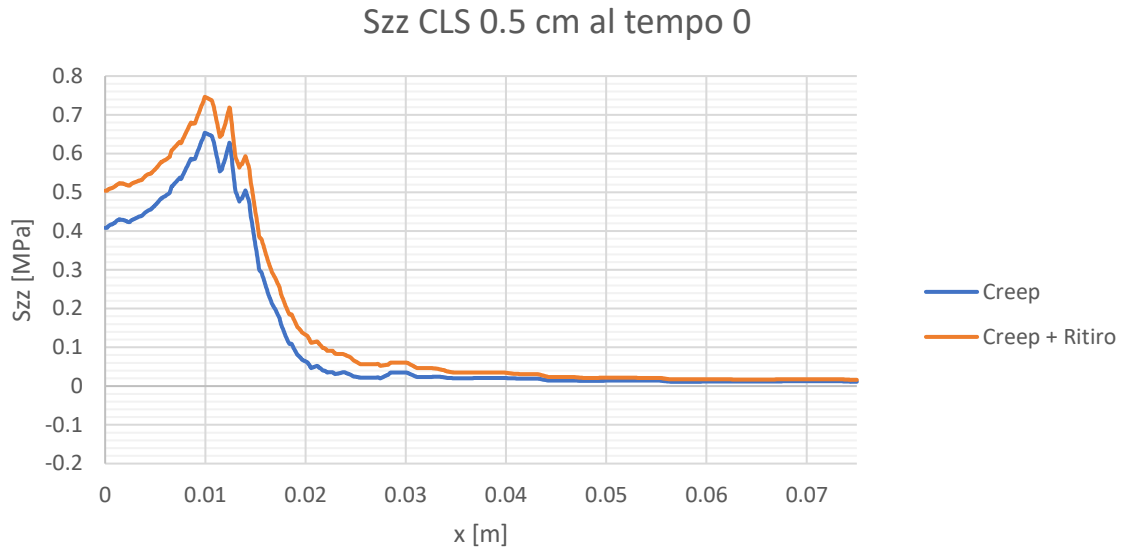


Figura 2.90 Szz CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

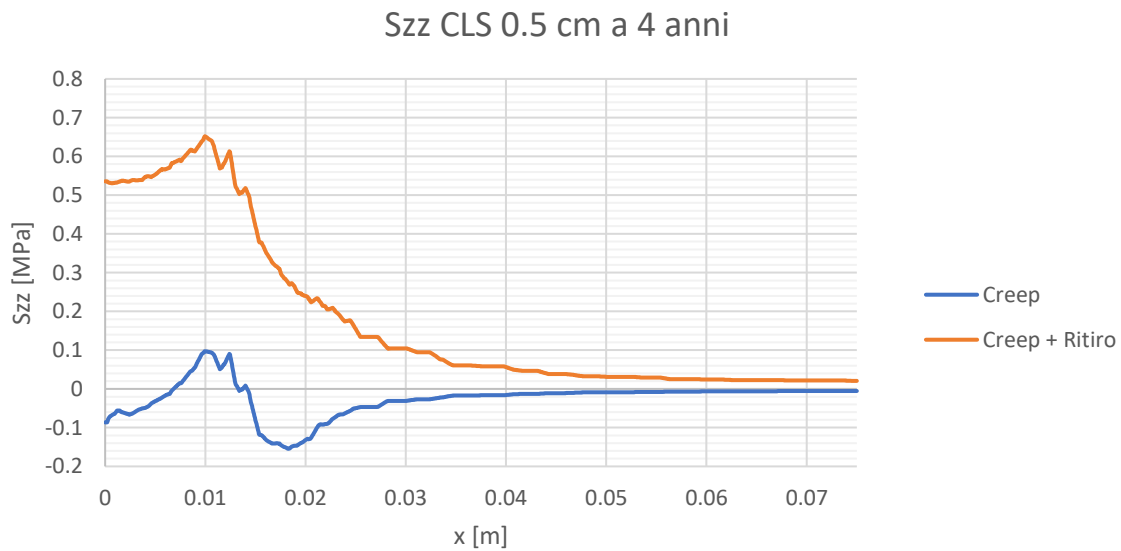


Figura 2.91 Szz CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Anche in direzione circonferenziale si apprezzano variazioni di tensione sostanziali dovute al ritiro. Valgono le stesse considerazioni già espresse precedentemente per le tensioni radiali, con una differenza massima che si attesta anche in questo caso a circa 0.6 MPa per la simmetria cilindrica per poi diminuire gradualmente procedendo verso l'esterno del cilindro, attestandosi su un valore costante pressoché nullo.

2.6.5.6 Evoluzione fessurazione nel tempo

Appena dopo l'applicazione della pressione di 10 MPa, quindi al tempo 0, si ha uno stato fessurativo come in Figura 2.92:

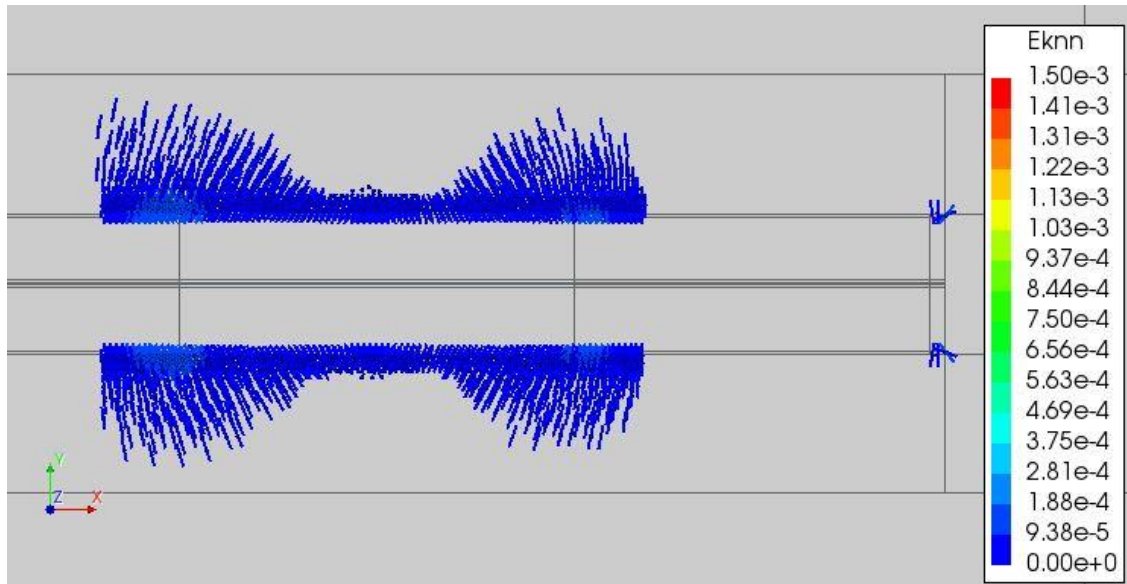


Figura 2.92 Stato fessurativo al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

A distanza di un mese dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 2.93:

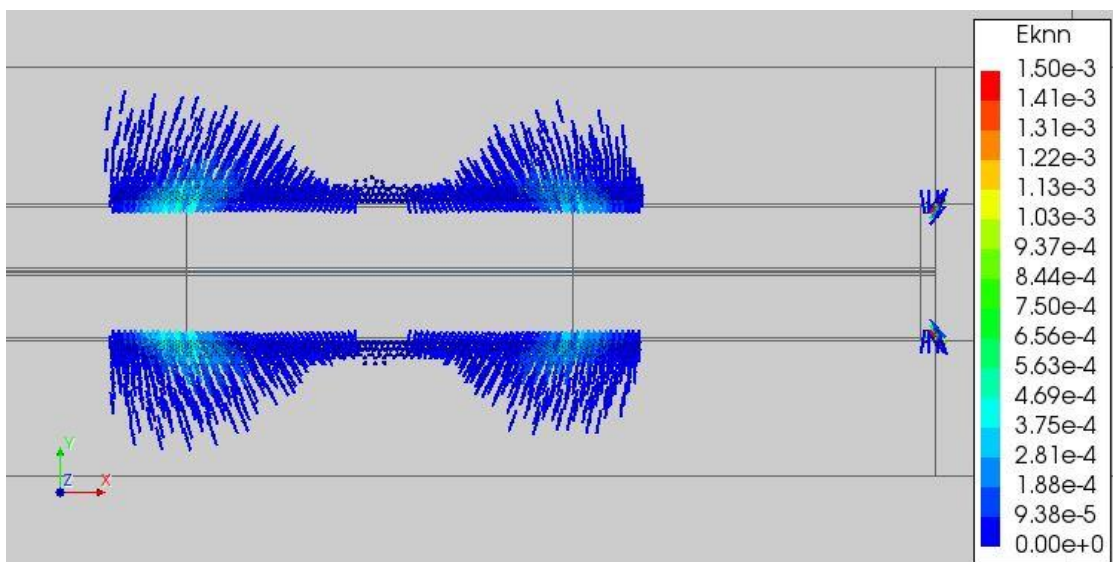


Figura 2.93 Stato fessurativo a distanza di 1 mese dall'applicazione del carico

Si osserva come lo stato fessurativo si evolva ed aumenti nel tempo, concentrandosi in maniera particolare nelle zone di discontinuità, cioè tra circa 9 e 17 mm di distanza dall'asse di rotazione Y e all'estremità del sensore.

A distanza di un anno lo stato fessurativo appare come in Figura 2.94:

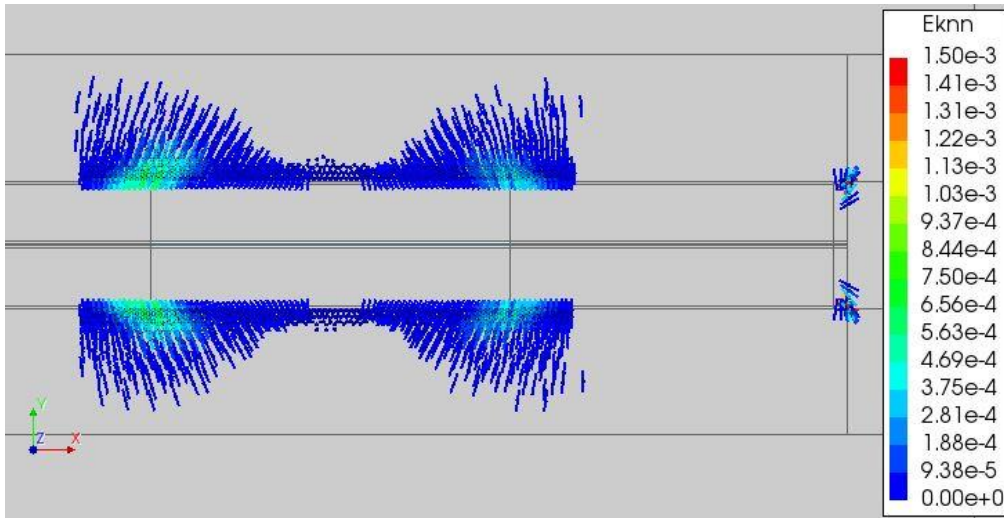


Figura 2.94 Stato fessurativo a distanza di 1 anno dall'applicazione del carico

A distanza di quattro anni lo stato fessurativo appare come in Figura 2.95:

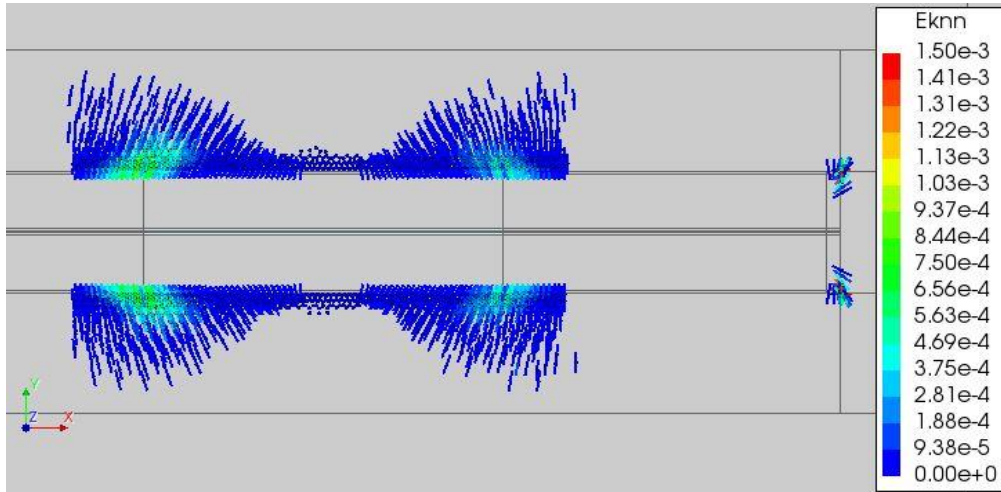


Figura 2.95 Stato fessurativo a distanza di 4 anni dall'applicazione del carico

Risulta evidente come lo stato fessurativo si evolva più velocemente nel primo anno per poi avanzare più lentamente negli anni successivi.

Rispetto al modello con solo creep a causa del ritiro si evince un quadro fessurativo più intenso, con una deformazione normale al piano delle fessure $\varepsilon_{k,nn}$ massima pari a $2.78e-3$, riscontrata all'estremità del sensore.

Anche nella zona di discontinuità dovuta all'assenza del rame si registra una $\varepsilon_{k,nn}$ massima più elevata, pari a circa $1,02e-3$. Nel modello con solo creep nella stessa zona, si riscontrava una $\varepsilon_{k,nn}$ massima pari a circa $8.00e-4$.

A causa del ritiro si è avuto quindi un aumento della deformazione di fessurazione massima di circa il 27% rispetto al modello con solo creep.

Tuttavia, anche se la deformazione di fessurazione massima risulta maggiore rispetto ai modelli con malta elastica e viscoelastica, la deformazione media nella zona fessurata anche in questo caso è dell'ordine di $1e-4$, per la quale corrisponde un'apertura delle fessure trascurabile ai fini ingegneristici.

3 Sensore capacitivo

La geometria del sensore capacitivo, esistente al momento come prototipo, differisce leggermente dalla geometria utilizzata nello studio preliminare. Il diametro e gli spessori degli strati restano invariati rispetto alla geometria preliminare (Paragrafo 2.1).

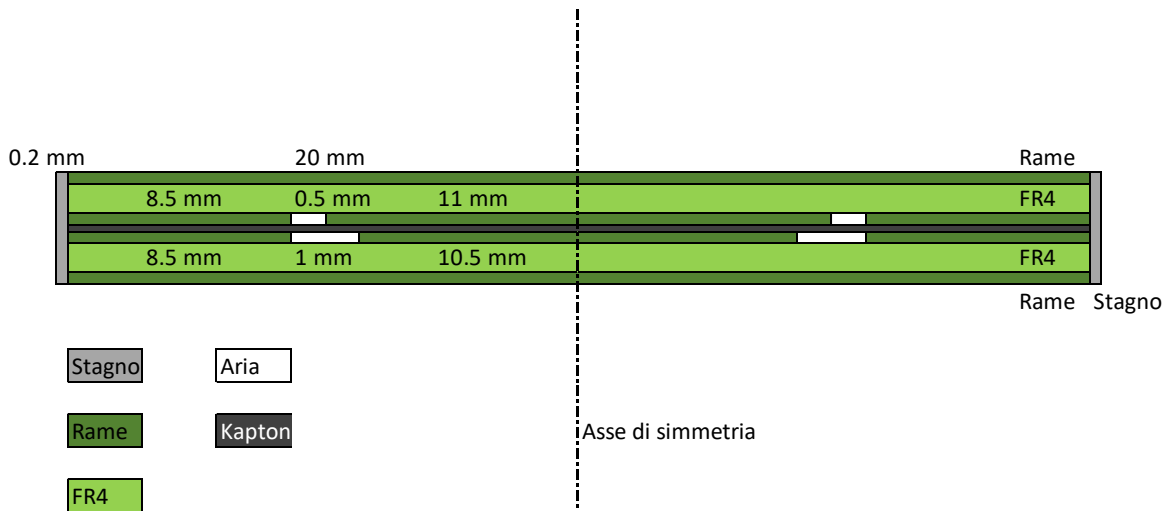


Figura 3.1 Geometria iniziale

Tabella 3.1 Materiali e spessore

Materiale	Spessore
Rame	35 μm
FR4	800 μm
Rame	35 μm
Kapton	25.4 μm
Rame	35 μm
FR4	800 μm
Rame	35 μm

A partire dall'asse di rotazione, in direzione radiale X è presente un intaglio di dimensioni pari a 0.5 mm sullo strato di rame interno della board superiore e 1 mm sullo strato di rame interno della board inferiore. Di conseguenza le due piastre di rame a contatto con il kapton saranno due piastre circolari, superiore e inferiore, con diametro rispettivamente di 22 e 21 mm.

All'estremità del sensore, in direzione radiale, è presente una saldatura in stagno di dimensioni pari allo spessore del sensore in direzione assiale e circa 0.2 mm in direzione radiale.

3.1 Geometria del modello FEM

La geometria utilizzata nel modello FEM è mostrata in Figura 3.2.

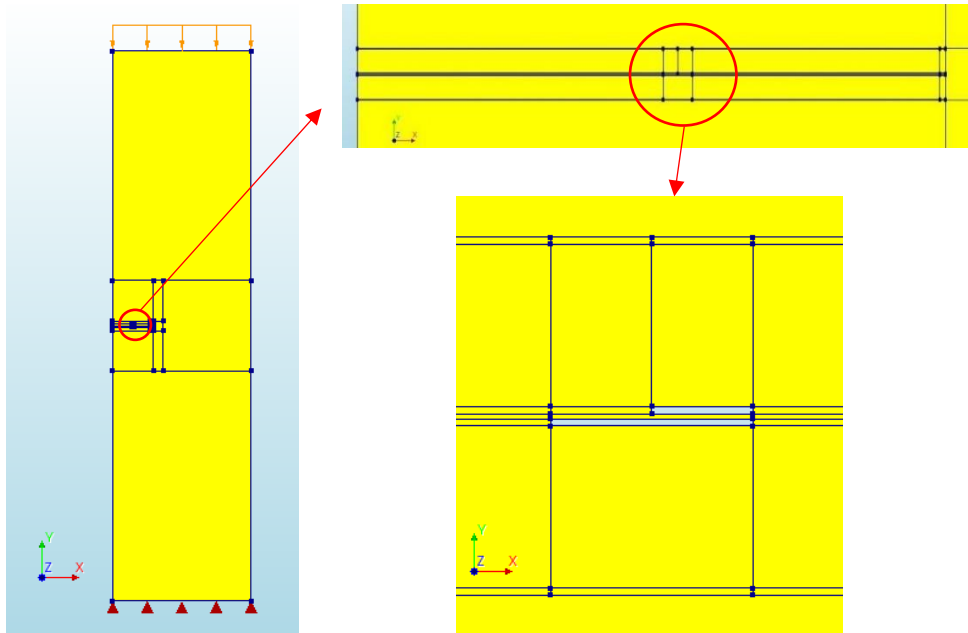


Figura 3.2 Geometria con dettaglio sul sensore

È stata utilizzata una mesh rettangolare per il sensore ed una triangolare per la malta cementizia con raffinamento della stessa in corrispondenza del sensore. In Figura 3.3 si riporta la mesh utilizzata con dettaglio sul sensore.

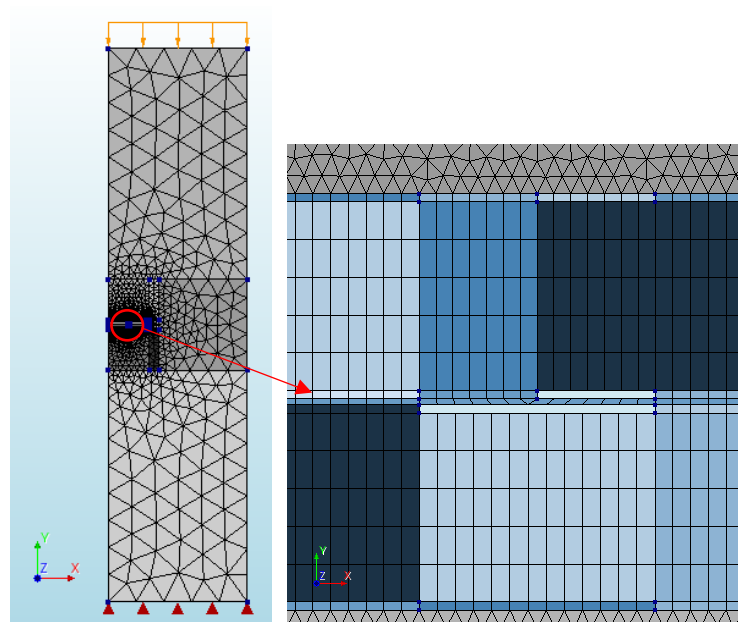


Figura 3.3 Mesh con dettaglio sul sensore

3.2 Analisi

Le analisi effettuate sulla geometria del sensore prototipo mirano a valutare come varia il comportamento interno del sensore a causa di diversi effetti.

3.2.1 Effetto dei fenomeni lenti: viscoelasticità e ritiro

L'analisi effettuata consiste in una simulazione di 10 step di carico con incremento di 1 Mpa per ogni step, per un carico finale complessivo di 10 Mpa applicato sulle facce circolari del provino di malta.

Il carico risulta essere applicato a sette giorni dal getto e viene simulato un mantenimento del carico costante per quattro anni, allo scopo di cogliere gli effetti reologici della malta e l'influenza che questi hanno sui materiali costituenti il sensore.

Nel modello viene modellata la malta avente proprietà meccaniche secondo il CEB-FIP Model Code 1990 (Paragrafo 2.4.3).

3.2.2 Effetto di diversi spessori dello strato dielettrico

La stessa analisi è stata effettuata prendendo in considerazione tre diversi spessori dello strato dielettrico in kapton, reperibili in commercio:

- 25.4 μm
- 50.8 μm
- 72.6 μm

3.2.3 Effetto di diversi spessori dello strato di FR4

La stessa analisi è stata effettuata prendendo in considerazione quattro diversi spessori di FR4, reperibili in commercio:

- 0.4 mm
- 0.8 mm
- 1.0 mm
- 1.2 mm

3.2.4 Effetto della presenza delle staffe per ancoraggio in trazione

Allo scopo di garantire una misura anche in caso di trazione nel calcestruzzo, il sensore è stato dotato di piccole staffe, in corrispondenza dell'asse di simmetria, mostrate in Figura 3.4.

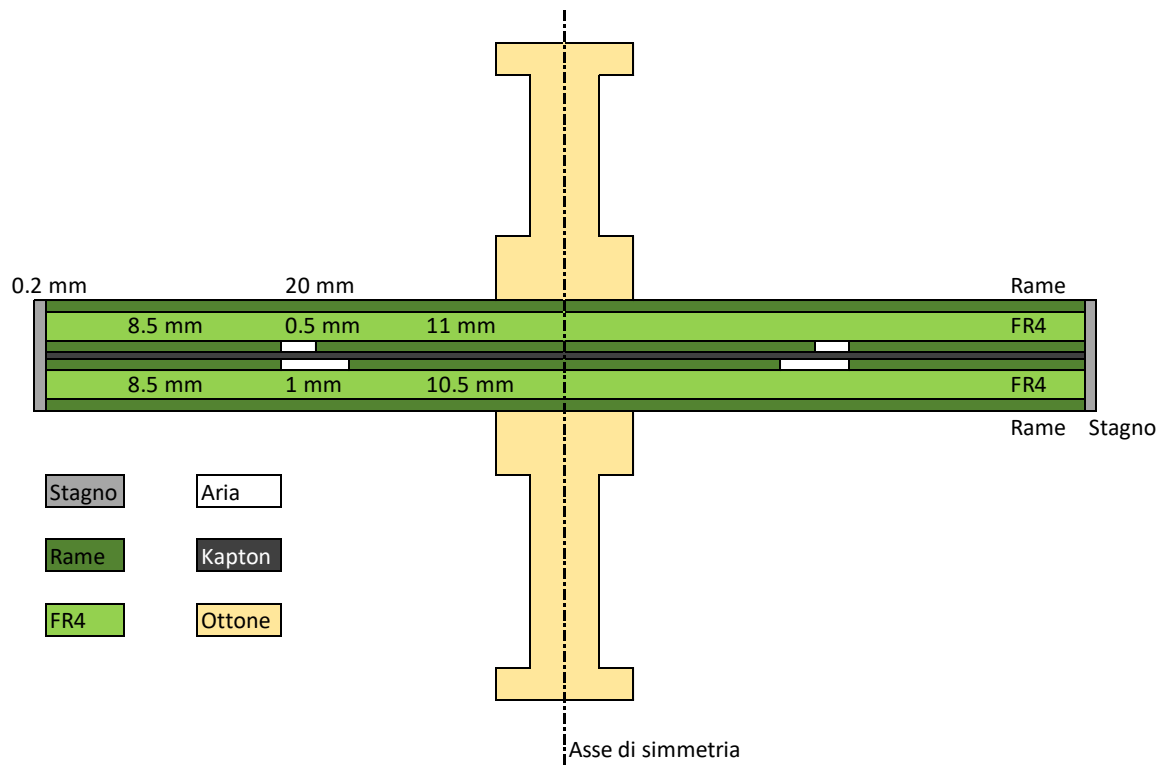


Figura 3.4 Geometria sensore con staffe

Le staffe sono state realizzate con un distanziale saldato sulla board, sullo strato di rame più esterno, al quale è stato avvitato un rivetto con filettatura M3.

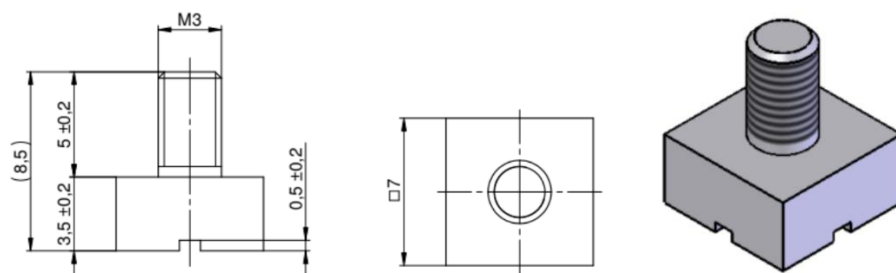


Figura 3.5 Dettaglio distanziale

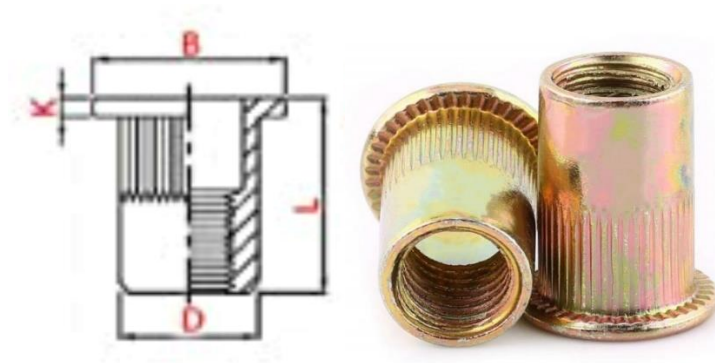


Figura 3.6 Dettaglio rivetto

Tabella 3.2 Datasheet rivetto

Elemento	Dimensioni [mm]
B diametro	8
D diametro	5
L lunghezza	9
K spessore	0.8

Ai fini della modellazione, mantenendo per semplicità una geometria assialsimmetrica, la base quadrata del distanziale, di lato pari a 7 mm, è stata modellata come una base circolare di raggio pari a 4 mm. La geometria utilizzata nel modello FEM è mostrata in Figura 3.7.

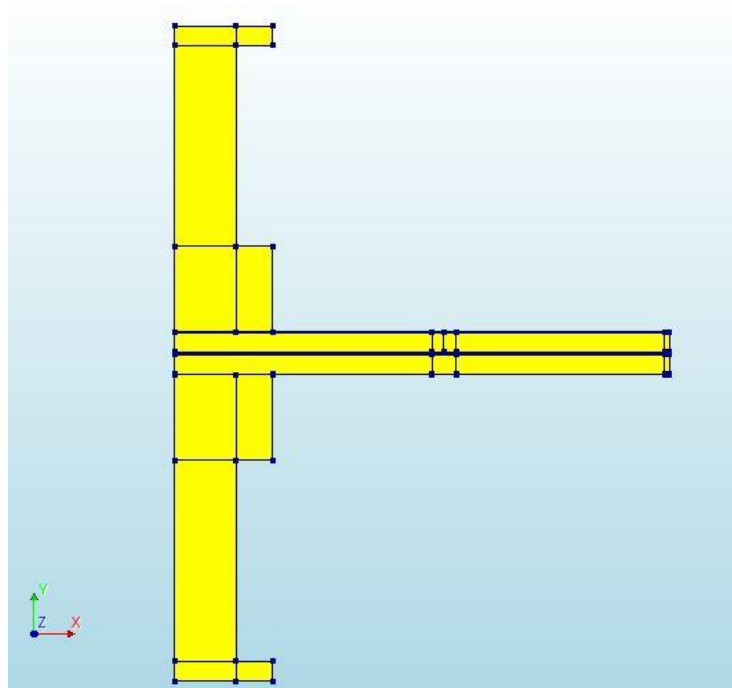


Figura 3.7 Geometria sensore con staffe

Il materiale per distanziale e rivetto è stato modellato come un ottone:

Tabella 3.3 Caratteristiche ottone

Ottone			
Modulo elastico	$E =$	105 000	MPa
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,35	
Densità	$\rho =$	8550	kg/m ³

Nella realtà il rivetto è costituito da un acciaio al carbonio, ed avvitato al distanziale in ottone ma, per semplicità di modellazione, l'intera staffa, costituita da distanziale e rivetto, è stata considerata in ottone, trascurando la cavità in corrispondenza della testa del rivetto.

Nel modello il rame esterno ed il distanziale sono considerati solidali tra di loro, in quanto saldati. Tra l'ottone delle staffe e la malta è stata modellata un'interfaccia di tipo attritivo alla Coulomb con coesione nulla e caratteristiche riportate in Tabella 3.4.

Tabella 3.4 Caratteristiche interfaccia

Interfaccia	Angolo di attrito	Coefficiente di attrito (μ)
Staffe – Malta	0.46 rad	0.43

3.2.5 Effetto della viscoelasticità dello strato dielettrico in kapton

Il Kapton è il materiale dielettrico, posto tra le due piastre del condensatore, formate dagli strati di rame più interni. La sua deformazione comporta la variazione di capacità del condensatore e, di conseguenza, una variazione nelle misure. Fino ad ora, in tutte le analisi, è stato considerato come un materiale elastico lineare, non interessato da fenomeni di viscosità. Essendo però un materiale polimerico è difficile pensare che non sia soggetto a questo tipo di fenomeni per cui, nel modello è stato inserito un materiale viscoelastico.

Per la definizione della viscoelasticità di un materiale si effettuano delle prove di creep o di rilassamento. Nelle prove di creep viene applicata una tensione al tempo zero e si registrano le deformazioni in funzione del tempo: creep function. Nelle prove di rilassamento viene applicata una deformazione al tempo zero e si registrano le tensioni in funzione del tempo: relaxation function.

Il modello viscoelastico utilizzato è un modello basato sulla catena di Maxwell, che si basa a sua volta sulla funzione di rilassamento $E(t, \tau)$. Per ottenere il modello di Maxwell la funzione di rilassamento viene espressa come una serie di Dirichlet troncata:

$$E(t, \tau) = \sum_{\alpha=0}^n E_{\alpha}(\tau) e^{-\frac{t-\tau}{\lambda_{\alpha}}}$$

In condizioni monodimensionali la funzione di rilassamento può essere espressa come una catena di molle e smorzatori viscosi posti in parallelo (Figura 3.8).

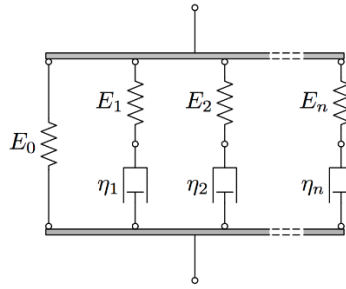


Figura 3.8 Catena di Maxwell

Nell'equazione $E_{\alpha}(\tau)$ indica che la rigidità del modello può essere dipendente dal tempo, ad esempio per la temperatura o per i fenomeni di maturazione del calcestruzzo. La rigidità delle molle E_{α} e la viscosità degli smorzatori η_{α} determinano il tempo di rilassamento:

$$\lambda_{\alpha} = \frac{\eta_{\alpha}}{E_{\alpha}}$$

In genere il primo elemento della catena di Maxwell è costituito da una singola molla o, equivalentemente, da una molla con rigidità finita E_0 e uno smorzatore con viscosità infinita $\eta_0 = \infty$.

Nella modellazione è stata utilizzata una catena di Maxwell avente un solo elemento oltre a quello iniziale, con le seguenti caratteristiche (Dharmadasa, McCallum, Lopez Jimenez, 2020):

- $E_0 = 2300 \text{ MPa}$
- $E_1 = 882 \text{ MPa}$
- $\eta_1 = 28610 \text{ MPa} \cdot \text{s}$

Di conseguenza $\lambda_1 = \eta_1/E_1 = 32.44 \text{ s}$.

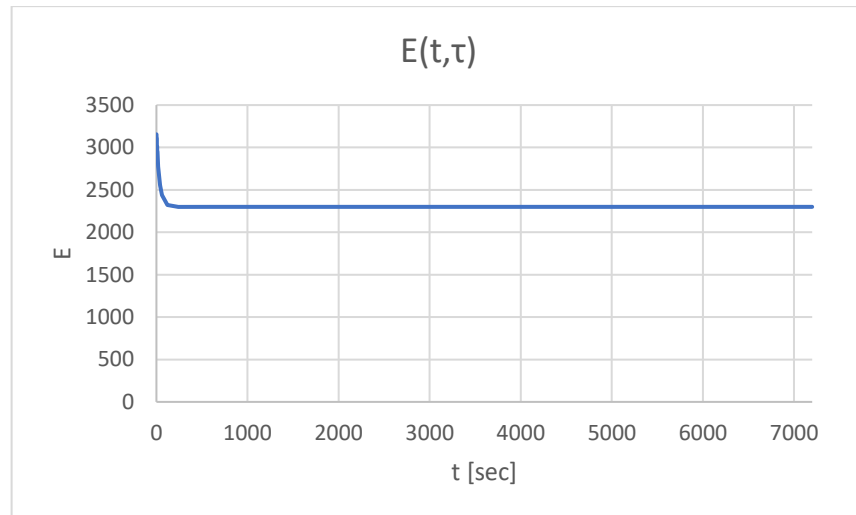


Figura 3.9 Relaxation Function da 0 a 2 ore

I parametri utilizzati sono stati ricavati da una prova di rilassamento della durata di 10 minuti, condotta in ambito aerospaziale. Per poter estendere l'analisi ai tempi tipici dell'edilizia, decisamente più lunghi, vengono assunti come validi i parametri fino a due ore dall'applicazione del carico, tempo al quale il kapton ha già ampiamente sviluppato tutta la sua viscosità.

3.2.6 Effetto della geometria del sensore

Al fine di valutare la geometria interna ottimale, è stata condotta un'analisi parametrica facendo variare il raggio esterno del sensore, dimensione e posizione dell'intaglio nello strato di rame interno della board.

Nel software agli elementi finiti è stata effettuata la stessa analisi, descritta nel Paragrafo 3.2.1.

I sensori, posti a confronto, sono così indicati:

- **ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5):** il sensore dello studio preliminare (Paragrafo 2.1), con diametro di 40 mm, intaglio di 5 mm posto tra 10.5 e 15.5 mm dall'asse di rotazione in direzione radiale.
- **ϕ 40 (14.5 – 1 – 4.5):** il sensore con diametro pari a 40 mm, intaglio di 1 mm posto tra 14.5 e 15.5 mm dall'asse di rotazione in direzione radiale.

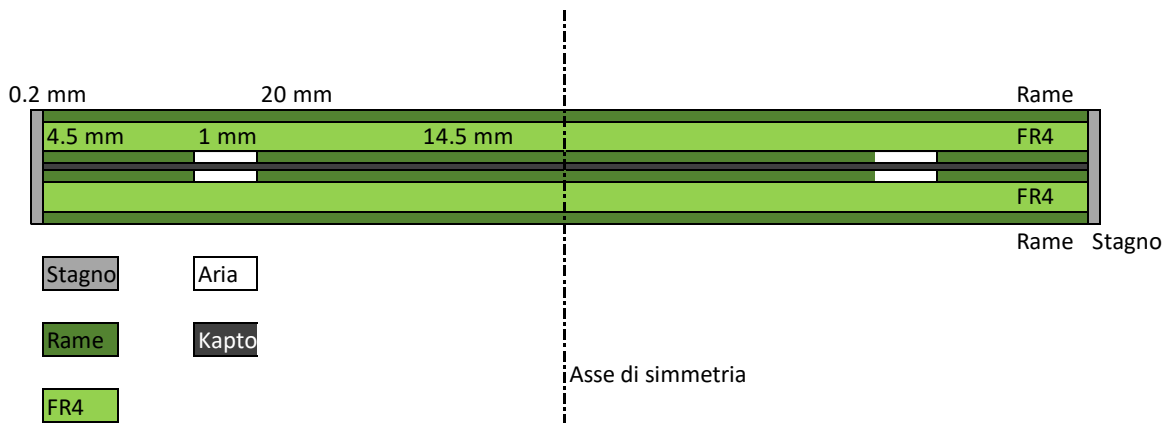


Figura 3.10 $\phi 40$ (14.5 – 1 – 4.5)

- **$\phi 30$ (13 – 1 – 1)**: il sensore con diametro di 30 mm, intaglio di 1 mm posto tra 13 e 14 mm in direzione radiale dall'asse di rotazione.

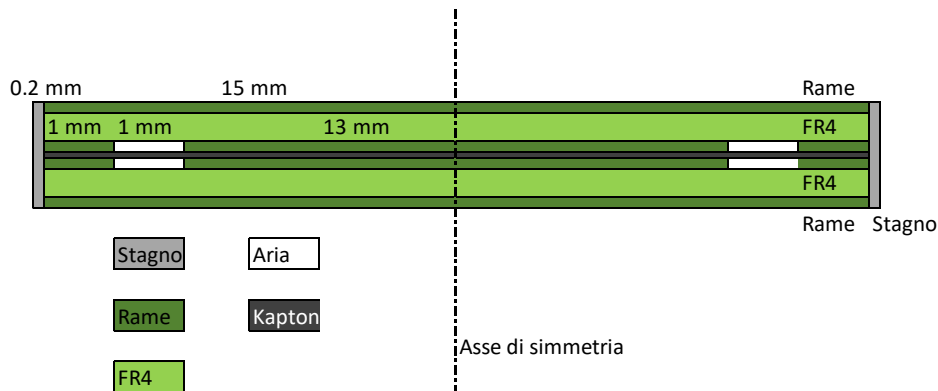


Figura 3.11 $\phi 30$ (13 – 1 – 1)

- **$\phi 30$ (13 – 1 – 1) NO kapton**: il sensore uguale a quello precedente con la differenza che in corrispondenza dell'intaglio nelle board non è presente lo strato dielettrico in kapton.

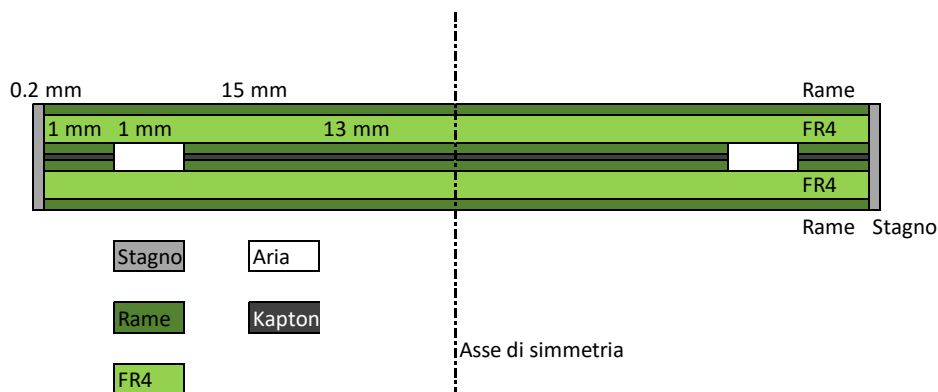


Figura 3.12 $\phi 30$ (13 – 1 – 1) NO kapton

- **$\phi 30 (9.5 - 1 - 4.5)$** : il sensore con diametro di 30 mm, intaglio di 1 mm posto tra 9.5 e 10.5 mm in direzione radiale dall'asse di rotazione.

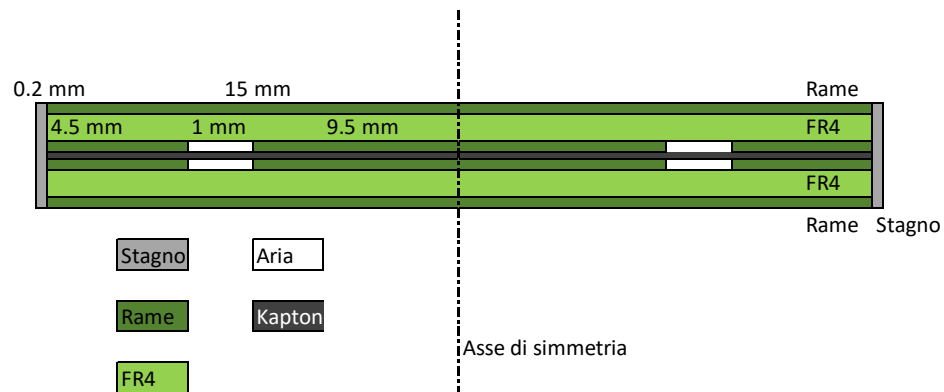


Figura 3.13 $\phi 30 (9.5 - 1 - 4.5)$

- **$\phi 40 (18 - 1 - 1)$** : il sensore con diametro pari a 40 mm, intaglio di 1 mm posto tra 18 e 19 mm dall'asse di rotazione in direzione radiale.

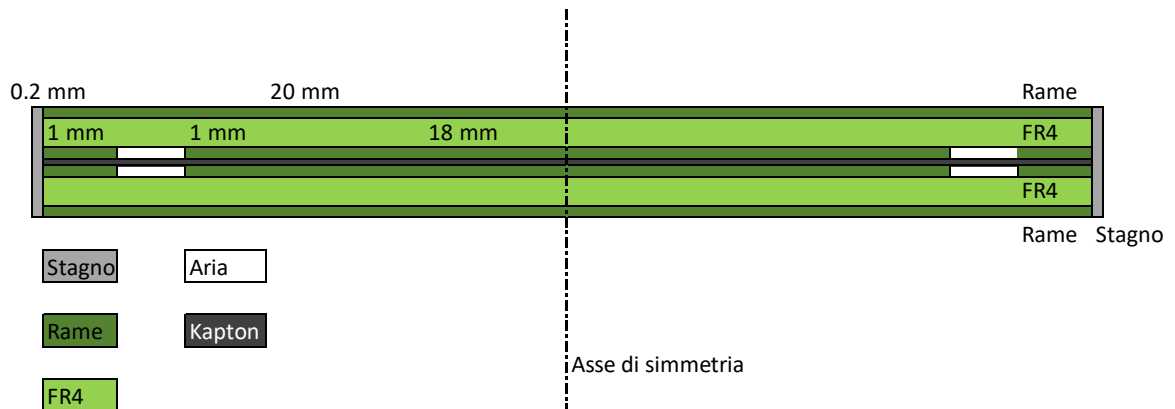


Figura 3.14 $\phi 40 (18 - 1 - 1)$

- **$\phi 40 (10.5 - 1 - 8.5)$** : il sensore capacitivo esistente come prototipo (Capitolo 3).

4 Risultati

Si riportano di seguito gli andamenti di deformazioni e tensioni lungo una sezione radiale da $x = 0$ (asse di simmetria cilindrica) a $x = 20\text{mm}$ (raggio esterno del sensore), relativi al momento di applicazione del carico ed a 4 anni dall'applicazione del carico.

4.1 Effetto dei fenomeni lenti: viscoelasticità e ritiro

4.1.1 Deformazioni nel kapton

Le deformazioni assiali nel kapton sono mostrate nelle figure seguenti.

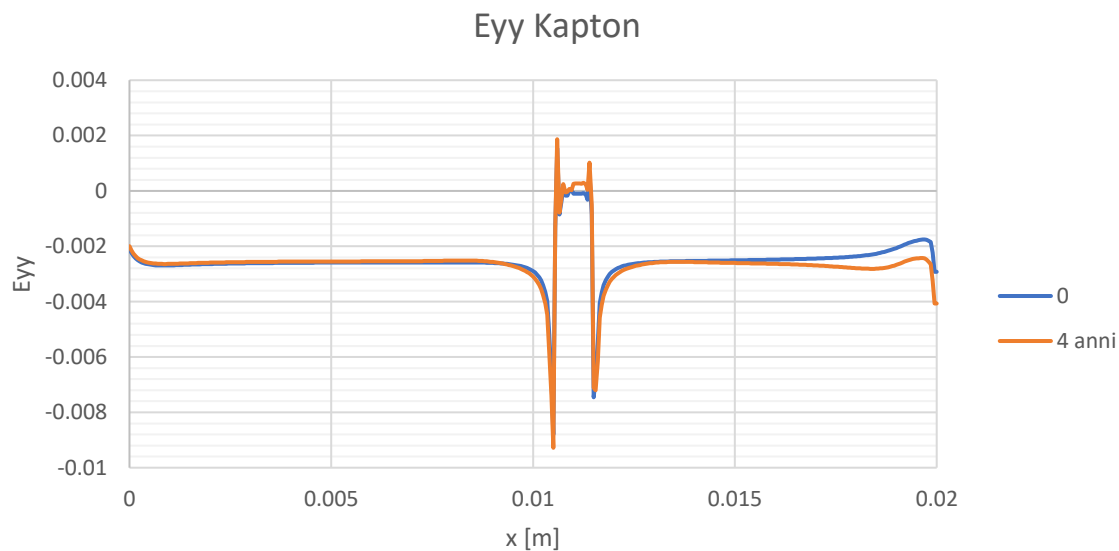


Figura 4.1 Eyy nel kapton al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

A causa dei fenomeni lenti, creep e ritiro, non si registrano delle variazioni significative ($<5\%$) tra il momento di applicazione del carico e 4 anni. All'interno dell'area sensiente (tra $x=0$ e $x=10.5\text{ mm}$) le deformazioni risultano essere piuttosto uniformi, ad eccezione della zona adiacente all'intaglio del rame, in cui risulta evidente l'effetto di disturbo generato dal gap.

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate nelle figure seguenti.

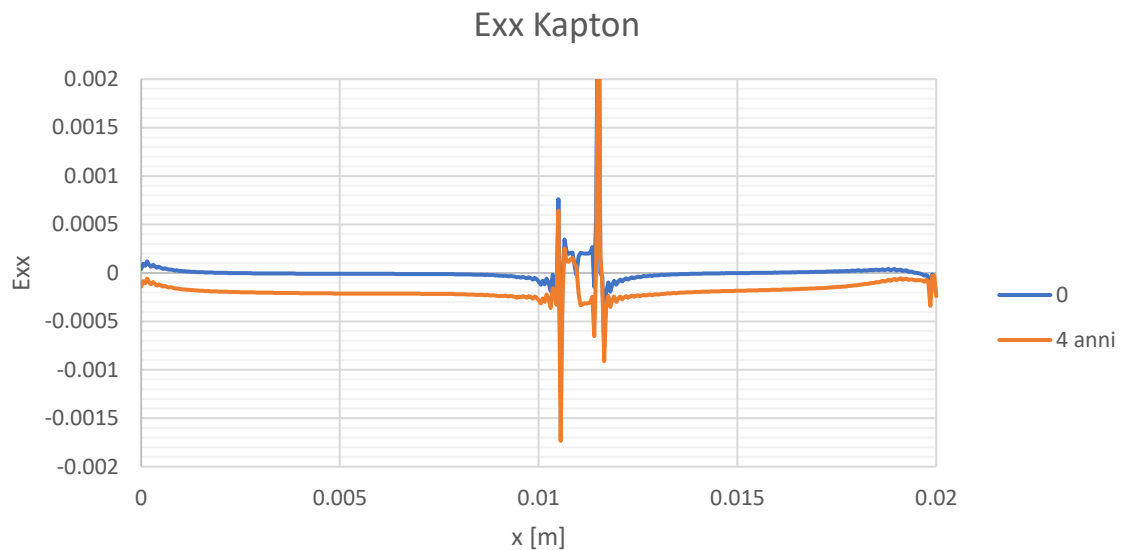


Figura 4.2 E_{xx} nel kapton al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

In direzione radiale, le deformazioni sono di entità decisamente ridotta rispetto a quelle assiali. Il comportamento è del tutto simile, con delle deformazioni uniformi all'interno dell'area senziante ed un disturbo notevole generato dall'intaglio del rame. Si registra una variazione di deformazione di compressione pari a circa $2e-4$ a causa degli effetti reologici.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate nelle figure seguenti.

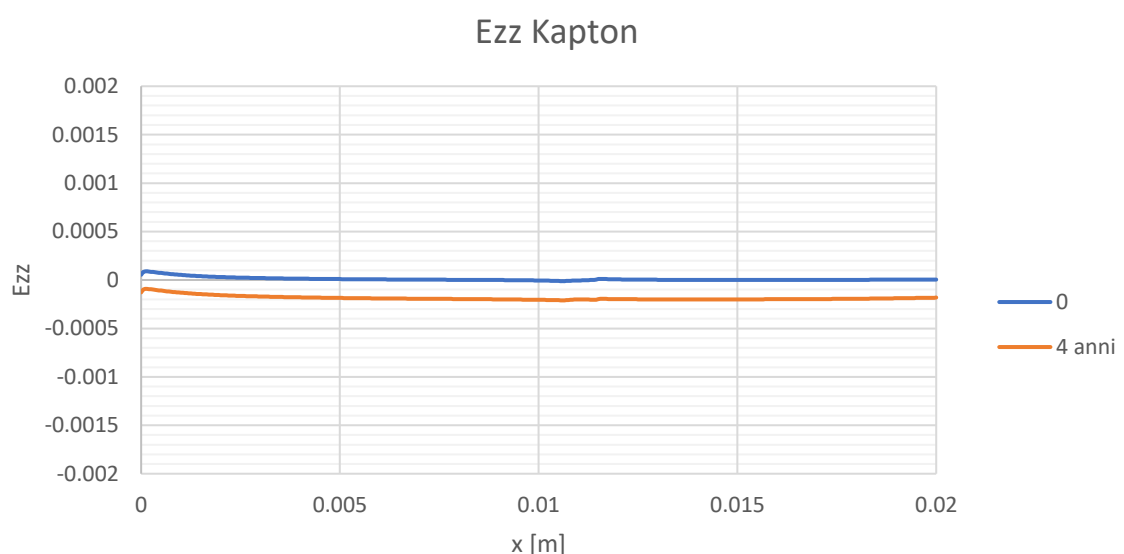


Figura 4.3 E_{zz} nel kapton al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

Anche in direzione circonferenziale si registra una variazione di deformazione di compressione pari a circa $2\text{e-}4$ a causa dei fenomeni lenti.

4.1.2 Tensioni nel kapton

Le tensioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.4.

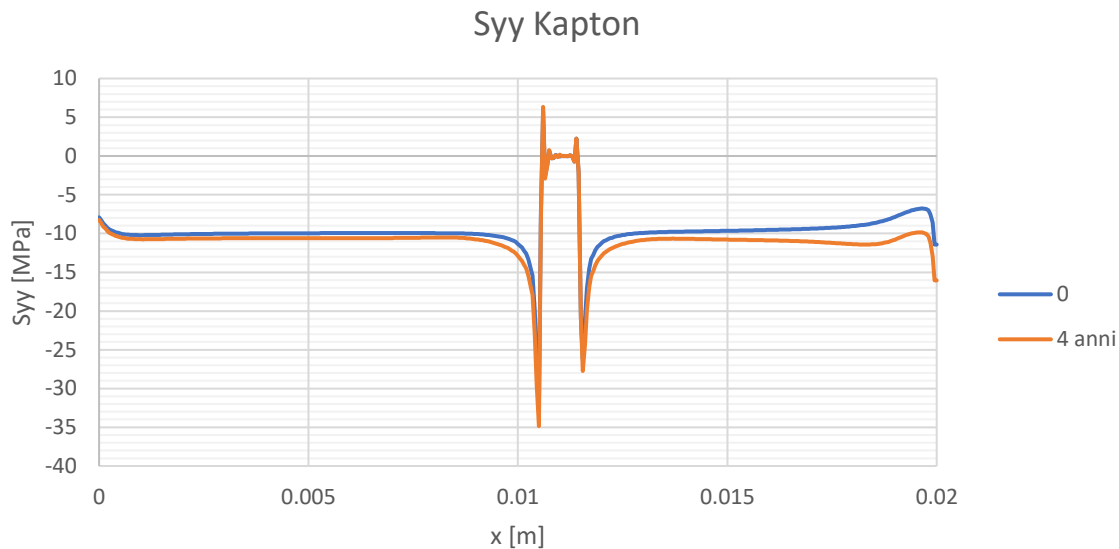


Figura 4.4 Syy nel kapton al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

A meno del modulo di elasticità, l'andamento delle tensioni rispecchia fedelmente l'andamento delle deformazioni. A causa dei fenomeni lenti, creep e ritiro, non si registrano delle variazioni significative tra il momento di applicazione del carico e 4 anni ($<5\%$).

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.5.

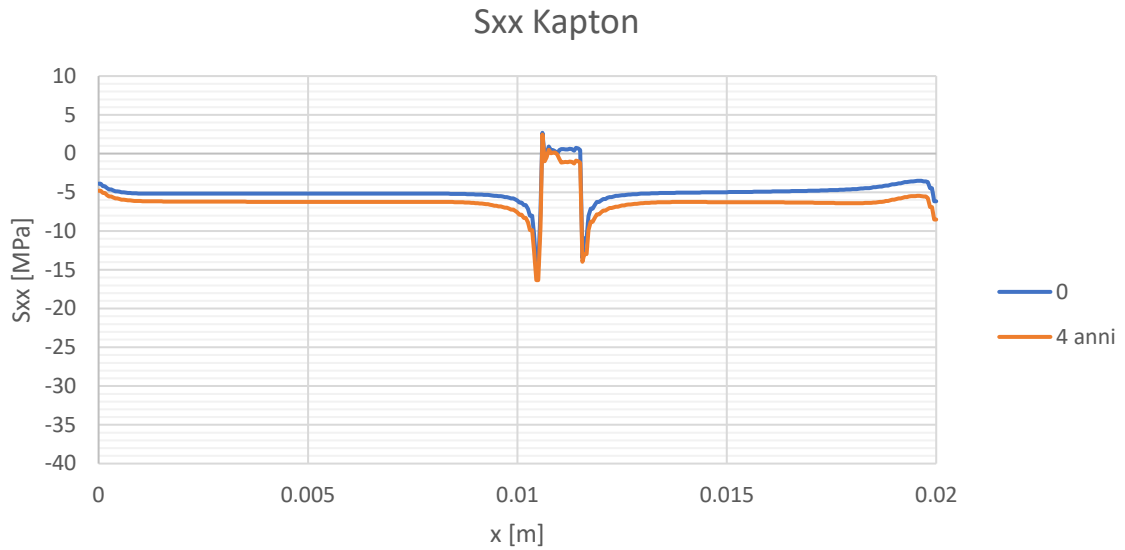


Figura 4.5 S_{xx} nel kapton al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

Si registra un aumento di compressione nel kapton in direzione radiale di circa 1 MPa a causa dei fenomeni lenti.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.6.

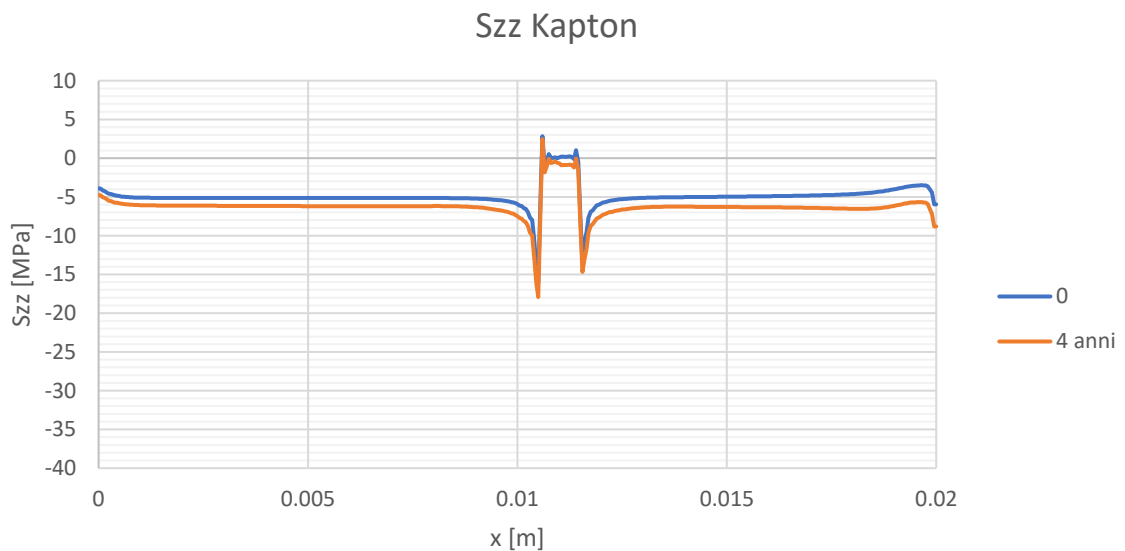


Figura 4.6 S_{zz} nel kapton al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

Si registra un aumento di compressione nel kapton in direzione circonferenziale di circa 1 MPa a causa dei fenomeni lenti.

4.1.3 Tensioni nell'FR4

Le tensioni assiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.7.

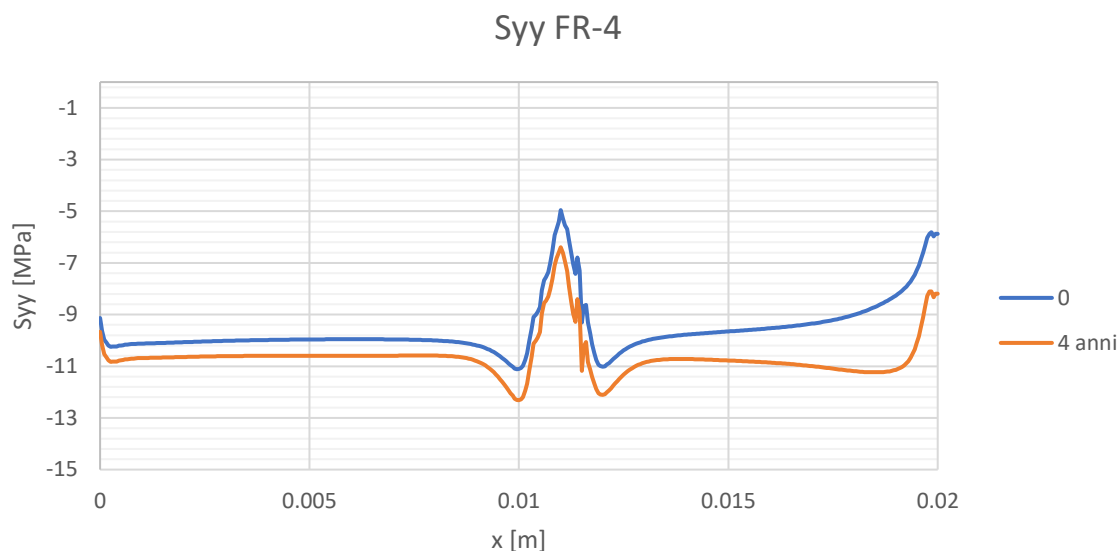


Figura 4.7 S_{yy} nell'FR4 al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

Anche nello strato di FR4 risulta evidente il disturbo provocato dall'intaglio nel rame, che porta lo strato di FR4 ad un comportamento di tipo flessionale. In direzione assiale, a causa dei fenomeni lenti, si registra un aumento di compressione di circa 2 MPa.

Le deformazioni radiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.8.

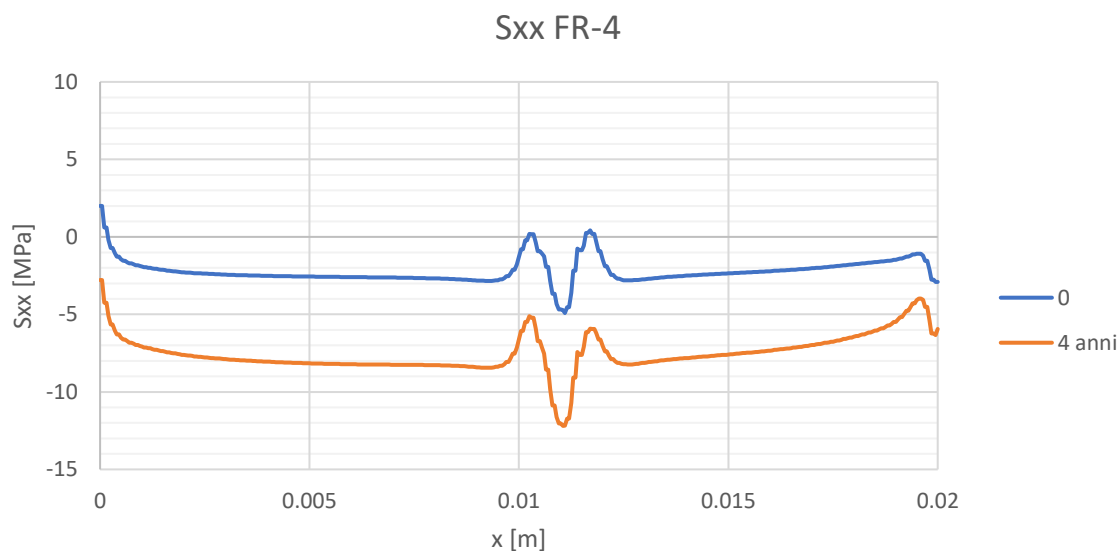


Figura 4.8 S_{xx} nell'FR4 al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

In direzione radiale, l'aumento di compressione è più marcato (5 MPa circa), triplicando lo stato di compressione nello strato di FR4.

Le deformazioni circonferenziali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.9.

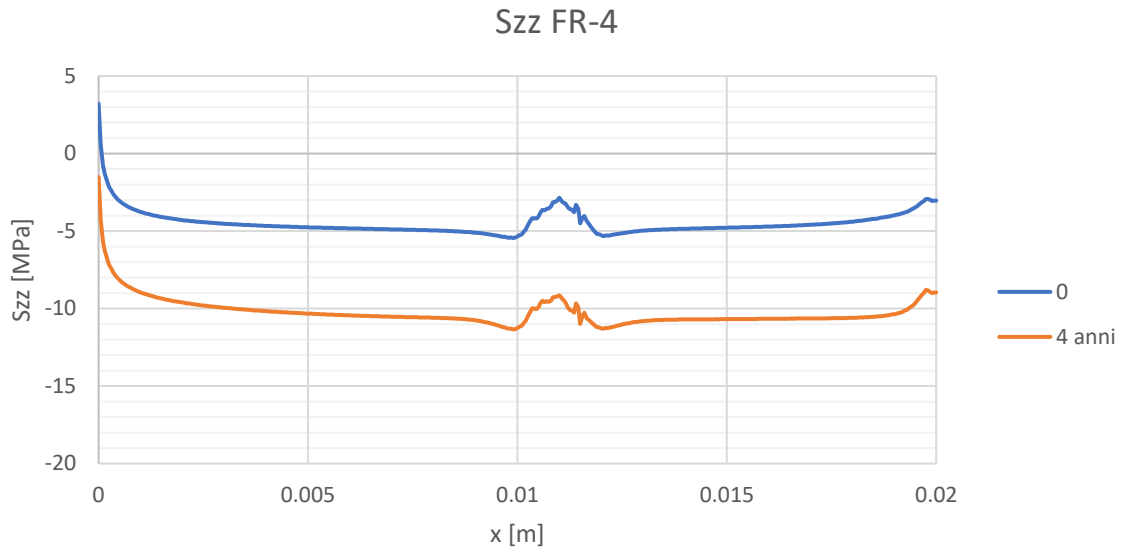


Figura 4.9 S_{zz} nell'FR4 kapton al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

A causa dei fenomeni lenti lo stato di compressione nello strato di FR4 in direzione circonferenziale raddoppia, subendo un aumento di circa 5 MPa.

4.1.4 Tensioni nella malta a distanza di 0.5 cm dal sensore

L'evoluzione di deformazioni e tensioni nella malta è stato analizzato in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione a distanza di 0.5 cm dal sensore:



Figura 4.10 Sezione malta posta a 0.5 cm dal sensore in direzione assiale Y

Le tensioni assiali sono mostrate in Figura 4.11.

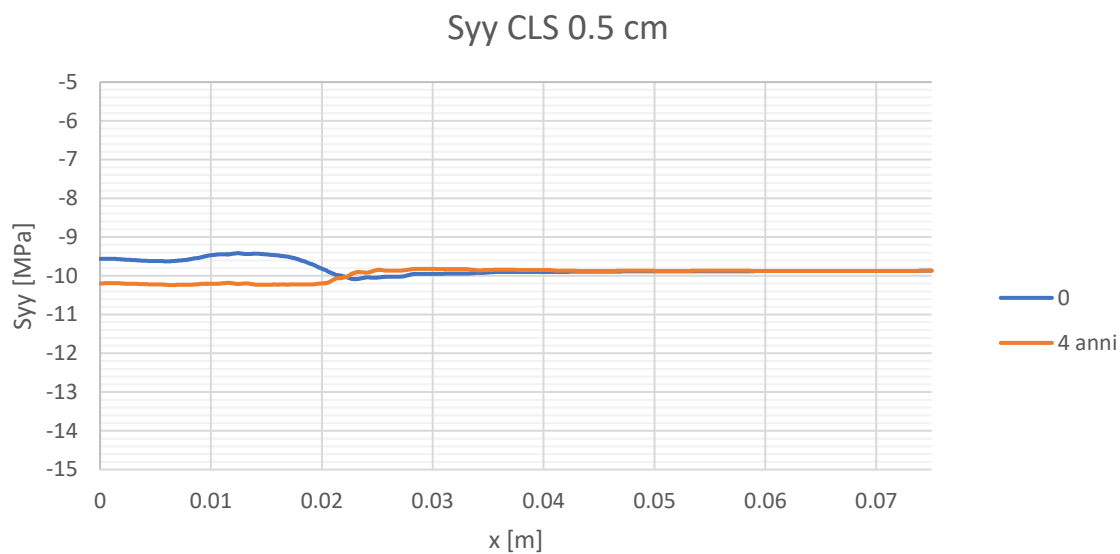


Figura 4.11 S_{yy} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

Si nota come all'allontanarsi dal centro del sensore, le tensioni all'interno della malta tendono ad uniformarsi al valore del carico applicato alle estremità, ovvero -10 MPa.

Le variazioni di tensioni dovute ai fenomeni lenti sono trascurabili (<5%).

Le deformazioni radiali nel CLS a 0.5 cm sono mostrate in Figura 4.12.

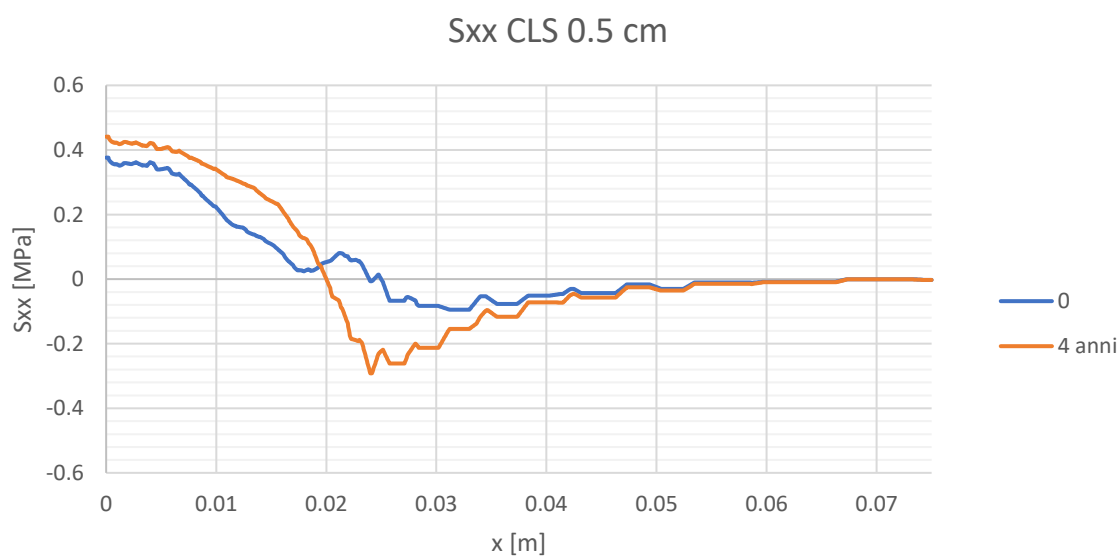


Figura 4.12 S_{xx} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

Si nota come all'allontanarsi dal centro del sensore, le tensioni radiali all'interno della malta tendono ad uniformarsi a un valore nullo. Tale comportamento è corretto in quanto il cilindro di malta è soggetto a uno stato monoassiale di tensione applicato in direzione Y, quindi la presenza di tensioni radiali è dovuta al solo disturbo del campo tensionale applicato, indotto dalla presenza del sensore. Si sottolinea inoltre che queste tensioni sono inferiori al 4% della tensione applicata in direzione Y.

Le deformazioni circonferenziali nel CLS a 0.5 cm sono mostrate in Figura 4.13.

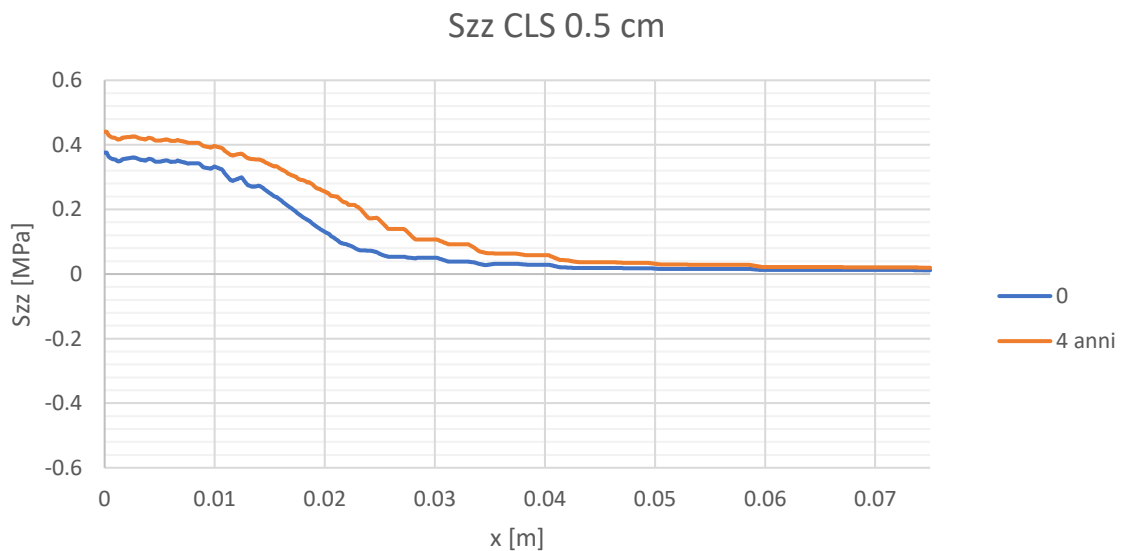


Figura 4.13 S_{zz} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico

Si nota come all'allontanarsi dal centro del sensore, sia in direzione radiale X, sia in direzione assiale Y, le tensioni all'interno della malta tendono ad uniformarsi a un valore nullo, come osservato per le tensioni radiali S_{xx} .

Questo comportamento è corretto in quanto il cilindro di malta è soggetto a uno stato monoassiale di tensione applicato in direzione Y, quindi la presenza di tensioni circonferenziali è dovuta al solo disturbo del campo tensionale applicato indotto dalla presenza del sensore.

Come già osservato per le tensioni radiali, le tensioni circonferenziali sono inferiori al 4% delle tensioni assiali applicate sulle facce circolari del provino di malta.

4.1.5 Evoluzione fessurazione nel tempo

Appena dopo l'applicazione della pressione di 10 MPa, quindi al tempo 0, si ha uno stato fessurativo mostrato in Figura 4.14:

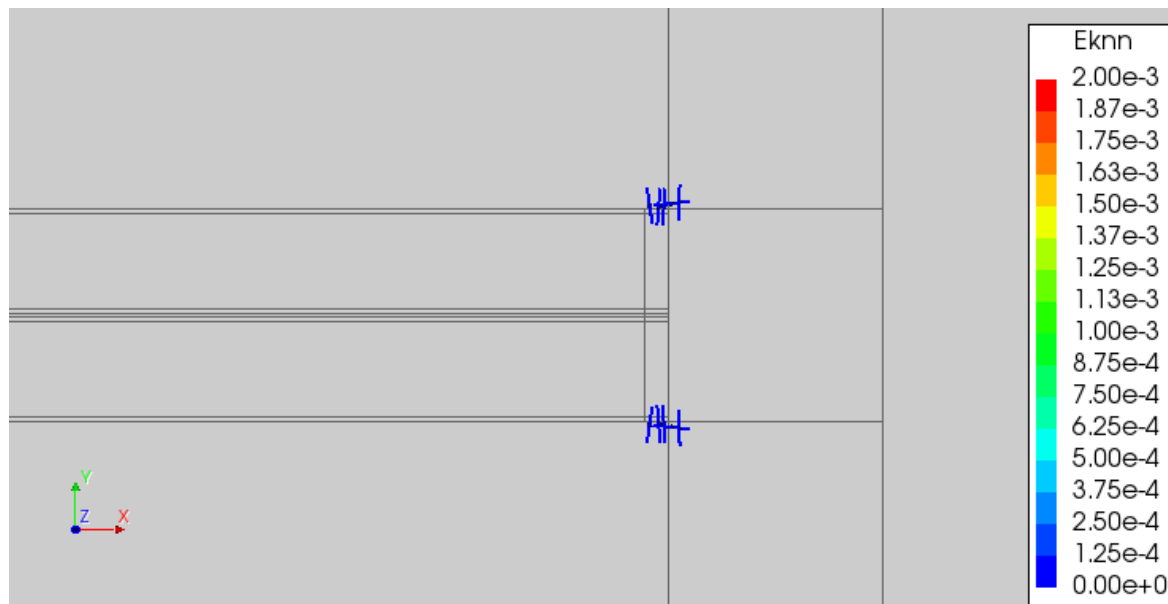


Figura 4.14 Stato fessurativo al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

Le fessure si localizzano in corrispondenza del raggio esterno del sensore. Si osserva l'assenza di fessure in corrispondenza dell'intaglio nelle board, come accadeva invece nel sensore prototipo (Paragrafo 2.6.3).

A distanza di un mese dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 4.15.

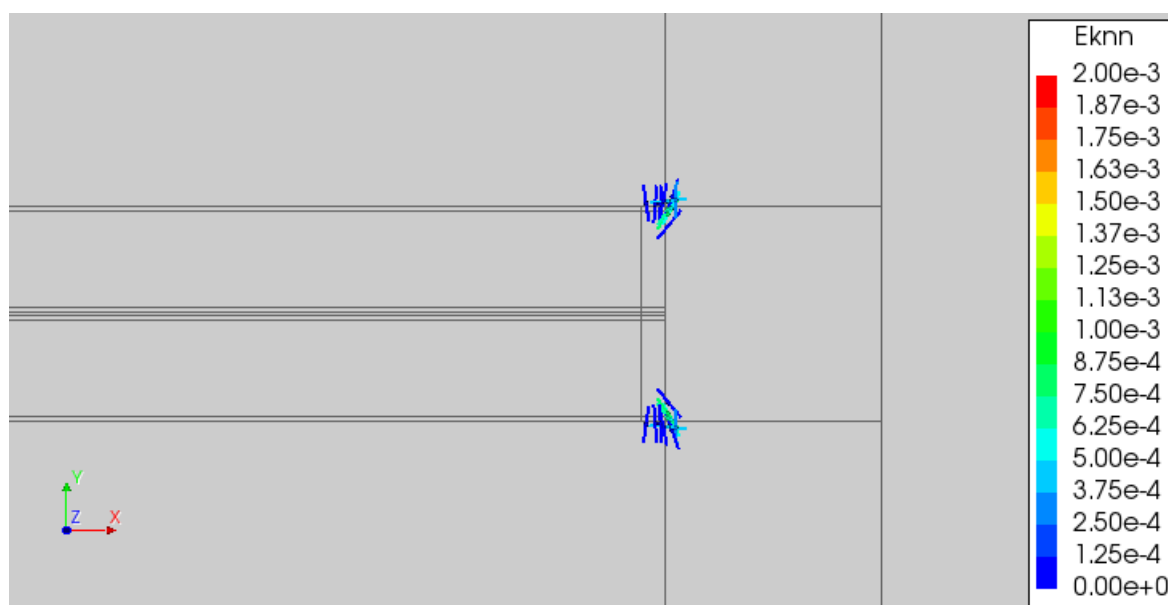


Figura 4.15 Stato fessurativo a distanza di 1 mese dall'applicazione del carico

A distanza di un anno dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 4.16:



Figura 4.16 Stato fessurativo a distanza di 1 anno dall'applicazione del carico

A distanza di quattro anni dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 4.17.

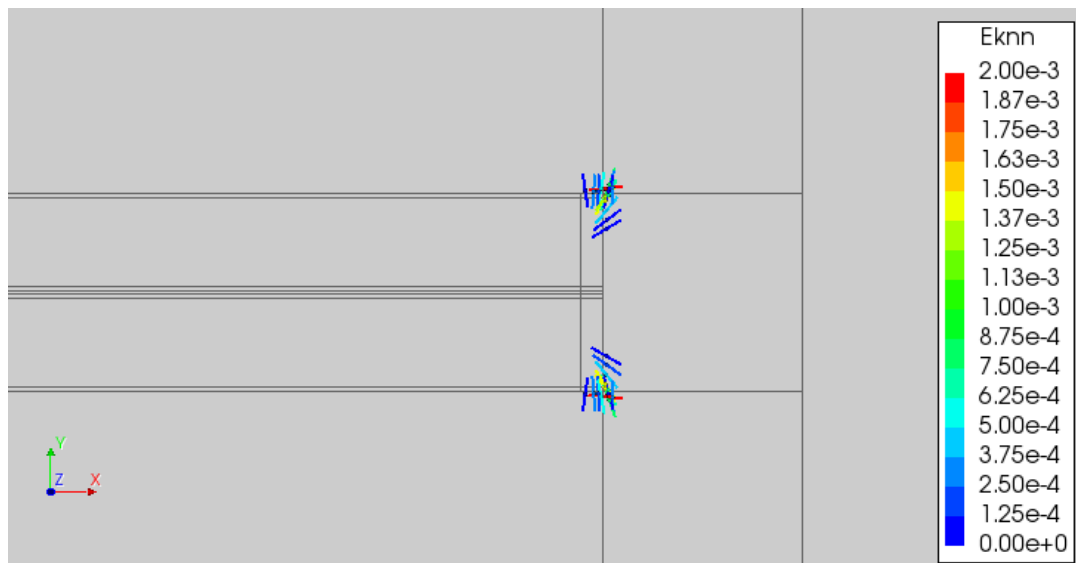


Figura 4.17 Stato fessurativo a distanza di 4 anni dall'applicazione del carico

Si nota come la fessurazione evolve nel corso del tempo, interessando solamente la zona di malta in corrispondenza del raggio esterno del sensore. Risulta evidente come lo stato fessurativo si evolva più velocemente nel primo anno per poi avanzare più lentamente negli anni successivi. La fessurazione si manifesta con una deformazione normale al piano delle fessure $\epsilon_{k,nn}$ massima pari a circa $2.00e-3$. Anche in questo caso la deformazione media è di circa $1e-4$, alla quale corrisponde un'apertura delle fessure trascurabile.

4.1.6 Analisi area senziente

In Tabella 4.1 si riportano le variazioni di volume del kapton dovute alla deformazione assiale. Si riporta inoltre la media delle deformazioni assiali, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico.

Nell'analisi è stata presa in considerazione solo la zona senziente del sensore, cioè quella che si trova tra l'asse di rotazione e l'intaglio nel rame.

Tabella 4.1 Analisi area senziente

Sensore	Tempo	Var. Volume [mm ³]	Raggio [mm]	Area senziente [mm ²]	Var. spessore [%]	Media Eyy	Dev. St.	C.O.V.
Originale	0	-2.42E-02	10.5	346	-0.28%	-2.70E-03	5.60E-04	-21%
	4 anni	-2.43E-02	10.5	346	-0.28%	-2.68E-03	6.47E-04	-24%

Tra l'istante di applicazione del carico e 4 anni, lo strato di dielettrico non subisce delle variazioni significative a causa dei fenomeni lenti, così come la variazione di spessore.

La deviazione standard fornisce un'indicazione sulla variazione della deformazione assiale nello spazio e subisce un lieve aumento a 4 anni, che si riflette poi sul C.O.V.

Il coefficiente di variazione, nell'ultima colonna, espresso come il rapporto tra deviazione standard e la media fornisce un'indicazione adimensionale sulla variazione delle deformazioni nel sensore. Tra il tempo iniziale e 4 anni dall'applicazione del carico il coefficiente di variazione subisce un aumento del 3%, conseguente all'aumento della deviazione standard.

4.2 Effetto di diversi spessori dello strato dielettrico

Si riportano tensioni e deformazioni nei materiali dei sensori, al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico ed a quattro anni dall'applicazione del carico, considerando nell'analisi sia il creep che il ritiro.

4.2.1 Deformazioni nel kapton

Le deformazioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.18 e Figura 4.19.

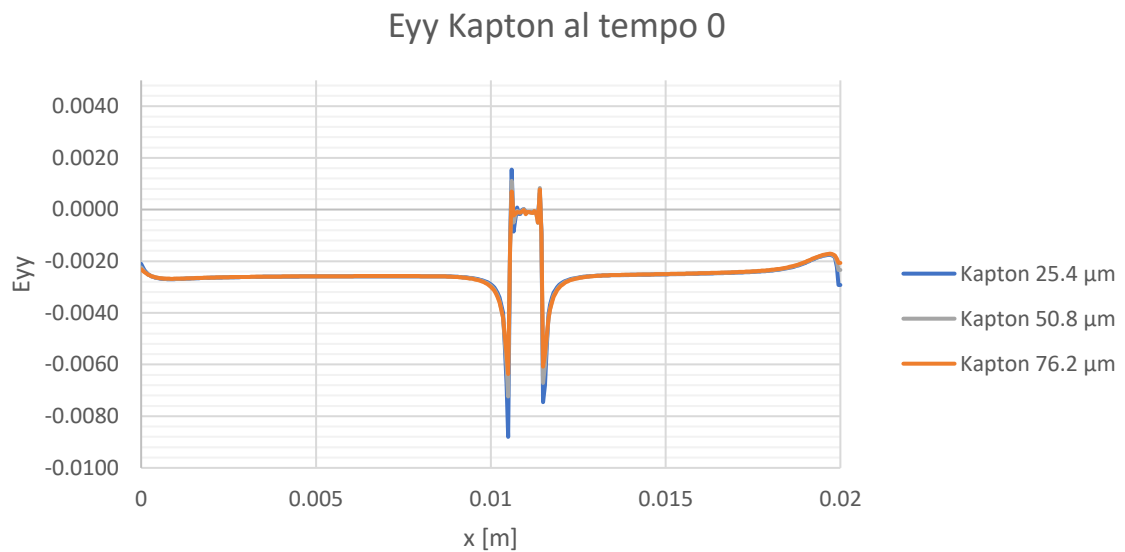


Figura 4.18 Eyy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

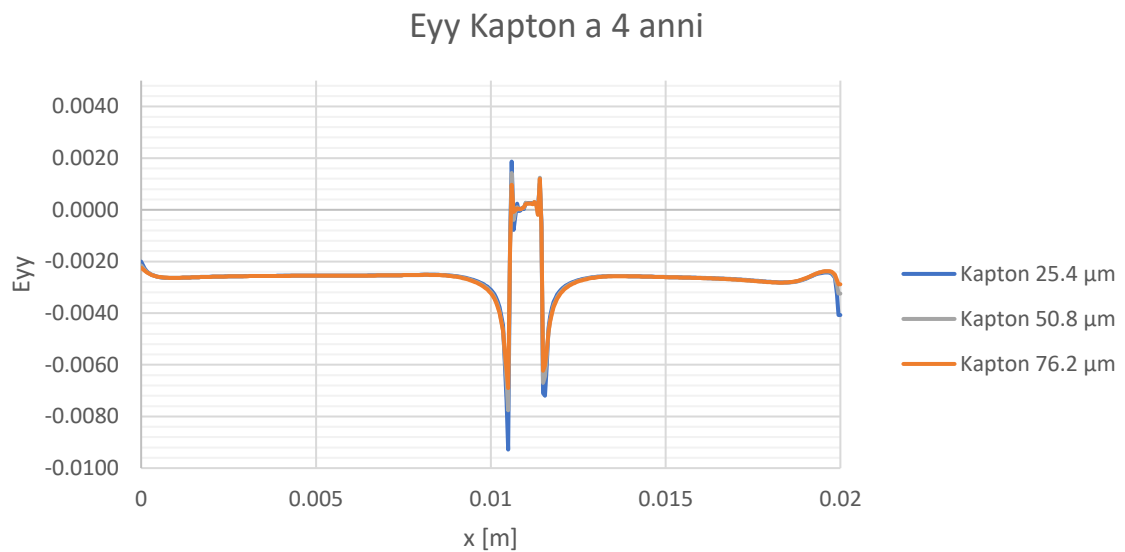


Figura 4.19 Eyy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.2 Max e Min Eyy nel kapton

Sensore	Tempo	Eyy	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	1.55E-03	-8.80E-03
	4 anni	1.87E-03	-9.28E-03
Kapton 50.8 μm	0	1.11E-03	-7.24E-03
	4 anni	1.43E-03	-7.76E-03
Kapton 76.2 μm	0	7.74E-04	-6.37E-03
	4 anni	1.20E-03	-6.90E-03

All'aumentare dello spessore dello strato di kapton i picchi di deformazioni assiali negative diminuiscono. A quattro anni si passa infatti da deformazioni assiali massime pari a -9.28×10^{-3} per il sensore con lo strato di kapton di $25.4 \mu\text{m}$, a deformazioni pari a -6.9×10^{-3} per il sensore con lo strato di kapton pari a $76.2 \mu\text{m}$. Con una riduzione quindi del 25% circa.

L'area sensiente non è influenzata da variazioni di deformazione a causa della variazione dello spessore dello strato dielettrico in kapton.

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.20 e Figura 4.21.

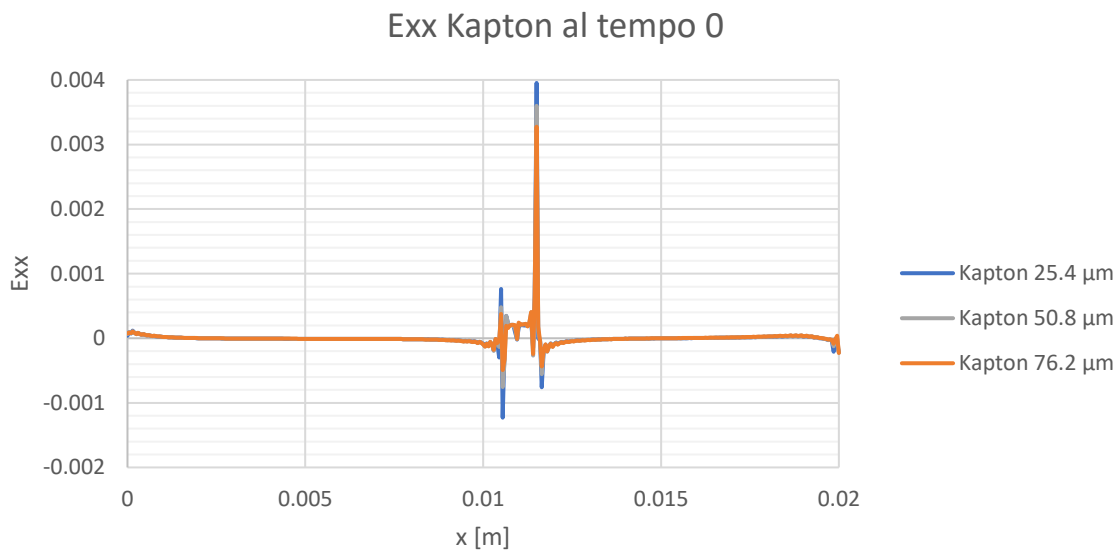


Figura 4.20 Exx nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

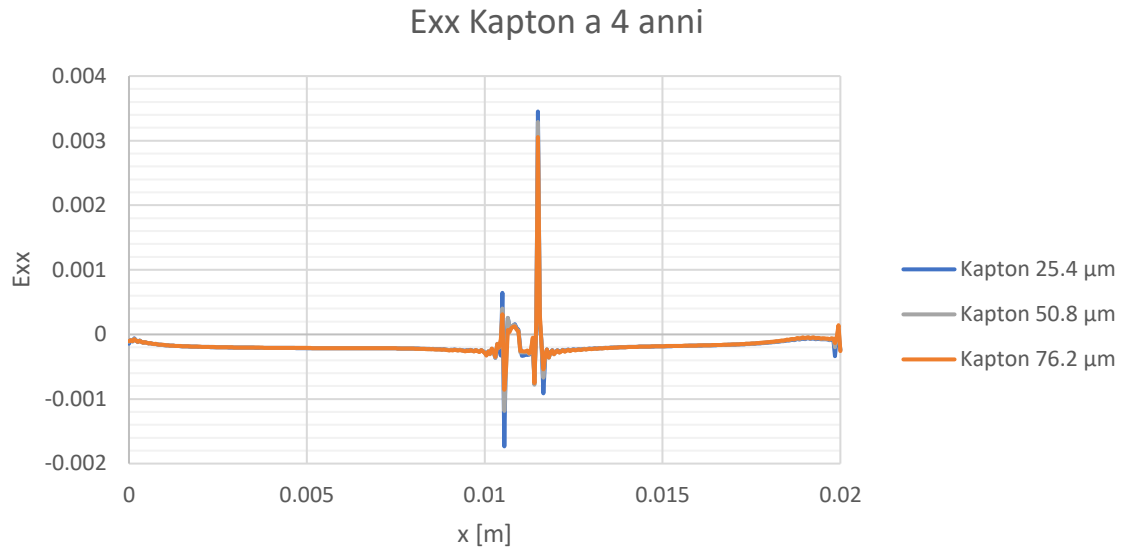


Figura 4.21 Exx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.3 Max e Min Exx nel kapton

Sensore	Tempo	Exx	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	3.95E-03	-1.23E-03
	4 anni	3.45E-03	-1.73E-03
Kapton 50.8 μm	0	3.60E-03	-7.55E-04
	4 anni	3.29E-03	-1.18E-03
Kapton 76.2 μm	0	3.28E-03	-4.92E-04
	4 anni	3.06E-03	-8.58E-04

Anche in questo caso all'aumentare dello spessore di kapton si ha una diminuzione dei picchi di deformazioni radiali.

La differenza è più marcata nelle deformazioni negative. A quattro anni si passa infatti da deformazioni radiali pari a $-1.73\text{e-}3$ per il sensore con lo strato di kapton di $25.4\text{ }\mu\text{m}$, a deformazioni pari a $-8.58\text{e-}4$ per il sensore con lo strato di kapton pari a $76.2\text{ }\mu\text{m}$. Con una riduzione quindi del 50% circa.

Per le deformazioni positive, a 4 anni si passa da deformazioni pari a $3.45\text{e-}3$ per il sensore con lo strato di kapton di $25.4\text{ }\mu\text{m}$, a deformazioni pari a $3.06\text{e-}3$ per il sensore con lo strato di kapton pari a $76.2\text{ }\mu\text{m}$. Con una riduzione quindi del 11% circa.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.22 e Figura 4.23.

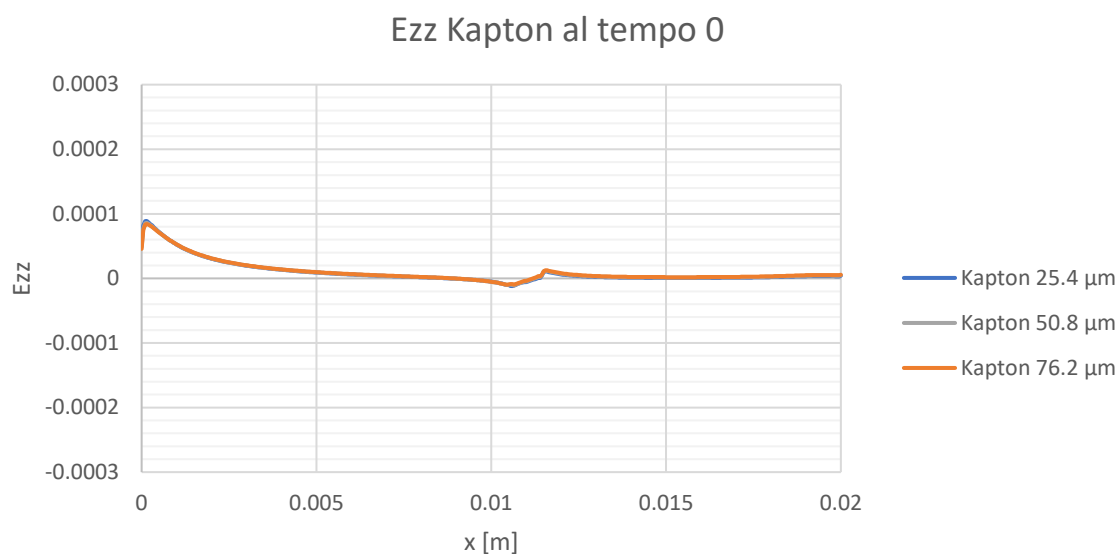


Figura 4.22 Ezz nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

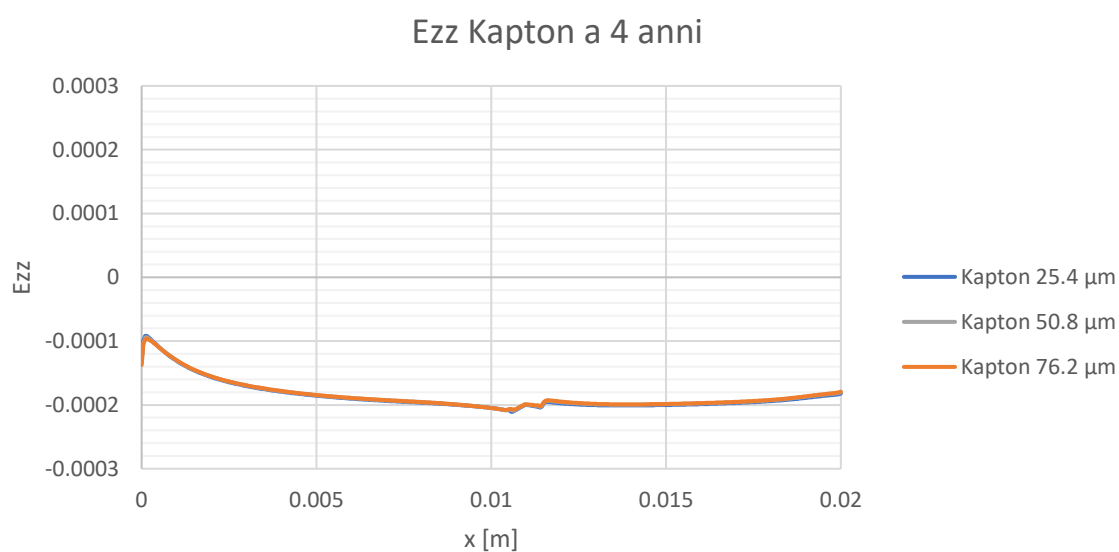


Figura 4.23 Ezz nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.4 Max e Min Ezz nel kapton

Sensore	Tempo	Ezz	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	8.87E-05	-1.19E-05
	4 anni	-9.17E-05	-2.11E-04
Kapton 50.8 μm	0	8.60E-05	-1.10E-05
	4 anni	-9.39E-05	-2.09E-04
Kapton 76.2 μm	0	8.42E-05	-9.68E-06

	4 anni	-9.59E-05	-2.08E-04
--	--------	-----------	-----------

Nelle deformazioni radiali non si riscontra un'influenza dello spessore dello strato di kapton, le curve infatti risultano praticamente sovrapposte sia al tempo iniziale che a 4 anni dall'applicazione del carico.

4.2.2 Tensioni nel Kapton

Le tensioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.24 e Figura 4.25.

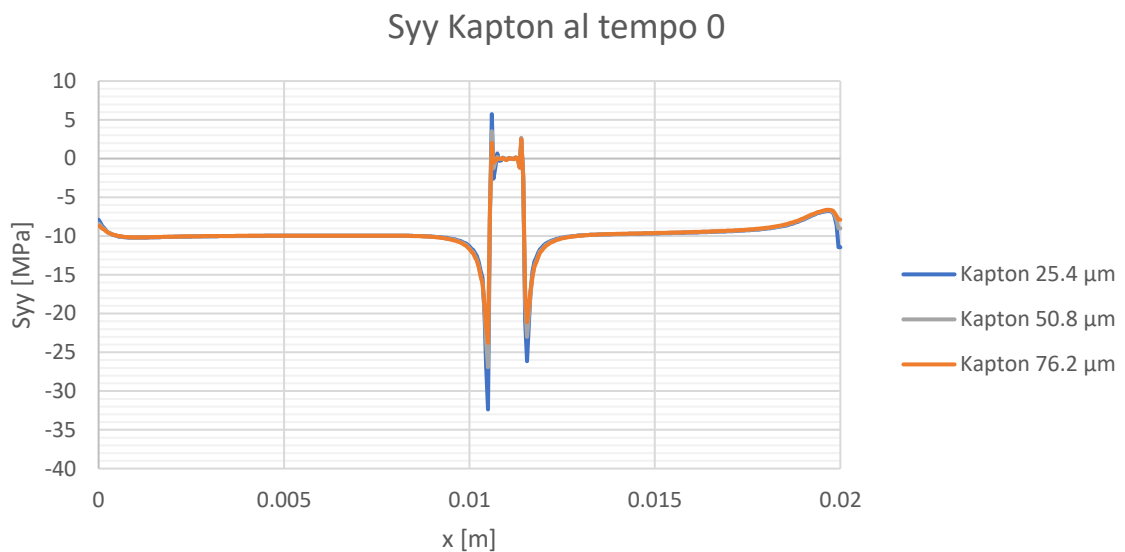


Figura 4.24 Syy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

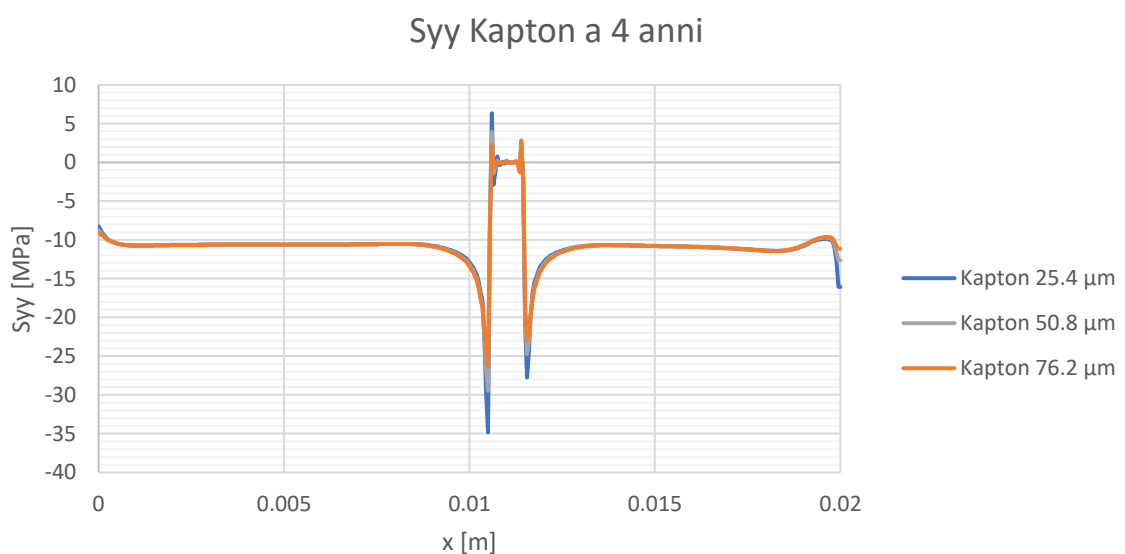


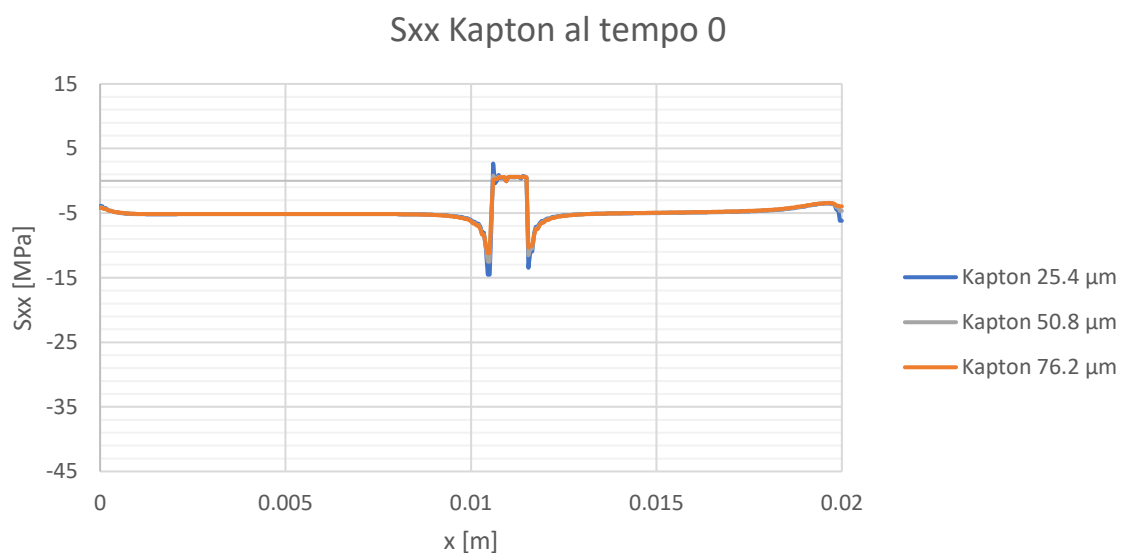
Figura 4.25 Syy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.5 Max e Min S_{yy} nel kapton

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	5.74	-32.37
	4 anni	6.34	-34.85
Kapton 50.8 μm	0	3.54	-26.92
	4 anni	3.93	-29.49
Kapton 76.2 μm	0	2.50	-23.78
	4 anni	2.71	-26.35

Ovviamente nelle tensioni assiali si rispecchia il comportamento già visto nelle deformazioni assiali, con dei picchi che si riducono, a 4 anni, di circa il 25% nel sensore con lo strato di kapton più spesso.

Le tensioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.26 e Figura 4.27.

Figura 4.26 S_{xx} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

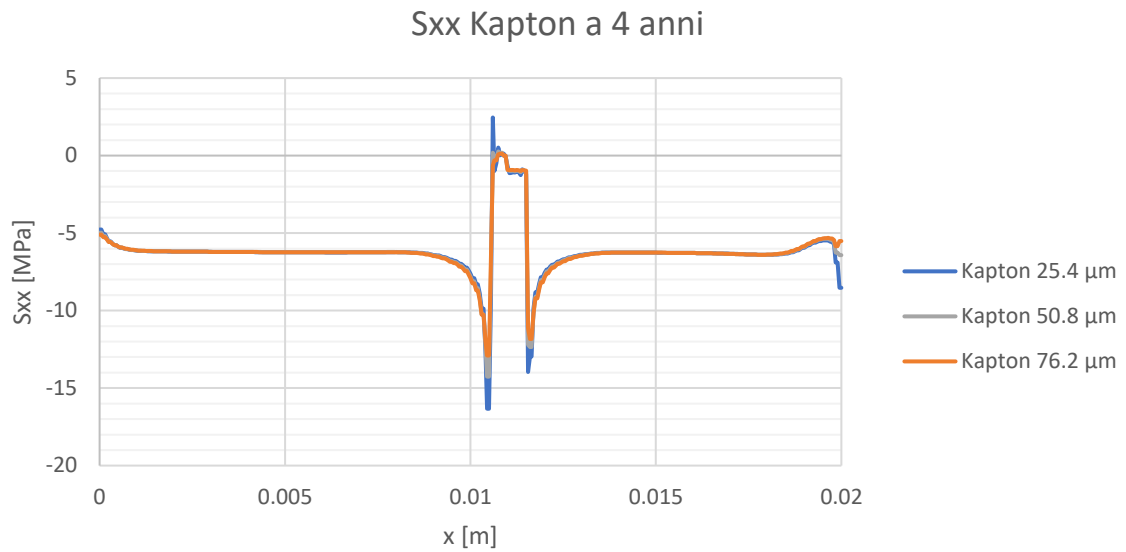


Figura 4.27 Sxx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.6 Max e Min Sxx nel kapton

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	2.68	-14.53
	4 anni	2.46	-16.33
Kapton 50.8 μm	0	0.81	-12.52
	4 anni	0.26	-14.26
Kapton 76.2 μm	0	0.63	-11.20
	4 anni	0.12	-12.90

Anche per le tensioni radiali si rispecchia il comportamento già visto nelle deformazioni radiali, con dei picchi che si riducono, a 4 anni, di circa il 21% nel sensore con lo strato di kapton più spesso.

Le tensioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.28 e Figura 4.29.

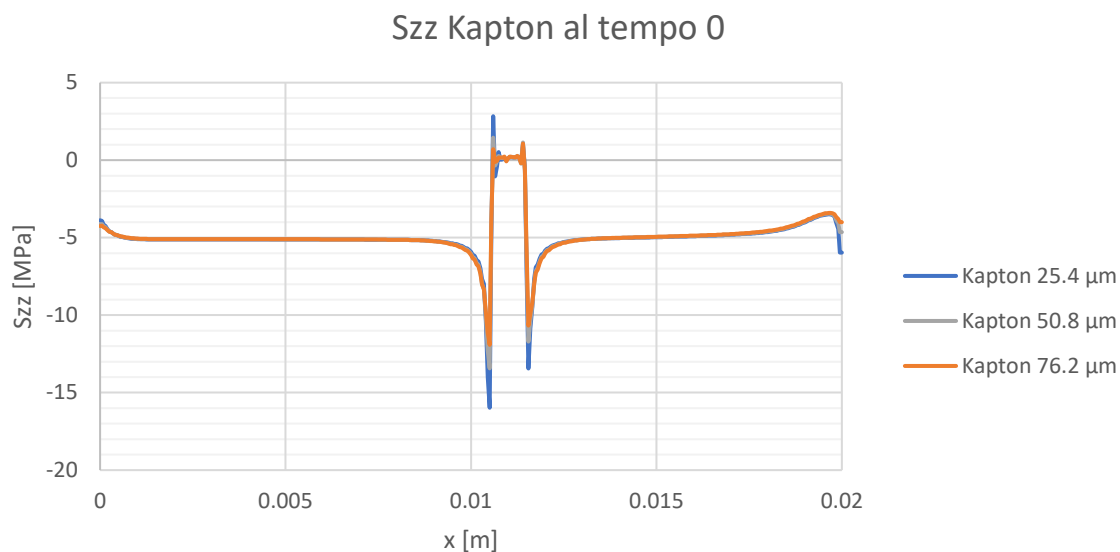


Figura 4.28 S_{zz} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

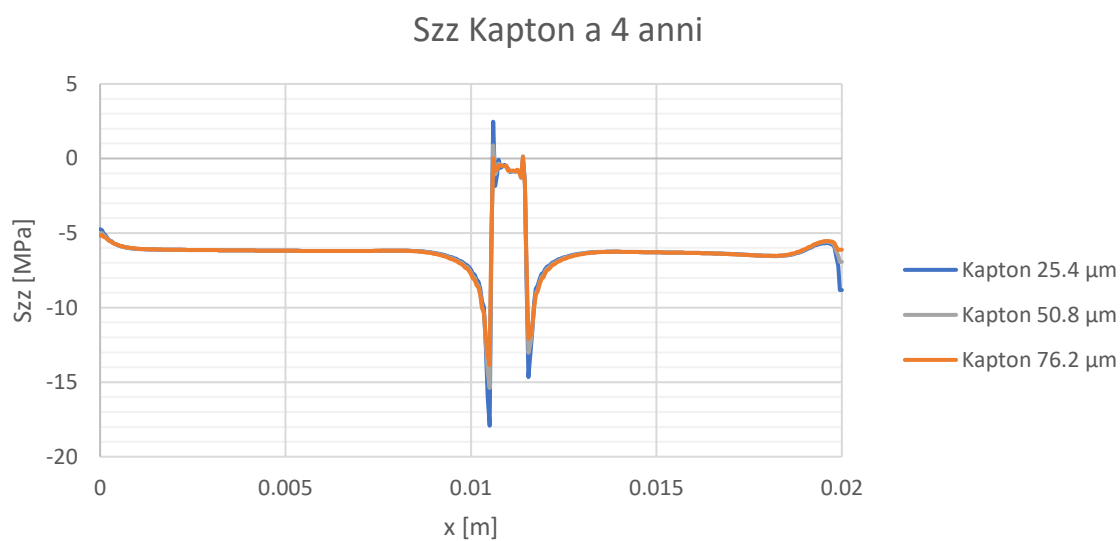


Figura 4.29 S_{zz} nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.7 Max e Min S_{zz} nel kapton

Sensore	Tempo	S_{zz} [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	2.83	-15.97
	4 anni	2.46	-17.92
Kapton 50.8 μm	0	1.45	-13.43
	4 anni	0.88	-15.39
Kapton 76.2 μm	0	1.06	-11.92

	4 anni	0.10	-13.86
--	--------	------	--------

4.2.3 Tensioni nell'FR4

Le tensioni assiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.30 e Figura 4.31.

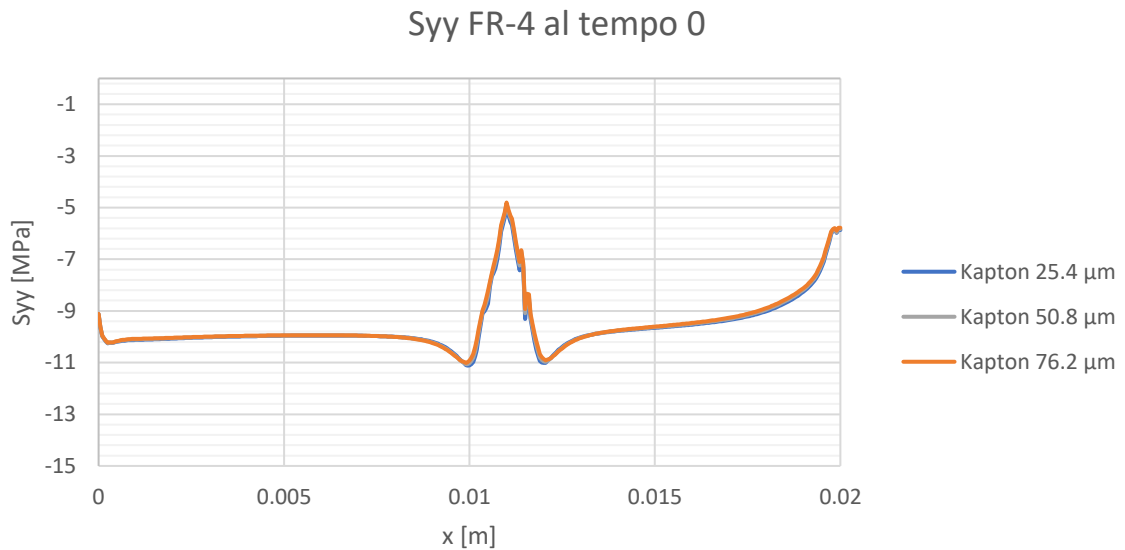


Figura 4.30 Syy nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

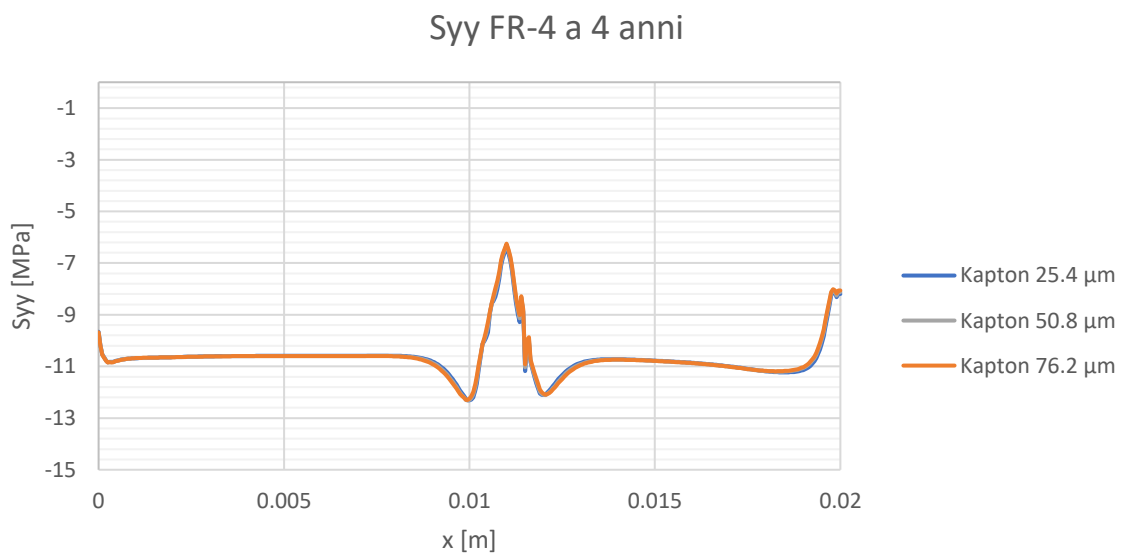


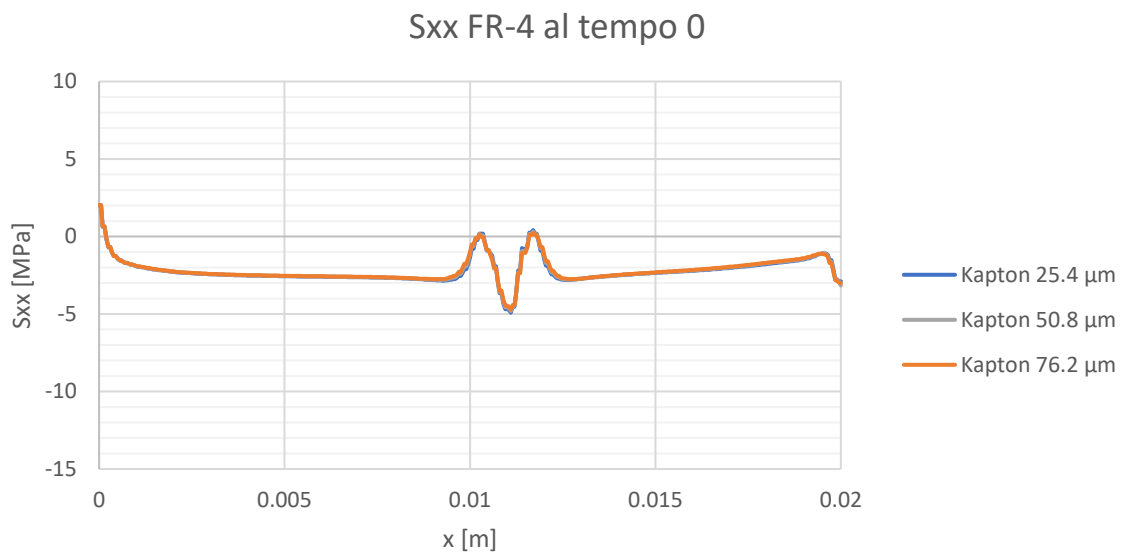
Figura 4.31 Syy FR4a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.8 Max e Min S_{yy} FR4

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	-4.96	-11.12
	4 anni	-6.39	-12.31
Kapton 50.8 μm	0	-4.85	-11.07
	4 anni	-6.29	-12.32
Kapton 76.2 μm	0	-4.80	-11.01
	4 anni	-6.25	-12.30

Lo spessore dello strato di kapton non ha alcuna influenza sul comportamento dello strato di FR4. Si riscontra dai grafici infatti un comportamento identico, con le curve essenzialmente sovrapposte, con massimi e minimi, a 4 anni, rispettivamente di -6.3 e -12.3 MPa circa.

Le tensioni radiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.32 e Figura 4.33.

Figura 4.32 S_{xx} nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

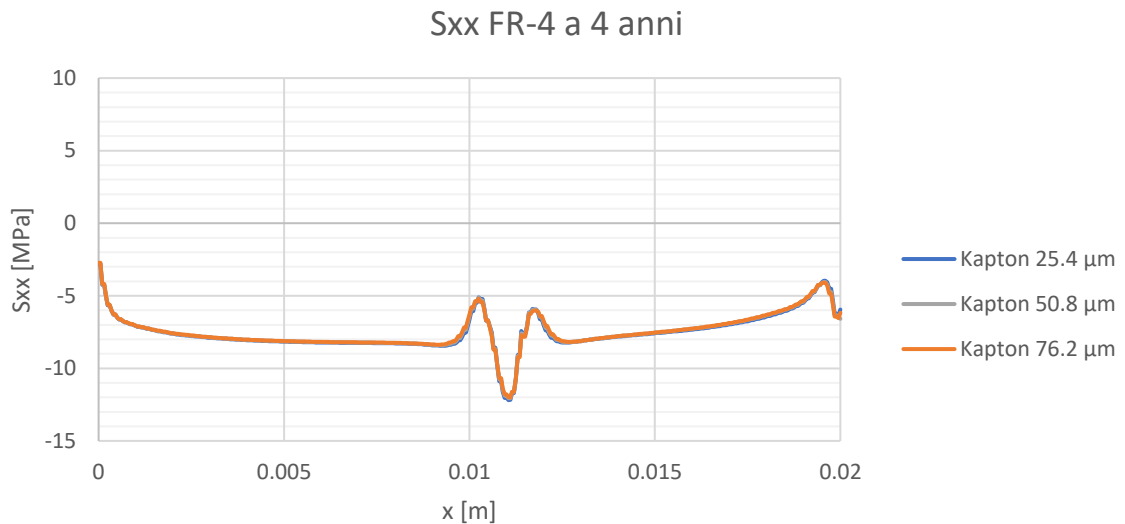


Figura 4.33 Sxx nel FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.9 Max e Min Sxx FR4

		Sxx [MPa]	
Sensore	Tempo	Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	2.00	-4.91
	4 anni	-2.78	-12.19
Kapton 50.8 μm	0	2.02	-4.80
	4 anni	-2.75	-12.06
Kapton 76.2 μm	0	2.03	-4.73
	4 anni	-2.73	-12.01

Le tensioni circonferenziali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.34 e Figura 4.35.

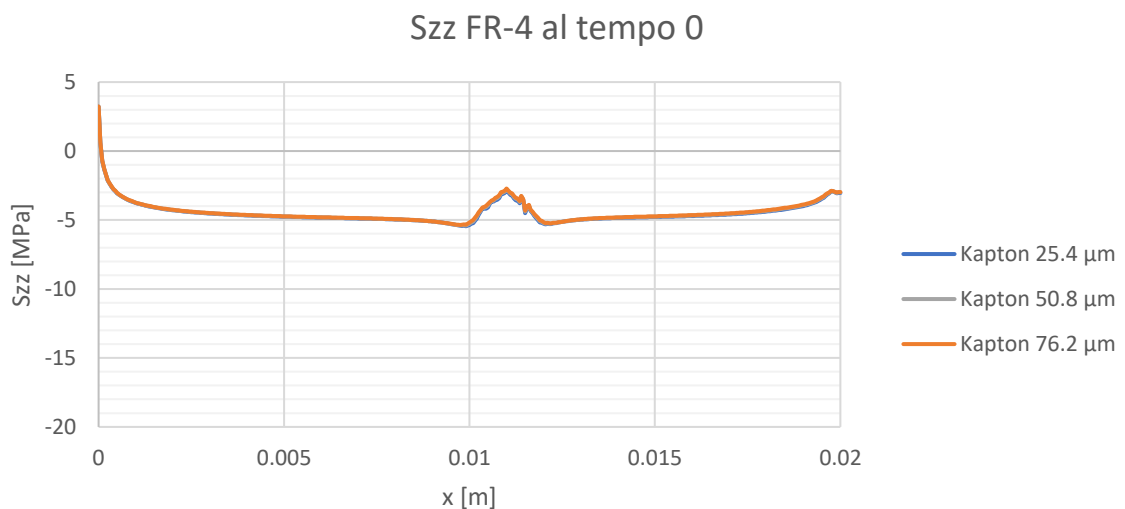


Figura 4.34 Szz FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

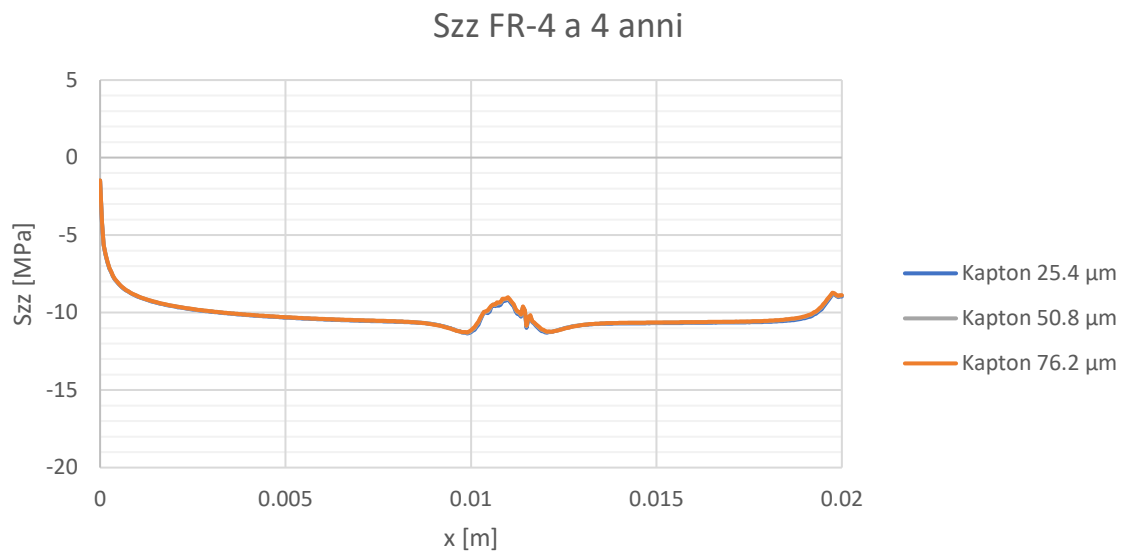


Figura 4.35 Szz FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.10 Max e Min Szz FR4

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	3.22	-5.45
	4 anni	-1.51	-11.35
Kapton 50.8 μm	0	3.22	-5.40
	4 anni	-1.48	-11.31
Kapton 76.2 μm	0	3.23	-5.36
	4 anni	-1.47	-11.28

Anche nelle tensioni radiali e circonferenziali non si riscontra alcuna influenza dello spessore dello strato di kapton.

4.2.4 Tensioni nella malta

Le tensioni assiali in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione posta nella malta a 0.5 cm dal sensore sono mostrate in Figura 4.36 e Figura 4.37.

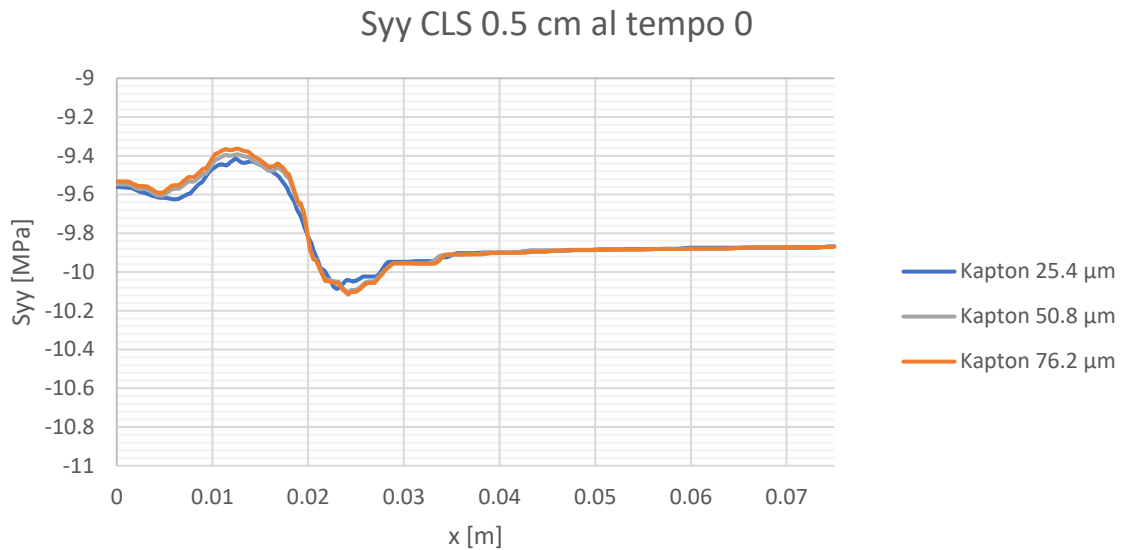


Figura 4.36 Syy CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

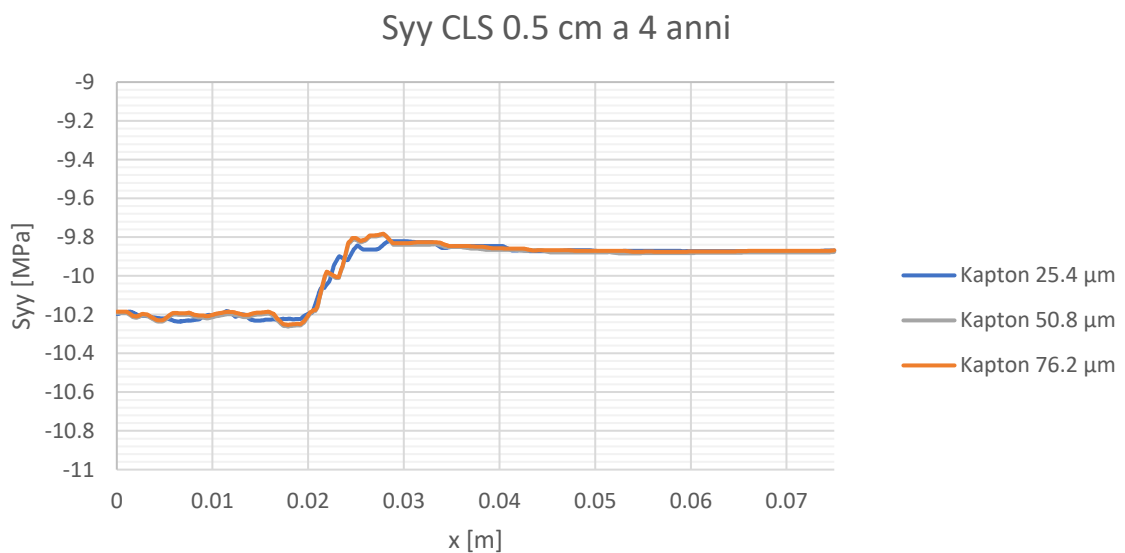


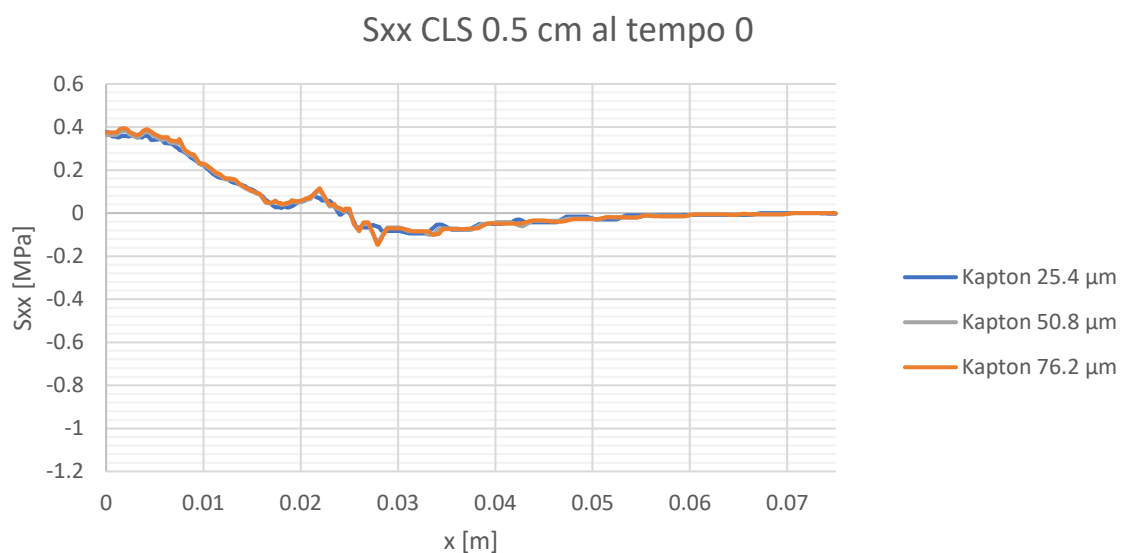
Figura 4.37 Syy CLS a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.11 Max e Min S_{yy} CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	-9.41	-10.09
	4 anni	-9.82	-10.24
Kapton 50.8 μm	0	-9.39	-10.11
	4 anni	-9.78	-10.26
Kapton 76.2 μm	0	-9.36	-10.12
	4 anni	-9.78	-10.25

Come per l'FR4, anche per la malta posta ad una sezione distante 0.5 cm in direzione assiale dal sensore, lo spessore dello strato di kapton non ha alcuna influenza sul comportamento, che si presenta privo di picchi significativi.

Le tensioni radiali sono riportate in Figura 4.38 e Figura 4.39.

Figura 4.38 S_{xx} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

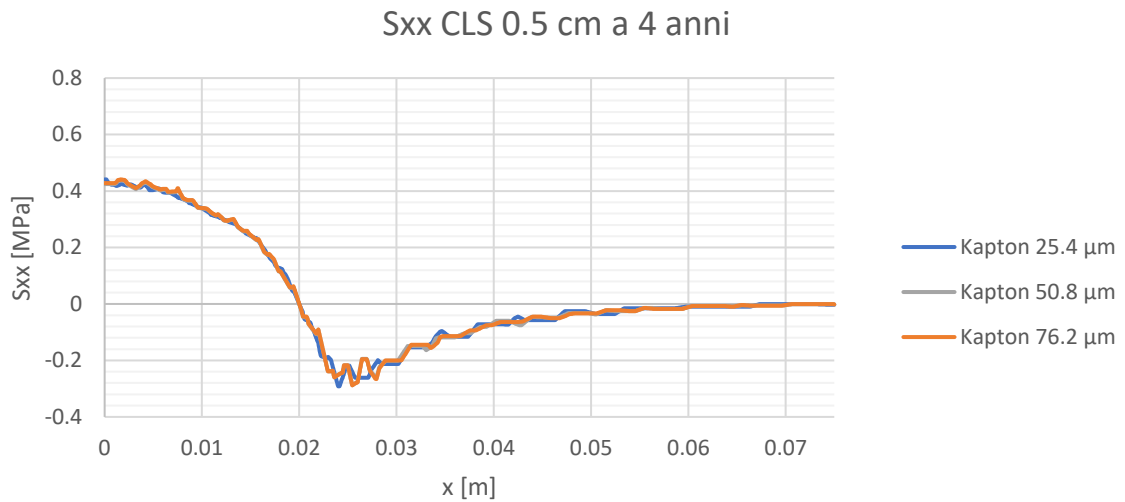


Figura 4.39 S_{xx} nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.12 Max e Min S_{xx} CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	S_{xx} [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	0.38	-0.09
	4 anni	0.44	-0.29
Kapton 50.8 μm	0	0.38	-0.14
	4 anni	0.44	-0.29
Kapton 76.2 μm	0	0.39	-0.15
	4 anni	0.44	-0.29

Le tensioni circonferenziali sono riportate in Figura 4.40 e Figura 4.41.

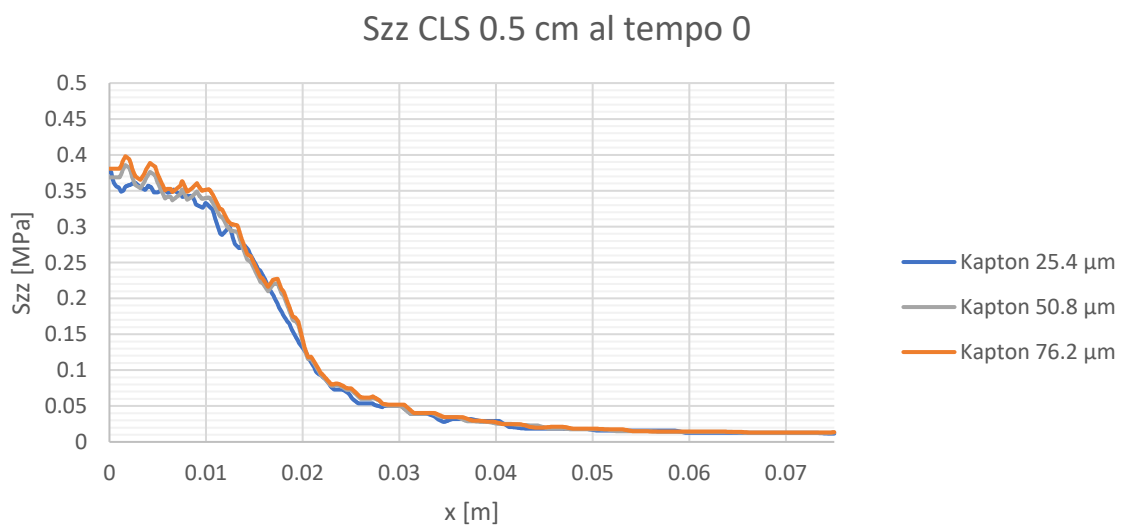


Figura 4.40 S_{zz} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

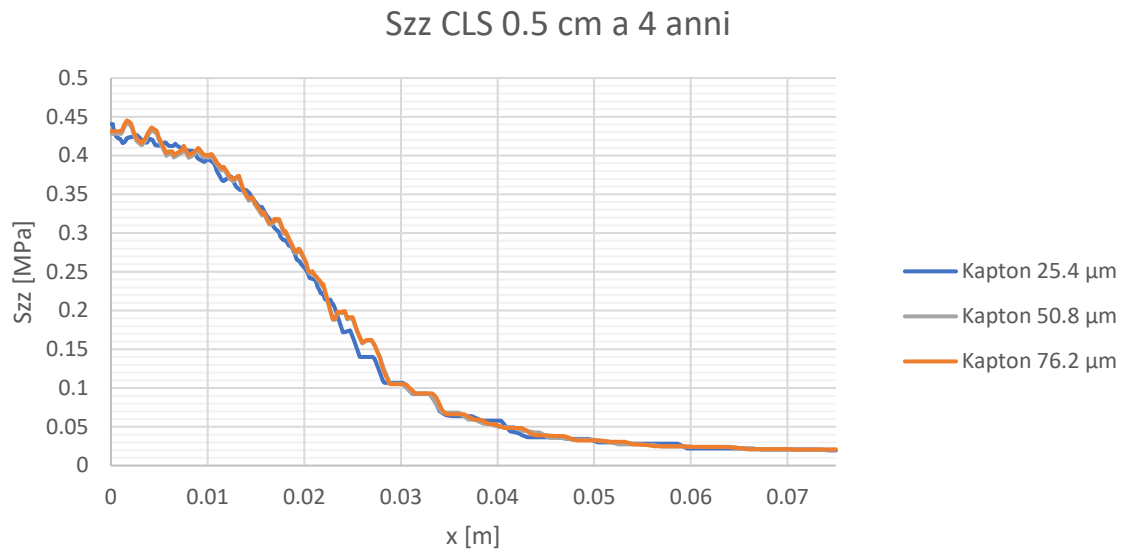


Figura 4.41 S_{zz} nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.13 Max e Min S_{zz} CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
Kapton 25.4 μm	0	0.38	0.01
	4 anni	0.44	0.02
Kapton 50.8 μm	0	0.39	0.01
	4 anni	0.44	0.02
Kapton 76.2 μm	0	0.40	0.01
	4 anni	0.45	0.02

Lo spessore dello strato di kapton non ha alcuna influenza neanche sulle tensioni radiali e circonferenziali della malta.

4.2.5 Analisi area senziente

In Tabella 4.14 si riportano le variazioni di volume del kapton dovute alla deformazione assiale. Si riporta inoltre la media delle deformazioni assiali, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico.

Nell'analisi è stata presa in considerazione solo la zona senziente del sensore, cioè quella che si trova tra l'asse di rotazione e l'intaglio nel rame.

Tabella 4.14 Analisi area senziente

Sensore	Tempo	Var. Volume [mm ³]	Raggio [mm]	Area senziente [mm ²]	Var. spessore [%]	Media Eyy	Dev. St.	C.O.V.
Kapton 25.4 μ m	0	-2.42E-02	10.5	346	-0.28%	-2.70E-03	5.60E-04	-21%
	4 anni	-2.43E-02	10.5	346	-0.28%	-2.68E-03	6.47E-04	-24%
Kapton 50.8 μ m	0	-4.84E-02	10.5	346	-0.27%	-2.69E-03	4.61E-04	-17%
	4 anni	-4.87E-02	10.5	346	-0.28%	-2.68E-03	5.57E-04	-21%
Kapton 76.2 μ m	0	-7.24E-02	10.5	346	-0.27%	-2.68E-03	4.02E-04	-15%
	4 anni	-7.30E-02	10.5	346	-0.28%	-2.56E-03	5.02E-04	-20%

Come era lecito aspettarsi la variazione di volume risulta maggiore aumentando lo spessore dello strato di kapton.

Tuttavia, analizzando la variazione di spessore in percentuale si nota che è essenzialmente la stessa per i tre modelli.

È interessante notare come la riduzione dei picchi di deformazioni assiali all'aumentare dello spessore dello strato di kapton (Paragrafo 4.2.1) influenzi positivamente la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, che risultano minori nel sensore con lo strato di kapton più spesso.

Comunque, tra il momento di applicazione del carico e 4 anni la differenza del C.O.V. risulta minore al diminuire dello spessore dello strato di kapton. Per i 3 sensori la differenza risulta infatti rispettivamente del 3, del 4 e del 5%.

4.3 Effetto di diversi spessori dello strato di FR4

Si riportano tensioni e deformazioni nei materiali dei sensori, al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico ed a quattro anni dall'applicazione del carico, considerando nell'analisi sia il creep che il ritiro

4.3.1 Deformazioni nel kapton

Le deformazioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.42 e Figura 4.43.

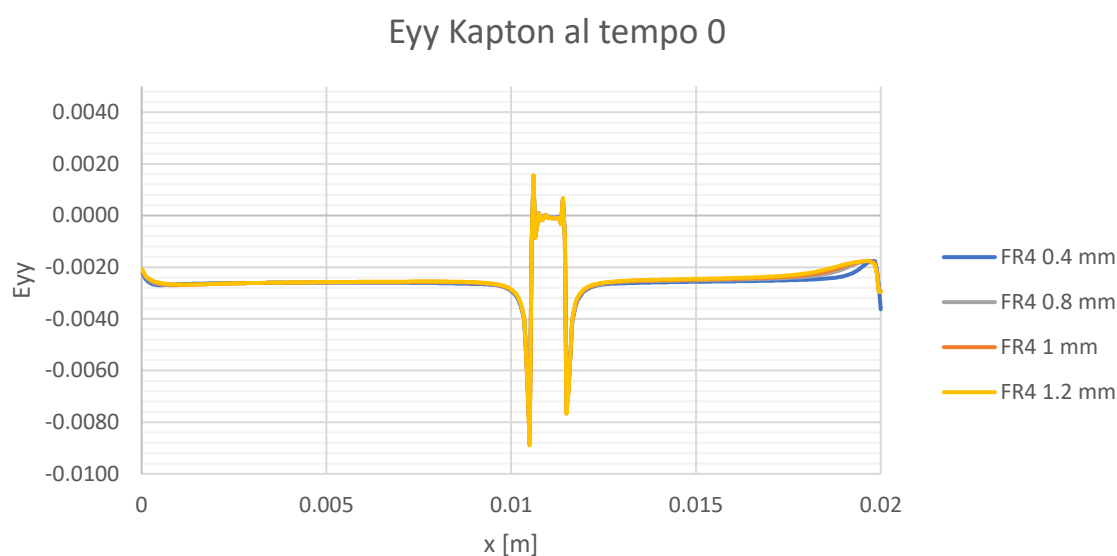


Figura 4.42 Eyy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

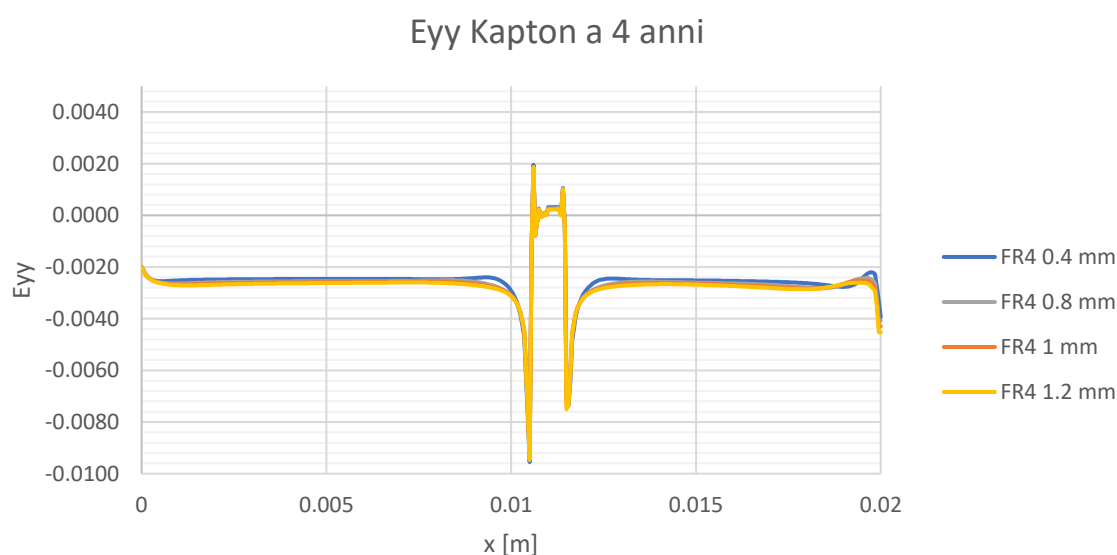


Figura 4.43 Eyy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.15 Max e Min Eyy nel kapton

Sensore	Tempo	Eyy	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	1.51E-03	-8.51E-03
	4 anni	1.95E-03	-9.55E-03
FR4 0.8 mm	0	1.55E-03	-8.80E-03
	4 anni	1.87E-03	-9.28E-03
FR4 1 mm	0	1.55E-03	-8.86E-03
	4 anni	1.87E-03	-9.36E-03
FR4 1.2 mm	0	1.55E-03	-8.90E-03
	4 anni	1.87E-03	-9.48E-03

Si nota come la differenza di spessore dello strato di FR4 non influenza significativamente il comportamento dello strato di kapton.

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.44 e Figura 4.45.

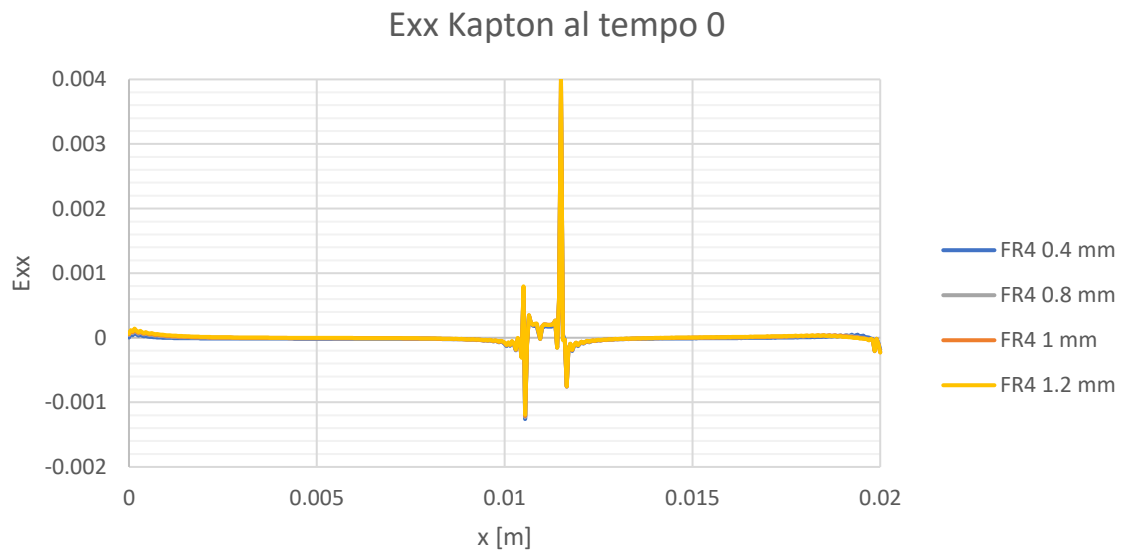


Figura 4.44 Exx nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

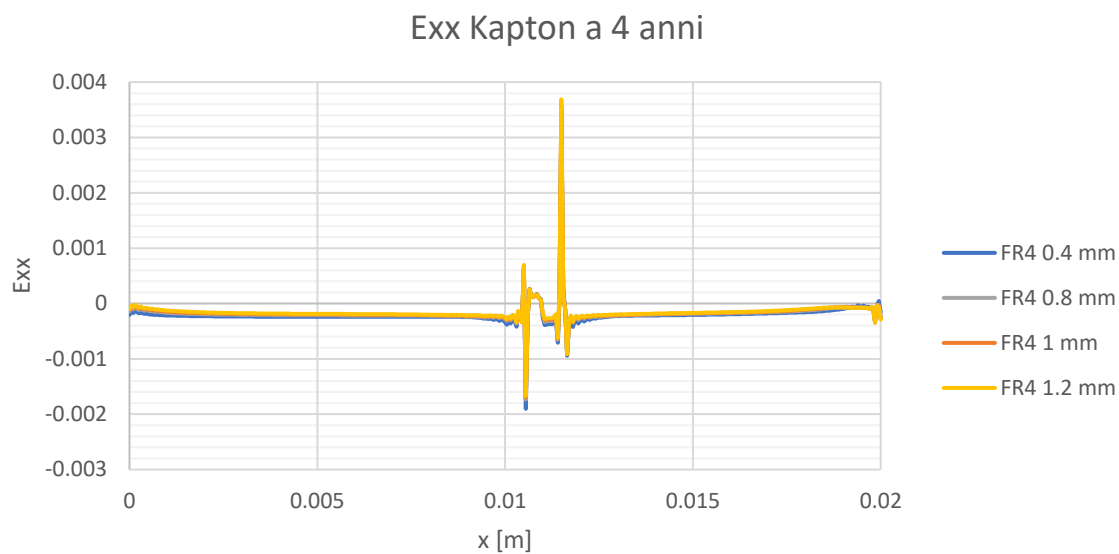


Figura 4.45 Exx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.16 Max e Min Exx nel kapton

Sensore	Tempo	Exx	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	3.70E-03	-1.26E-03
	4 anni	3.33E-03	-1.90E-03
FR4 0.8 mm	0	3.95E-03	-1.23E-03
	4 anni	3.45E-03	-1.73E-03
FR4 1 mm	0	4.02E-03	-1.21E-03
	4 anni	3.57E-03	-1.70E-03
FR4 1.2 mm	0	4.07E-03	-1.19E-03
	4 anni	3.69E-03	-1.67E-03

Anche per quanto riguarda le deformazioni radiali la differenza di spessore dello strato di FR4 non influenza significativamente il comportamento del kapton.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.46 e Figura 4.47.

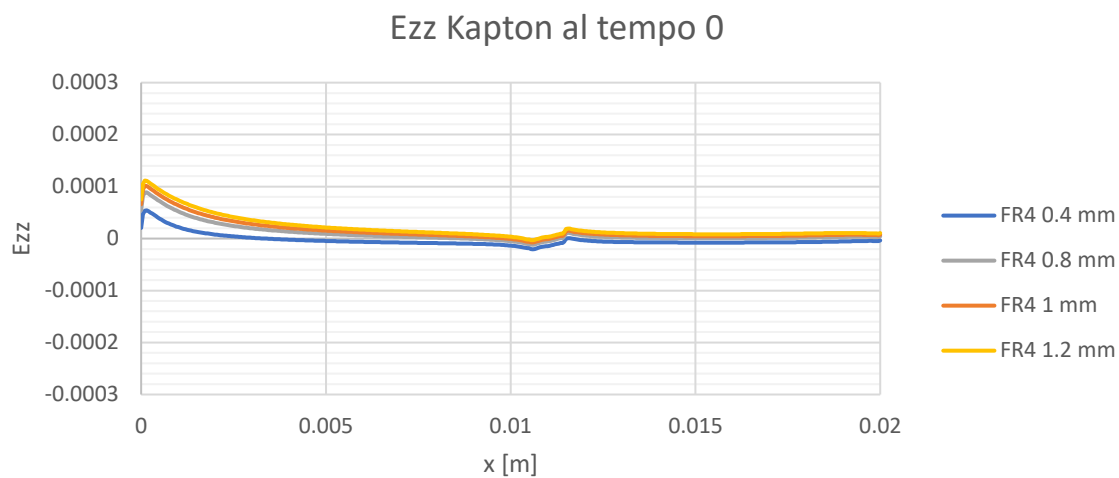


Figura 4.46 Ezz nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

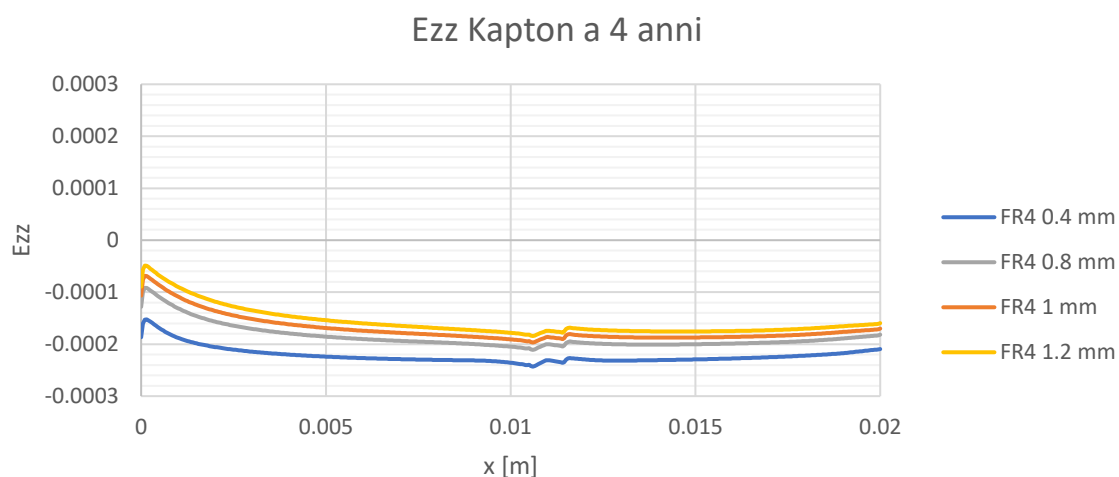


Figura 4.47 Ezz nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.17 Max e Min Ezz nel kapton

Sensore	Tempo	Ezz	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	5.43E-05	-2.06E-05
	4 anni	-1.52E-04	-2.43E-04
FR4 0.8 mm	0	8.87E-05	-1.19E-05
	4 anni	-9.17E-05	-2.11E-04
FR4 1 mm	0	1.01E-04	-7.44E-06
	4 anni	-6.85E-05	-1.97E-04
FR4 1.2 mm	0	1.12E-04	-3.07E-06
	4 anni	-4.88E-05	-1.84E-04

Si nota come all'aumentare dello spessore dello strato di FR4 le deformazioni circonferenziali aumentino progressivamente.

4.3.2 Tensioni nel Kapton

Le tensioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.48 e Figura 4.49.

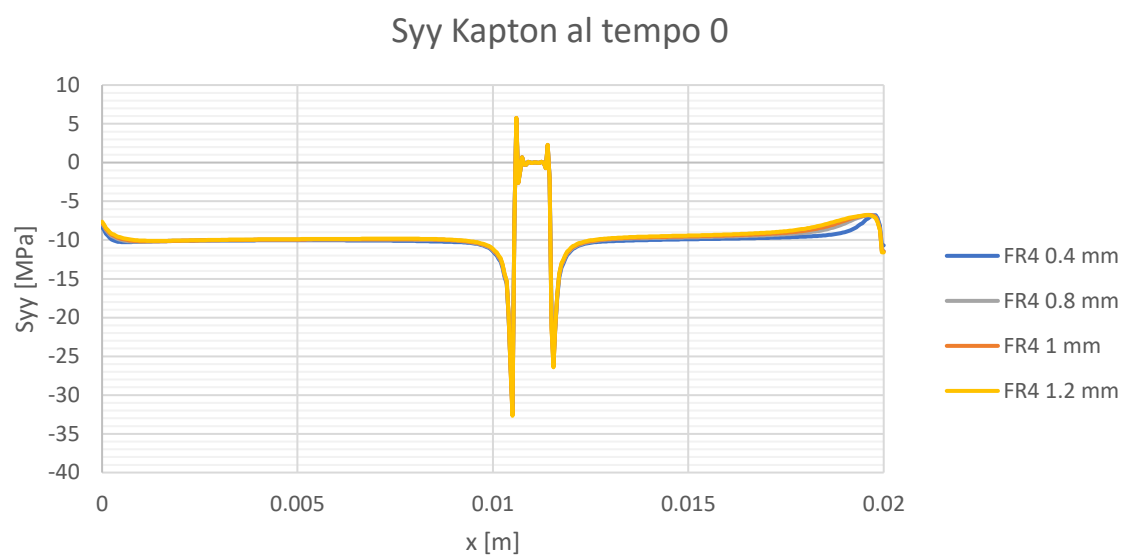


Figura 4.48 S_{yy} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

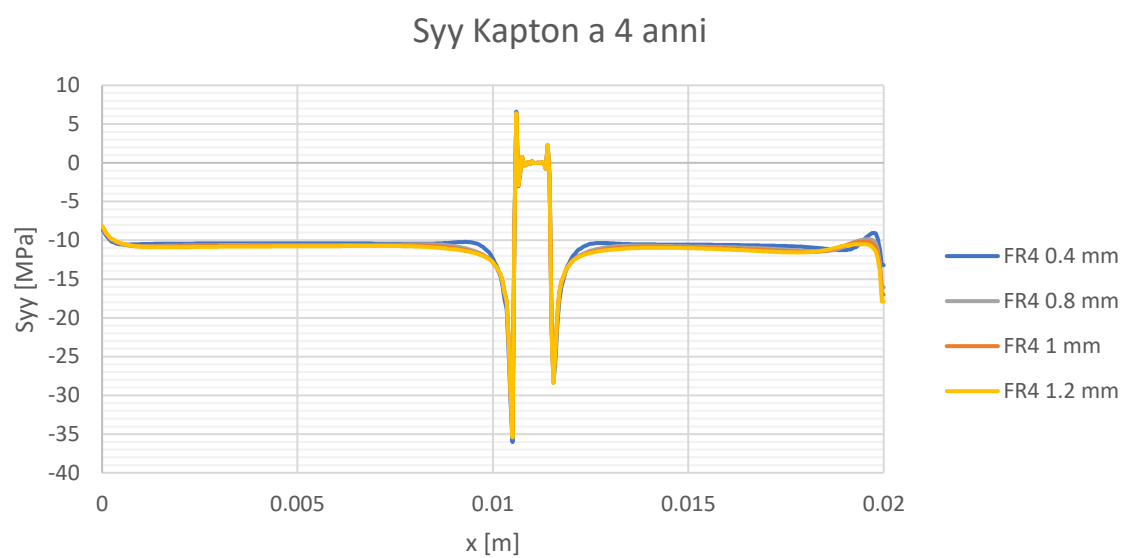


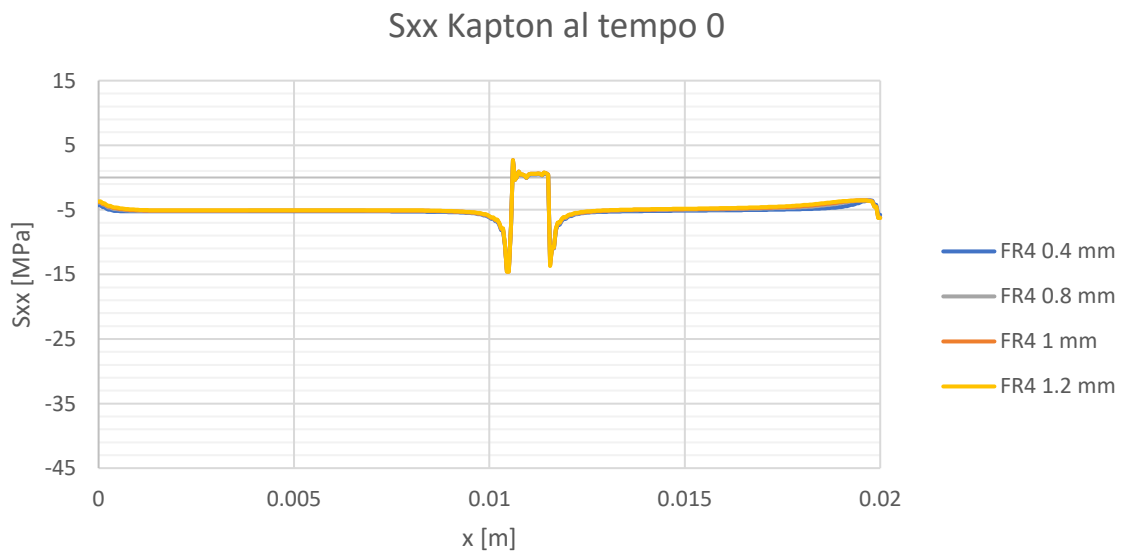
Figura 4.49 S_{yy} nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.18 Max e Min S_{yy} nel kapton

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	5.60	-31.44
	4 anni	6.61	-36.03
FR4 0.8 mm	0	5.74	-32.37
	4 anni	6.34	-34.85
FR4 1 mm	0	5.76	-32.57
	4 anni	6.36	-35.08
FR4 1.2 mm	0	5.77	-32.68
	4 anni	6.40	-35.44

Ovviamente nelle tensioni assiali si rispecchia il comportamento già visto nelle deformazioni assiali, con lo spessore dello strato di FR4 che non influenza significativamente il comportamento del kapton.

Le tensioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.50 e Figura 4.51.

Figura 4.50 S_{xx} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

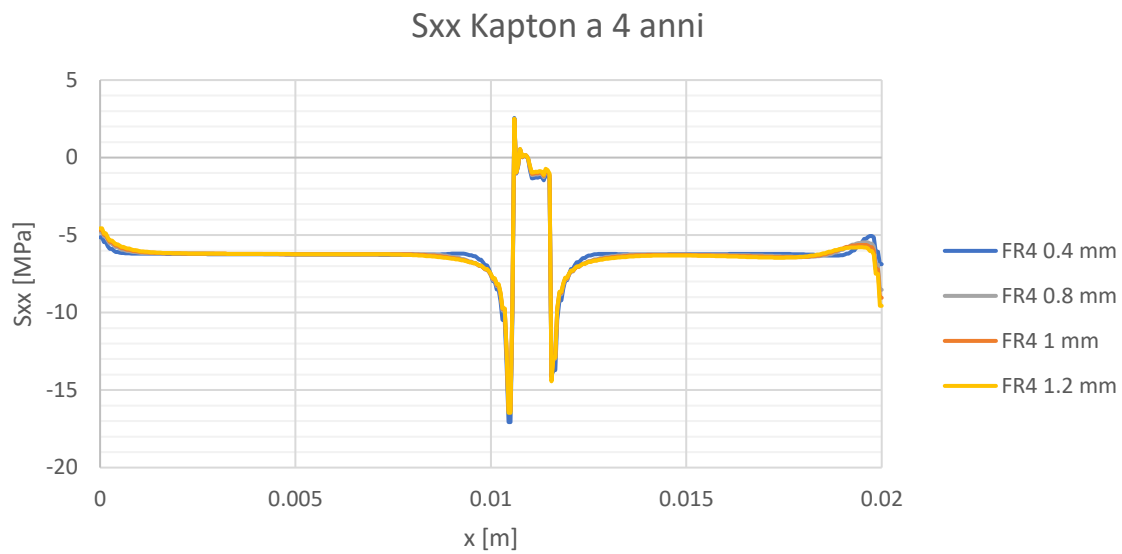


Figura 4.51 Sxx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.19 Max e Min Sxx nel kapton

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	2.63	-14.25
	4 anni	2.56	-17.07
FR4 0.8 mm	0	2.68	-14.53
	4 anni	2.46	-16.33
FR4 1 mm	0	2.69	-14.58
	4 anni	2.48	-16.36
FR4 1.2 mm	0	2.69	-14.59
	4 anni	2.51	-16.47

Le tensioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.52 e Figura 4.53.

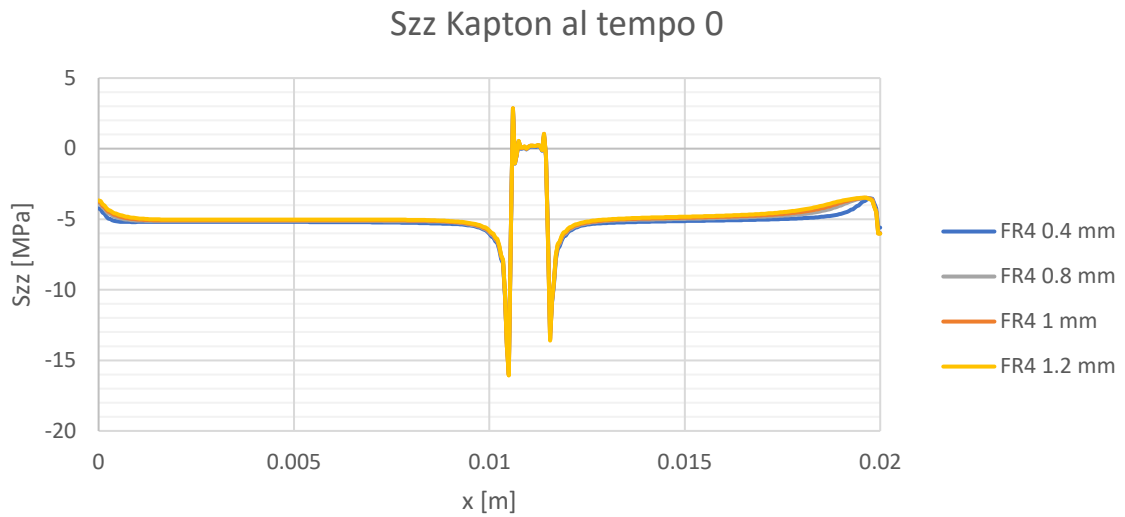


Figura 4.52 S_{zz} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

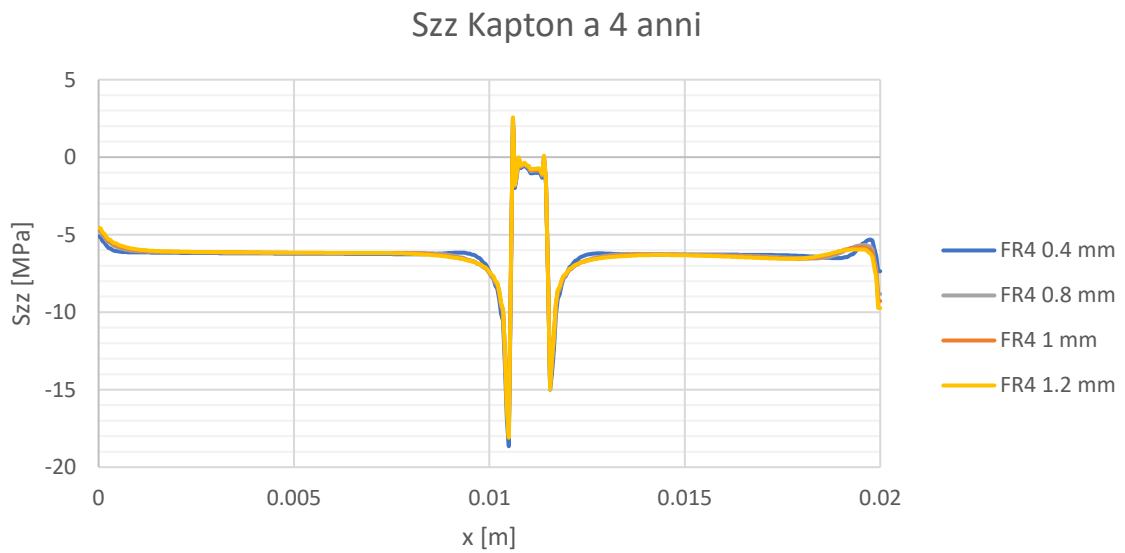


Figura 4.53 S_{zz} nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.20 Max e Min S_{zz} nel kapton

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	2.75	-15.58
	4 anni	2.51	-18.65
FR4 0.8 mm	0	2.83	-15.97
	4 anni	2.46	-17.92
FR4 1 mm	0	2.85	-16.05
	4 anni	2.51	-17.98
FR4 1.2 mm	0	2.87	-16.08
	4 anni	2.57	-18.10

Lo spessore dello strato di FR4 non influenza in modo significativo le tensioni radiali e circonferenziali nel kapton.

4.3.3 Tensioni nell'FR4

Le tensioni assiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.54 e Figura 4.55.

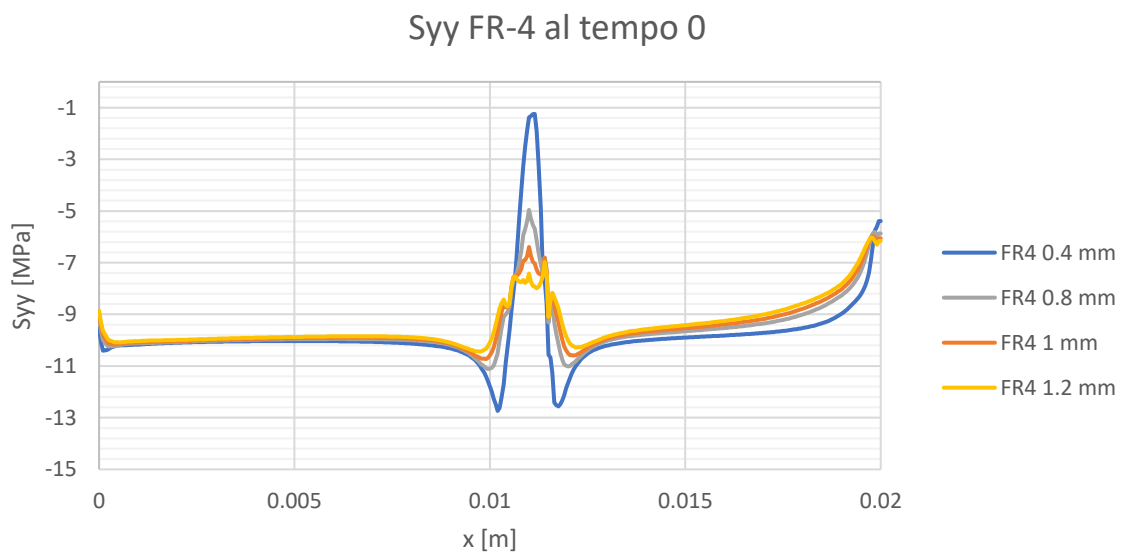


Figura 4.54 S_{yy} nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

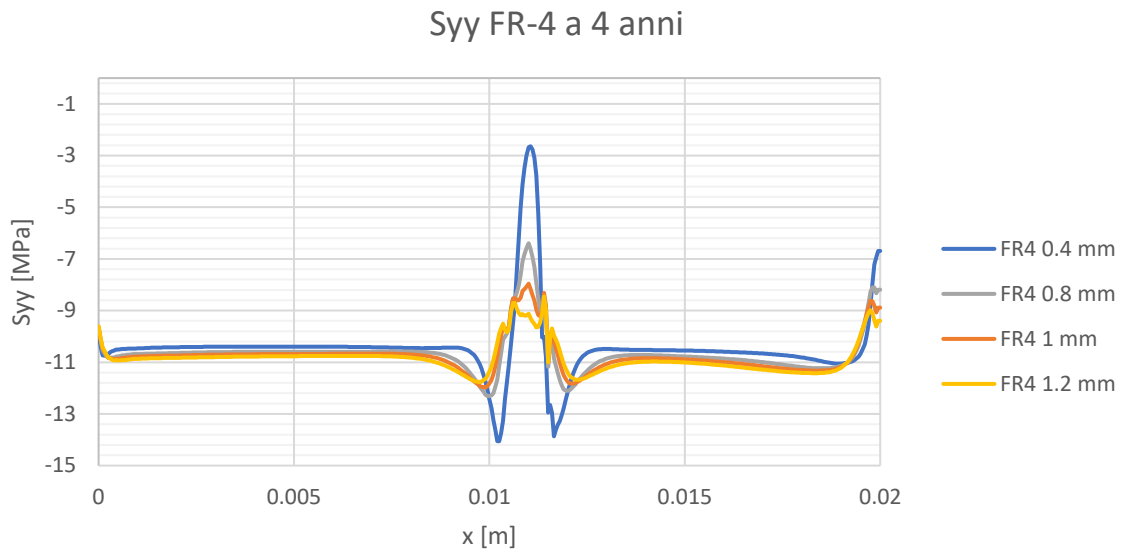


Figura 4.55 Syy FR4a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.21 Max e Min Syy FR4

Sensore	Tempo	Syy [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	-1.24	-12.74
	4 anni	-2.64	-14.06
FR4 0.8 mm	0	-4.96	-11.12
	4 anni	-6.39	-12.31
FR4 1 mm	0	-5.97	-10.73
	4 anni	-7.96	-11.99
FR4 1.2 mm	0	-6.02	-10.44
	4 anni	-8.45	-11.77

A 4 anni dall'applicazione del carico si osserva come all'aumentare dello spessore dello strato di FR4 le tensioni in compressione crescono leggermente all'interno dell'area senziante.

In corrispondenza della continuità però si vede come l'aumentare dello spessore migliora il comportamento in flessione dell'FR4, che vede ridurre i suoi picchi. Si passa infatti da un minimo di -14 MPa per il sensore con l'FR4 di 0.4 mm ad un minimo di -11.8 MPa circa per

il sensore con lo strato di FR4 da 1.2 mm. Per quanto riguarda i massimi si passa da -1.2 MPa per il sensore con FR4 di 0.4 mm a -6 MPa per il sensore con FR4 di 1.2 mm.

Le tensioni radiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.56 e Figura 4.57.

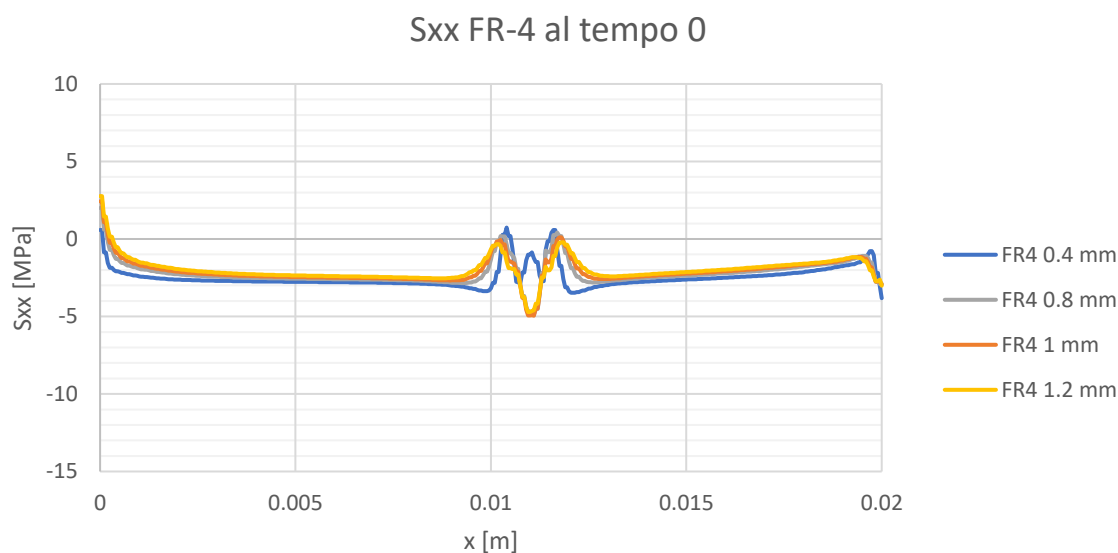


Figura 4.56 S_{xx} nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

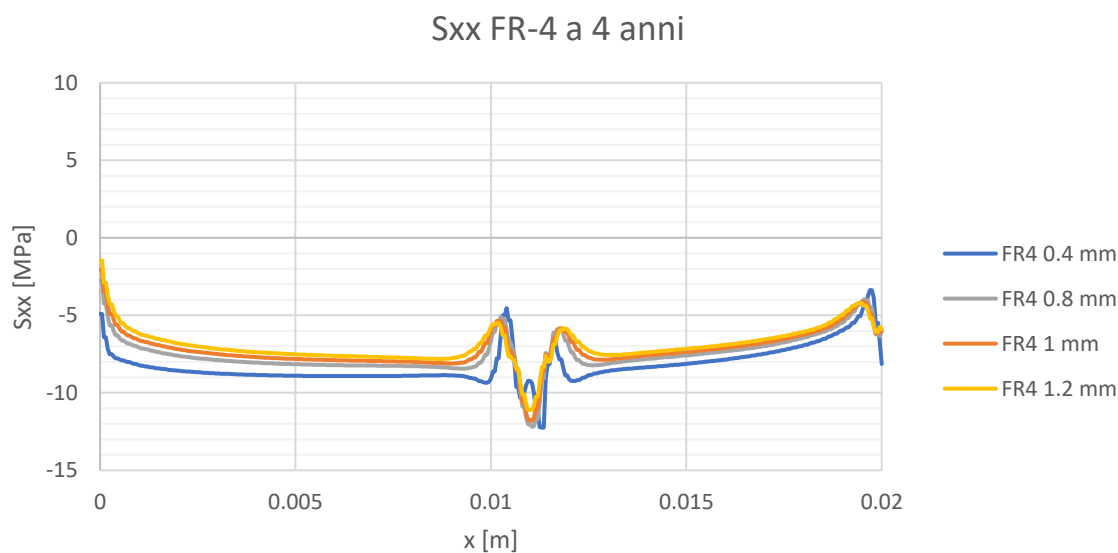


Figura 4.57 S_{xx} nel FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.22 Max e Min S_{xx} FR4

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	0.74	-3.82
	4 anni	-3.38	-12.25
FR4 0.8 mm	0	2.00	-4.91
	4 anni	-2.78	-12.19
FR4 1 mm	0	-2.06	-11.82
	4 anni	2.43	-4.95
FR4 1.2 mm	0	2.77	-4.71
	4 anni	-1.46	-11.10

Le tensioni circonferenziali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.58 e Figura 4.59.

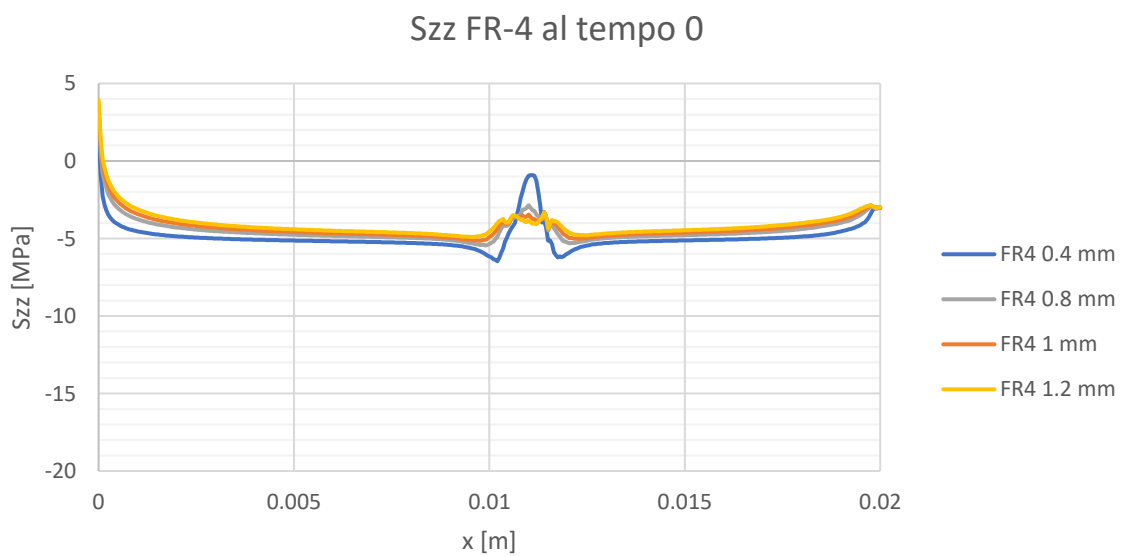


Figura 4.58 Szz FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

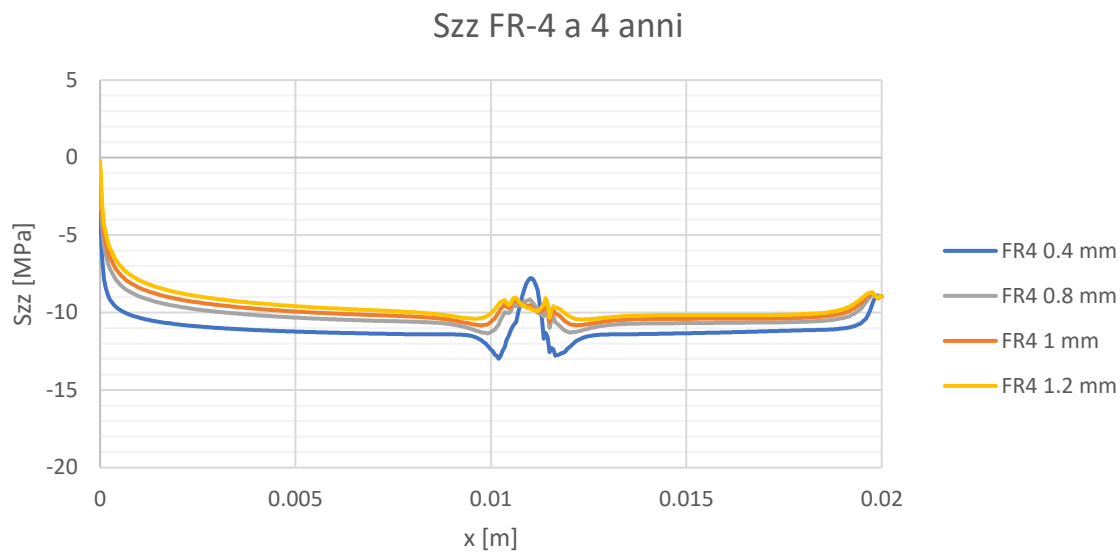


Figura 4.59 Szz FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.23 Max e Min Szz FR4

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	1.92	-6.47
	4 anni	-3.54	-12.98
FR4 0.8 mm	0	3.22	-5.45
	4 anni	-1.51	-11.35
FR4 1 mm	0	3.62	-5.15
	4 anni	-0.80	-10.83
FR4 1.2 mm	0	3.94	-4.90
	4 anni	-0.20	-10.45

All'aumentare dello spessore dello strato di FR4 si nota come aumentino le tensioni radiali e circonferenziali all'interno dell'area sensiente. Si attenuano però i picchi in corrispondenza dell'intaglio.

4.3.4 Tensioni nella malta

Le tensioni assiali in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione posta nella malta a 0.5 cm dal sensore sono mostrate in Figura 4.60 e Figura 4.61:

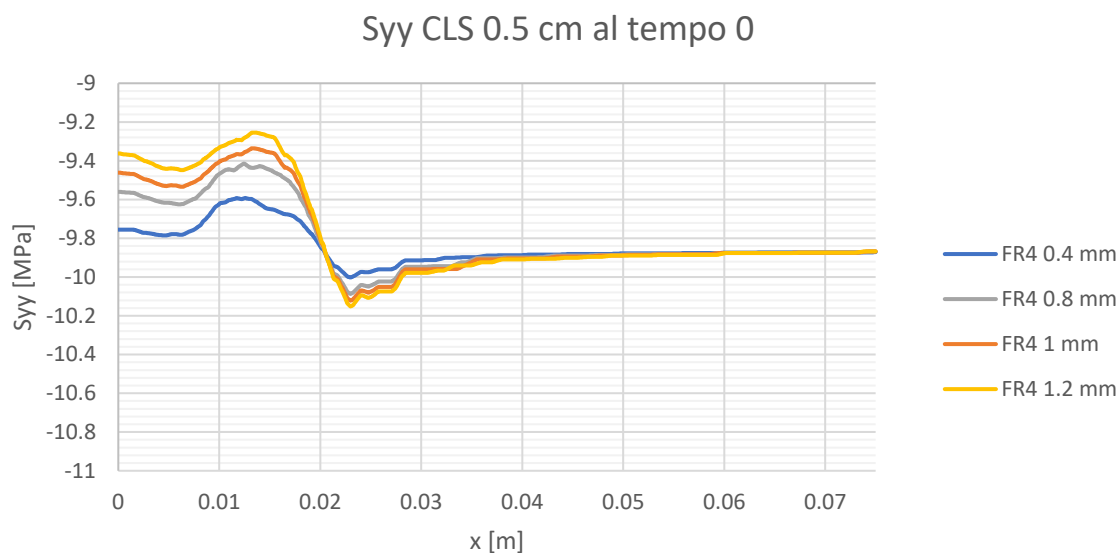


Figura 4.60 S_{yy} CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

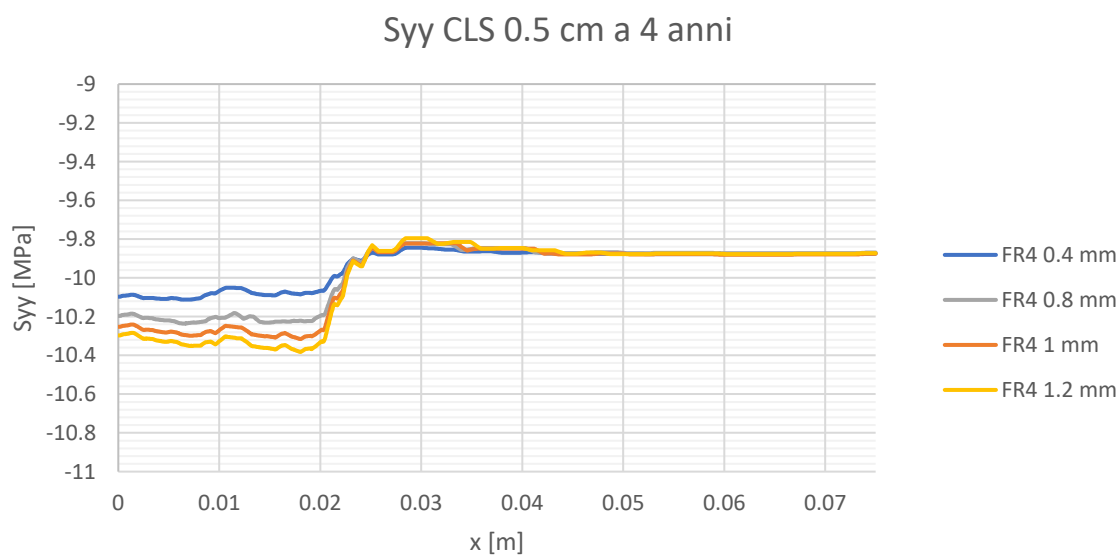


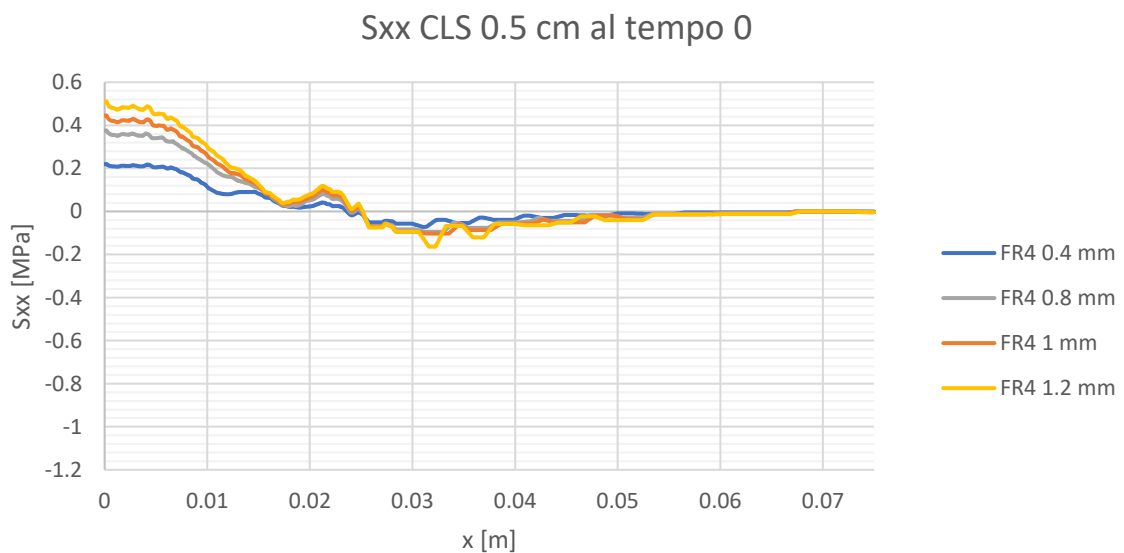
Figura 4.61 S_{yy} CLS a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.24 Max e Min S_{yy} CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	-9.59	-10.00
	4 anni	-9.84	-10.11
FR4 0.8 mm	0	-9.41	-10.09
	4 anni	-9.82	-10.24
FR4 1 mm	0	-9.34	-10.12
	4 anni	-9.82	-10.32
FR4 1.2 mm	0	-9.25	-10.15
	4 anni	-9.80	-10.38

Per quanto concerne il calcestruzzo, il comportamento al tempo 0 è in controtendenza con quello che si osserva a 4 anni dall'applicazione del carico. Al tempo 0 infatti si riscontra un aumento delle tensioni all'aumentare dello spessore dello strato di FR4. A 4 anni si riscontra invece una diminuzione delle tensioni. In ogni caso la differenza di tensioni è piuttosto ridotta (<4%) e confinata alla sola zona di disturbo del campo tensionale, indotto dalla presenza del sensore.

Le tensioni radiali sono riportate in Figura 4.62 e Figura 4.63.

Figura 4.62 S_{xx} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

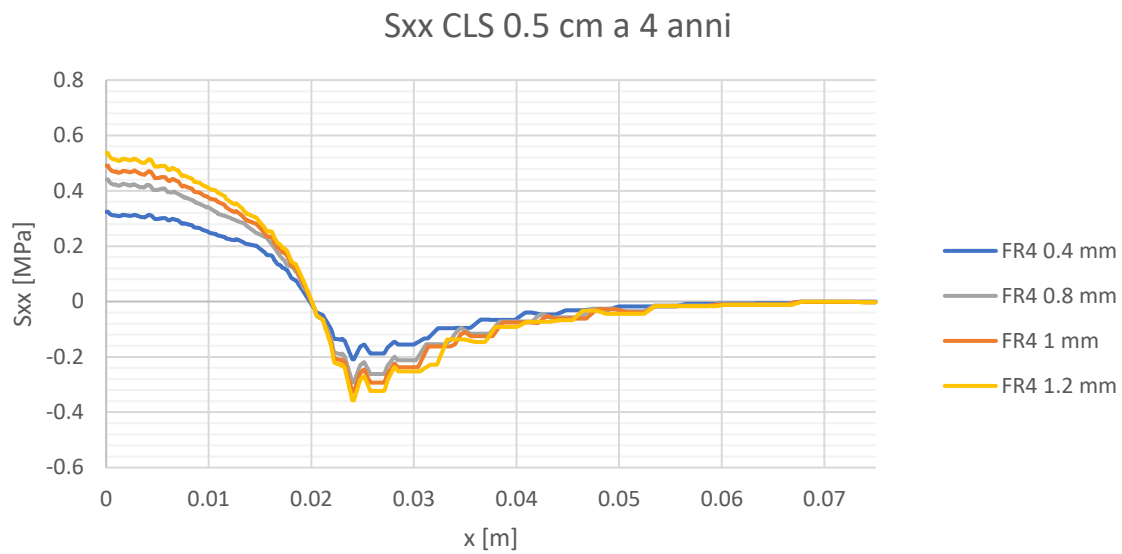


Figura 4.63 Sxx nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.25 Max e Min Sxx CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	0.22	-0.07
	4 anni	0.32	-0.21
FR4 0.8 mm	0	0.38	-0.09
	4 anni	0.44	-0.29
FR4 1 mm	0	0.45	-0.10
	4 anni	0.49	-0.33
FR4 1.2 mm	0	0.51	-0.16
	4 anni	0.54	-0.36

Le tensioni circonferenziali sono riportate in Figura 4.64 e Figura 4.65.

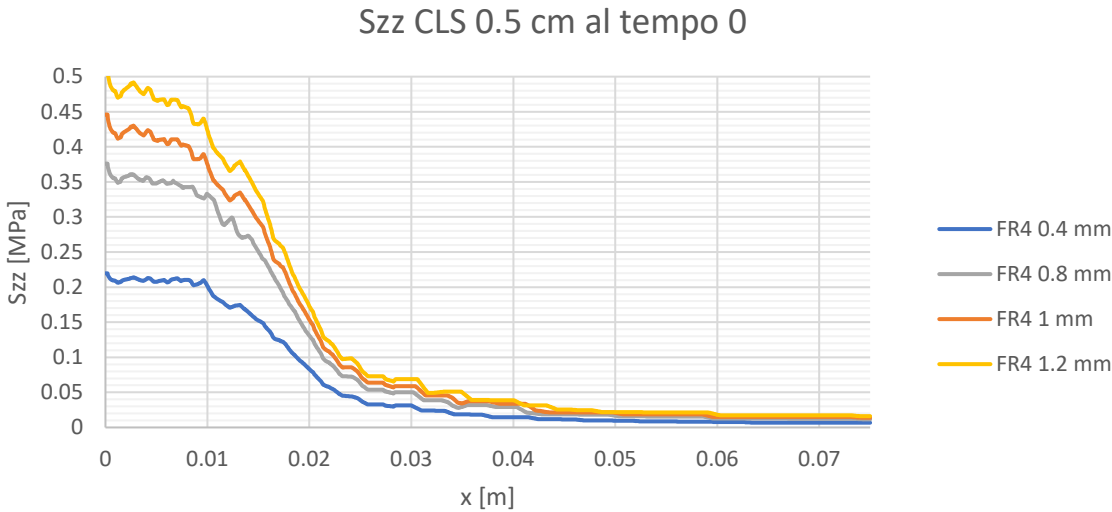


Figura 4.64 Szz nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

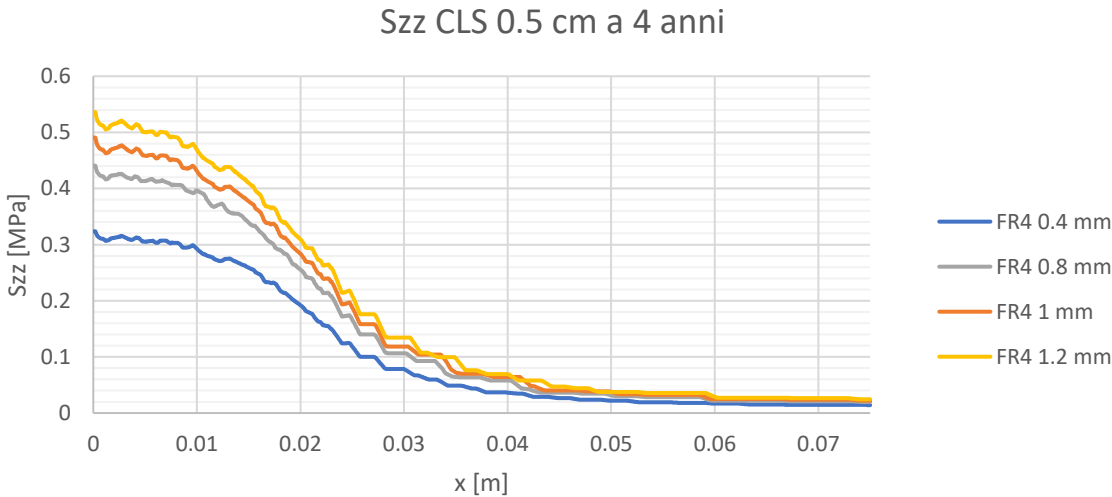


Figura 4.65 Szz nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.26 Max e Min Szz CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
FR4 0.4 mm	0	0.22	0.01
	4 anni	0.32	0.01
FR4 0.8 mm	0	0.38	0.01
	4 anni	0.44	0.02
FR4 1 mm	0	0.45	0.01
	4 anni	0.49	0.02
FR4 1.2 mm	0	0.51	0.02
	4 anni	0.54	0.02

Per le tensioni radiali e circonferenziali nel CLS si ha un comportamento molto simile sia al tempo 0 che a 4 anni dall'applicazione del carico. Le tensioni risultano maggiori nei modelli con gli strati di FR4 più spessi, con una differenza di circa il 50% tra lo spessore minore e lo spessore maggiore.

4.3.5 Analisi area senziente

In Tabella 4.27 si riportano le variazioni di volume del kapton dovute alla deformazione assiale. Si riporta inoltre la media delle deformazioni assiali, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico.

Nell'analisi è stata presa in considerazione solo la zona senziente del sensore, cioè quella che si trova tra l'asse di rotazione e l'intaglio nel rame.

Tabella 4.27 Analisi area senziente

Sensore	Tempo	Var. Volume [mm ³]	Raggio [mm]	Area senziente [mm ²]	Var. spessore [%]	Media Eyy	Dev. St.	C.O.V.
FR4 0.4 mm	0	-2.44E-02	10.5	346	-0.28%	-2.71E-03	5.40E-04	-20%
	4 anni	-2.35E-02	10.5	346	-0.27%	-2.59E-03	6.95E-04	-27%
FR4 0.8 mm	0	-2.42E-02	10.5	346	-0.28%	-2.70E-03	5.60E-04	-21%
	4 anni	-2.43E-02	10.5	346	-0.28%	-2.68E-03	6.47E-04	-24%
FR4 1 mm	0	-2.41E-02	10.5	346	-0.27%	-2.69E-03	5.64E-04	-21%
	4 anni	-2.47E-02	10.5	346	-0.28%	-2.72E-03	6.45E-04	-24%
FR4 1.2 mm	0	-2.40E-02	10.5	346	-0.27%	-2.68E-03	5.67E-04	-21%
	4 anni	-2.50E-02	10.5	346	-0.28%	-2.76E-03	6.47E-04	-24%

Analizzando la variazione di spessore in percentuale si nota che è essenzialmente la stessa per tutti i sensori.

Osservando però il coefficiente di variazione si nota che i tre spessori maggiori (0.8 mm, 1 mm, 1.2 mm) presentano un comportamento praticamente identico, con un coefficiente di variazione di circa -21% al tempo 0 e -24% a 4 anni, con una differenza quindi del 3%.

Il modello con lo spessore di FR4 minore (0.4 mm) presenta un C.O.V. più piccolo rispetto agli altri al tempo 0, ma più grande rispetto agli altri a 4 anni dall'applicazione del carico, con una differenza del 7%.

4.4 Effetto della presenza delle staffe per ancoraggio in trazione

Si riportano tensioni e deformazioni nei materiali dei sensori, al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico ed a quattro anni dall'applicazione del carico, considerando nell'analisi sia il creep che il ritiro.

4.4.1 Deformazioni nel kapton

Le deformazioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.66 e Figura 4.67.

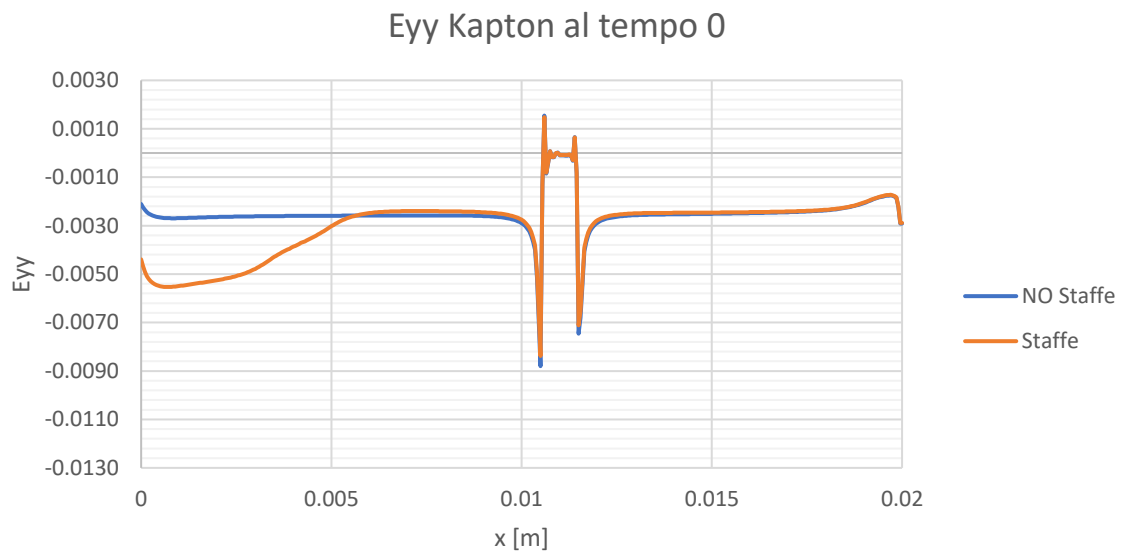


Figura 4.66 Eyy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

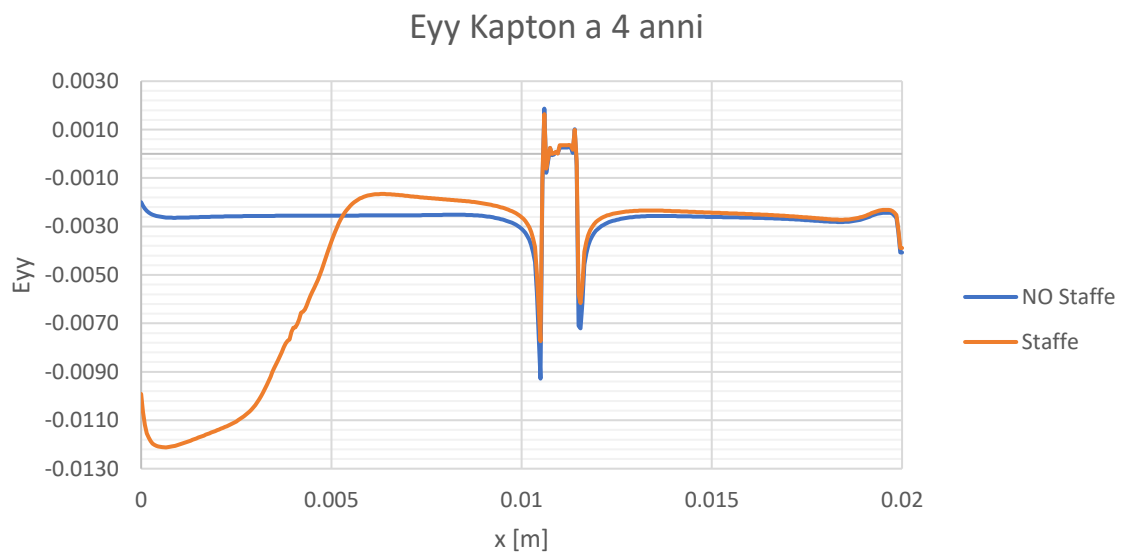


Figura 4.67 Eyy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.28 Max e Min Eyy nel kapton

Sensore	Tempo	Eyy	
		Max	Min
NO Staffe	0	1.55E-03	-8.80E-03
	4 anni	1.87E-03	-9.28E-03
Staffe	0	1.48E-03	-8.38E-03
	4 anni	1.64E-03	-1.21E-02

Le staffe, essendo degli elementi generatori di forte discontinuità, comportano un aumento di deformazione assiale nel kapton all'interno della zona senziente. In particolare, a 4 anni, nel modello con le staffe si riscontrano delle deformazioni fino a 5 volte superiori rispetto al modello senza staffe.

Si nota poi come procedendo verso il raggio esterno del sensore l'influenza delle staffe diminuisca, e la curva torna a sovrapporsi a quella del modello senza staffe.

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.68 e Figura 4.69.

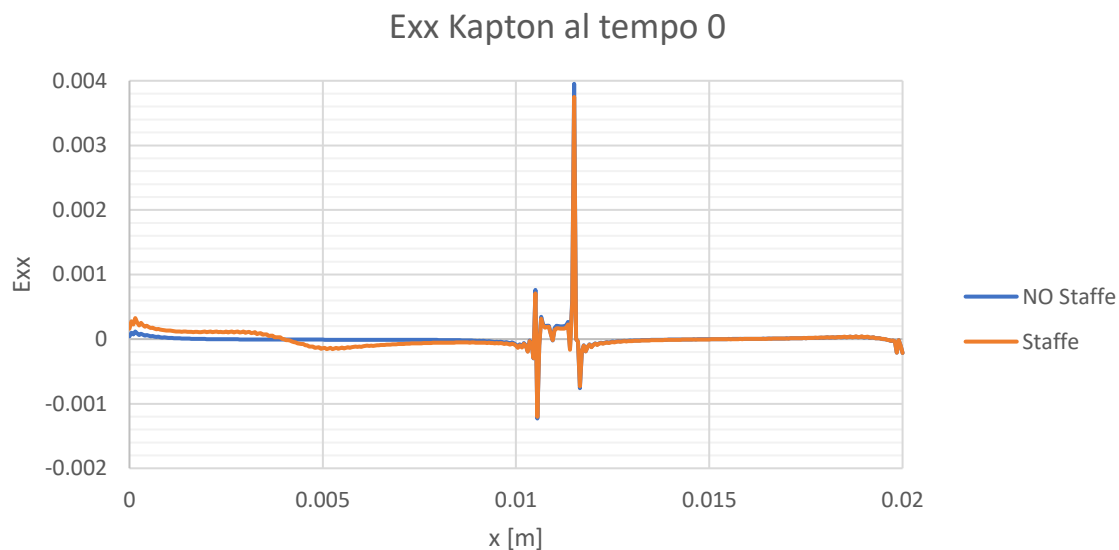


Figura 4.68 Exx nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

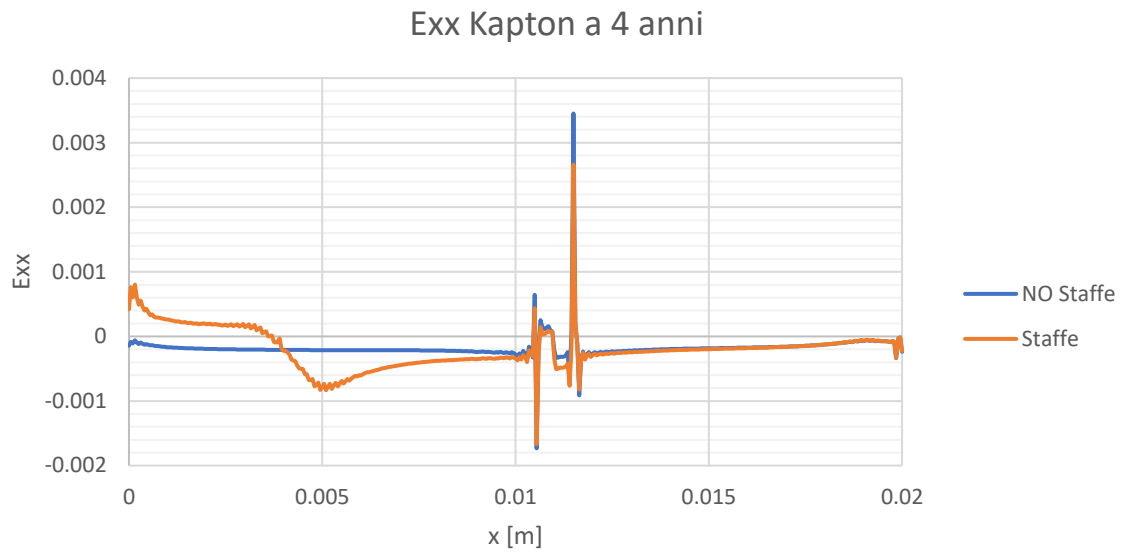


Figura 4.69 Exx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.29 Max e Min Exx nel kapton

Sensore	Tempo	Exx	
		Max	Min
NO Staffe	0	3.95E-03	-1.23E-03
	4 anni	3.45E-03	-1.73E-03
Staffe	0	3.75E-03	-1.20E-03
	4 anni	2.66E-03	-1.67E-03

Anche per quanto riguarda le deformazioni radiali le staffe conducono ad una differenza nelle tensioni nel kapton, con delle deformazioni 4 volte superiori nel modello con le staffe, sia in trazione che in compressione.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.70 e Figura 4.71.

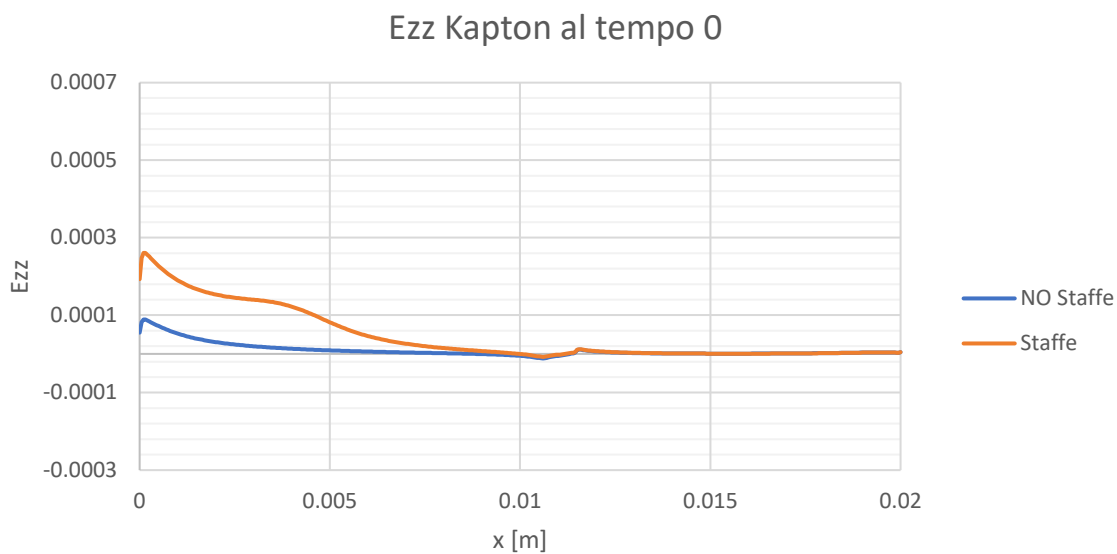


Figura 4.70 Ezz nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

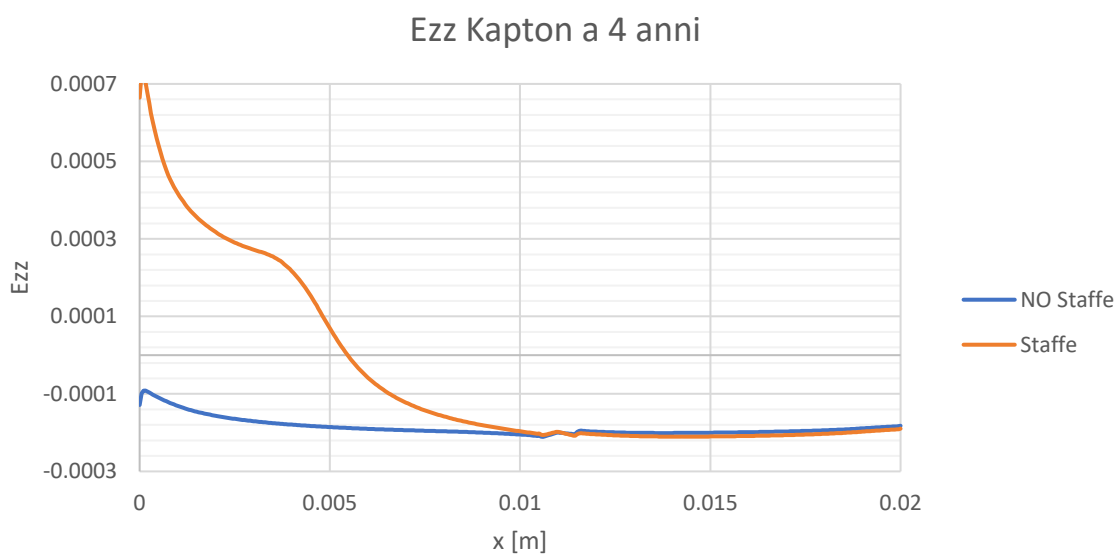


Figura 4.71 Ezz nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.30 Max e Min Ezz nel kapton

Sensore	Tempo	Ezz	
		Max	Min
NO Staffe	0	8.87E-05	-1.19E-05
	4 anni	-9.17E-05	-2.11E-04
Staffe	0	2.61E-04	-7.94E-06
	4 anni	7.29E-04	-2.10E-04

Anche nelle deformazioni circonferenziali la differenza risulta molto marcata, con dei picchi nel modello con le staffe, fino a 7 volte superiori rispetto al modello senza staffe, a 4 anni dall'applicazione del carico.

In ogni caso, in tutte e tre le direzioni, al di fuori della zona di disturbo causato dalle staffe le curve dei due modelli, con staffe e senza tendono a sovrapporsi.

4.4.2 Tensioni nel Kapton

Le tensioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.72 e Figura 4.73.

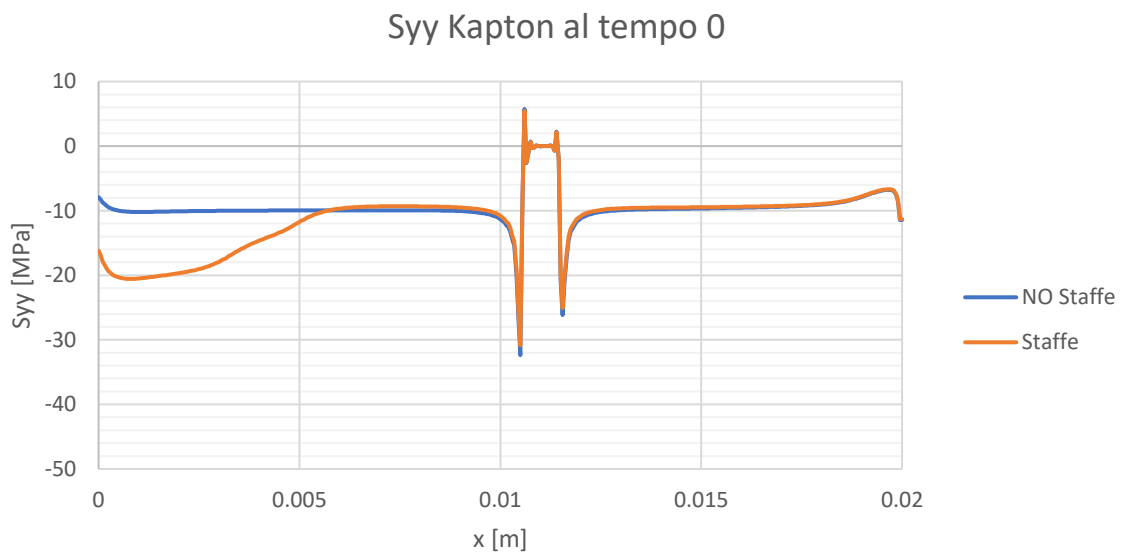


Figura 4.72 Syy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

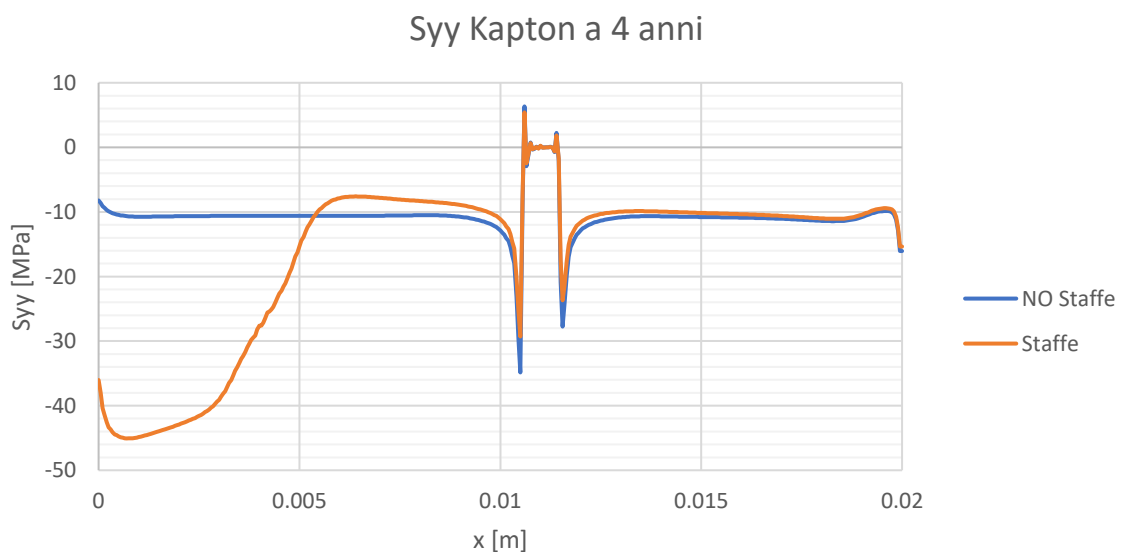


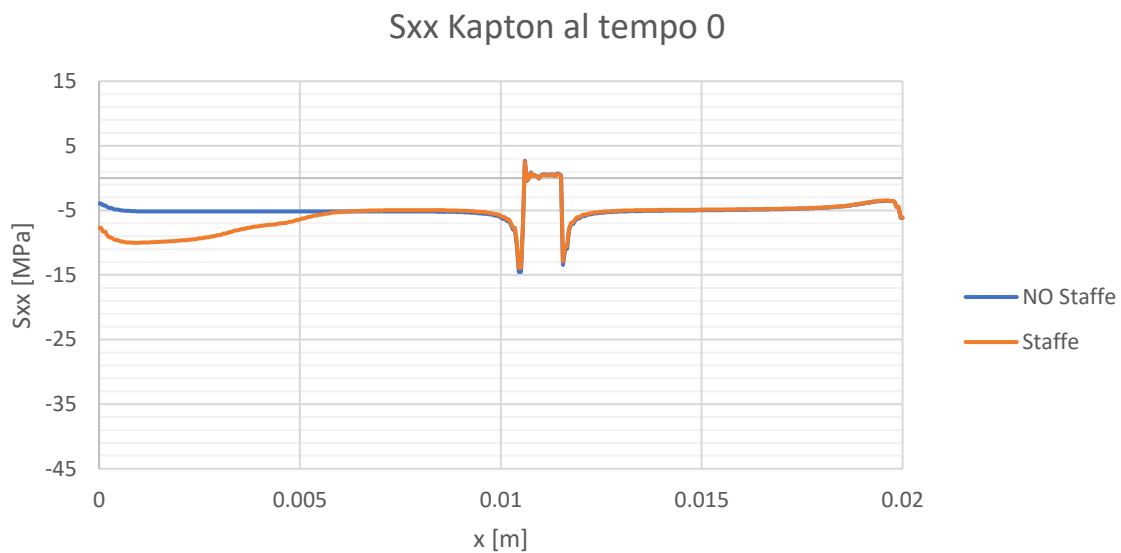
Figura 4.73 Syy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.31 Max e Min S_{yy} nel kapton

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	5.74	-32.37
	4 anni	6.34	-34.85
Staffe	0	5.48	-30.85
	4 anni	5.40	-45.07

Ovviamente nelle tensioni assiali si rispecchia il comportamento già visto nelle deformazioni assiali, con delle deformazioni, a 4 anni, superiori fino a quasi 5 volte nel modello con le staffe.

Le tensioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.74 e Figura 4.75.

Figura 4.74 S_{xx} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

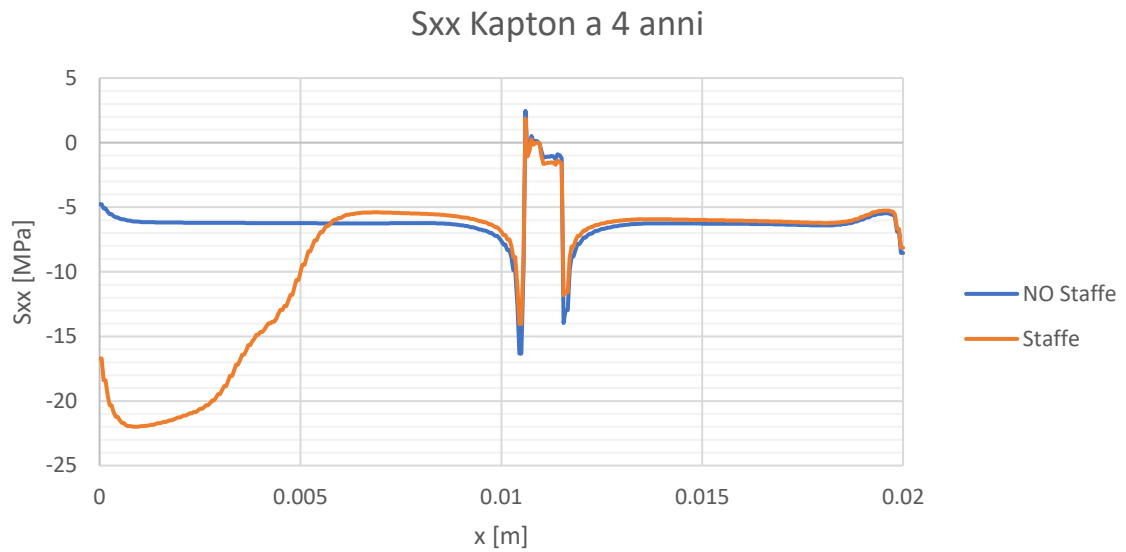


Figura 4.75 Sxx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.32 Max e Min Sxx nel kapton

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	2.68	-14.53
	4 anni	2.46	-16.33
Staffe	0	2.53	-13.89
	4 anni	1.88	-21.99

Anche per le tensioni radiali si rispecchia il comportamento già visto nelle deformazioni, con dei picchi maggiori di 5 volte nel modello con le staffe.

Le tensioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.76 e Figura 4.77.

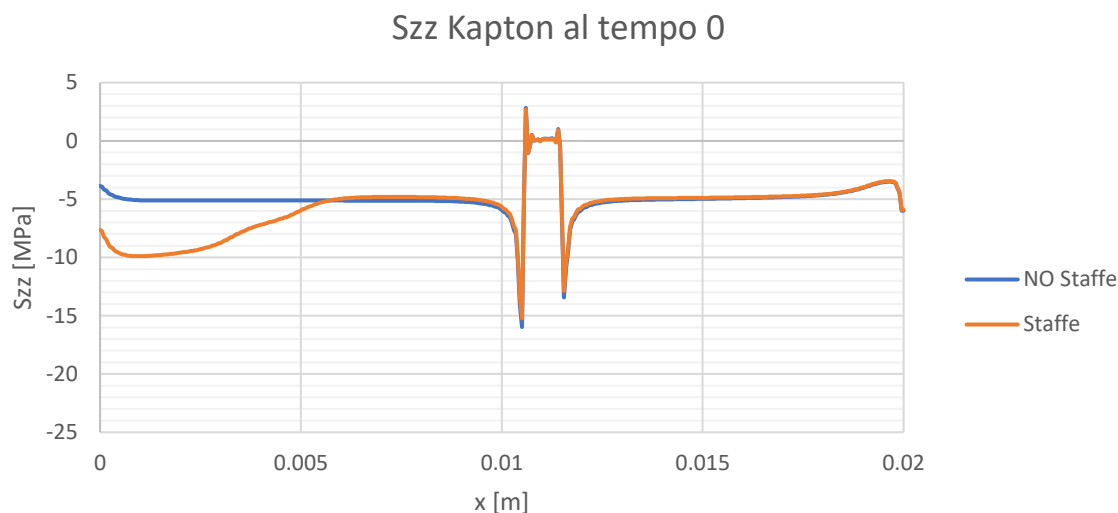


Figura 4.76 Szz nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

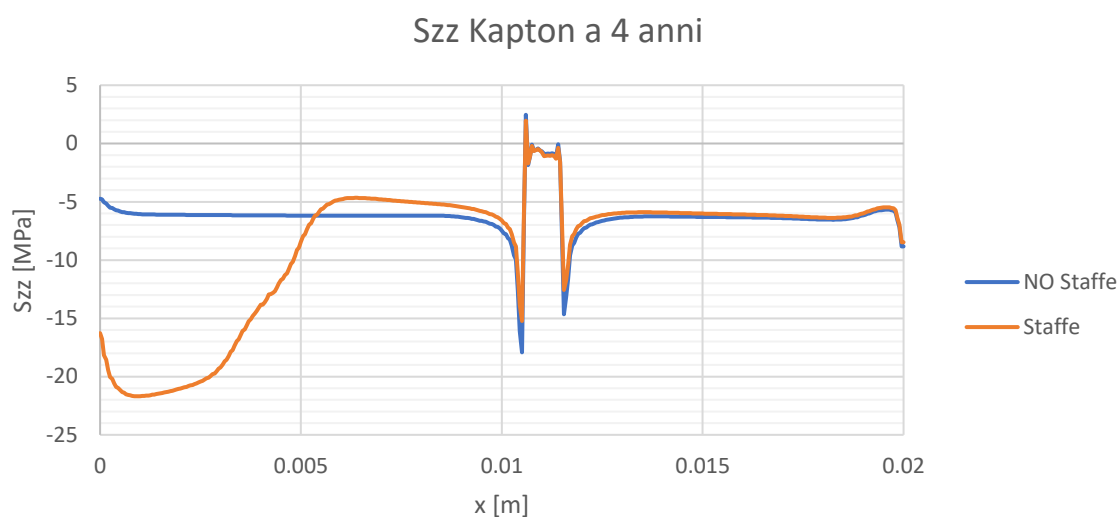


Figura 4.77 Szz nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.33 Max e Min Szz nel kapton

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	2.83	-15.97
	4 anni	2.46	-17.92
Staffe	0	8.01	-15.23
	4 anni	1.96	-21.69

Anche per le tensioni circonferenziali il comportamento è sovrapponibile a quello visto per le tensioni radiali.

4.4.3 Tensioni nell'FR4

Le tensioni assiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.78 e Figura 4.79.

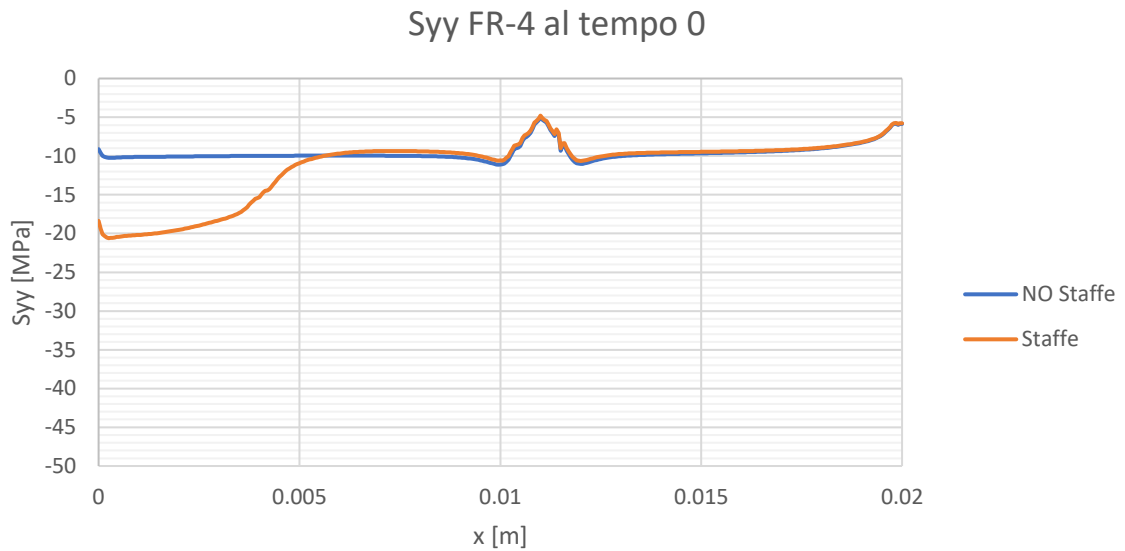


Figura 4.78 Syy nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

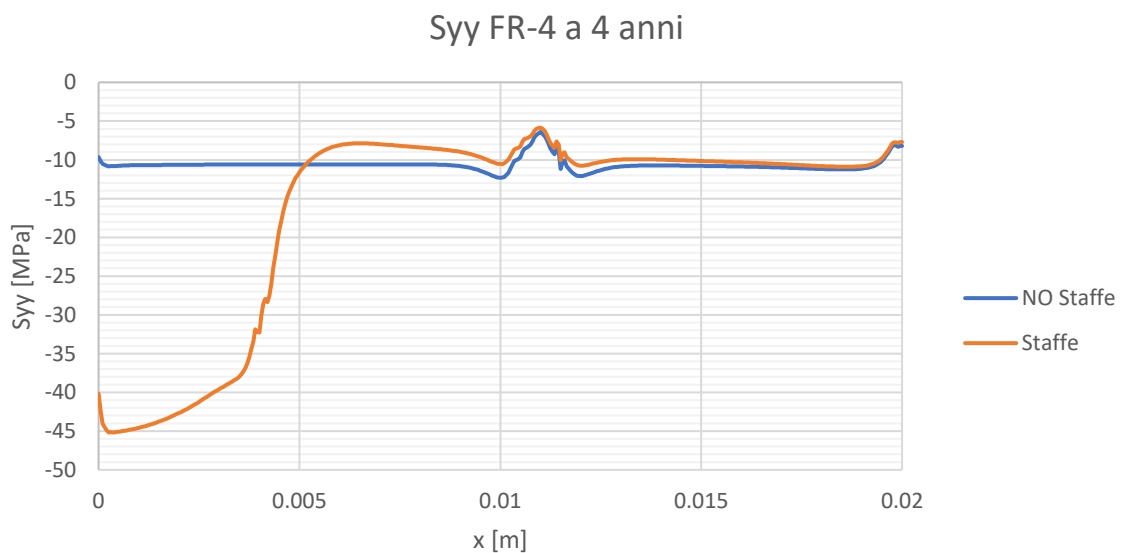


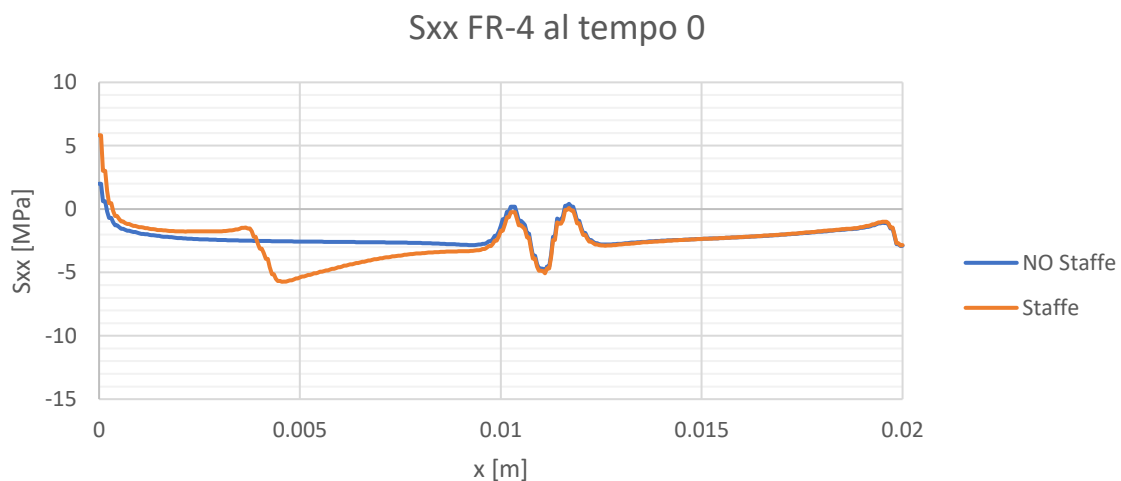
Figura 4.79 Syy FR4a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.34 Max e Min S_{yy} FR4

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	-4.96	-11.12
	4 anni	-6.39	-12.31
Staffe	0	-4.79	-20.60
	4 anni	-5.85	-45.18

A 4 anni dall'applicazione del carico si osserva come le staffe comportino un aumento delle tensioni di compressione nello strato di FR4 di circa 4.5 volte rispetto al modello senza staffe.

Le tensioni radiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.80 e Figura 4.81.

Figura 4.80 S_{xx} nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

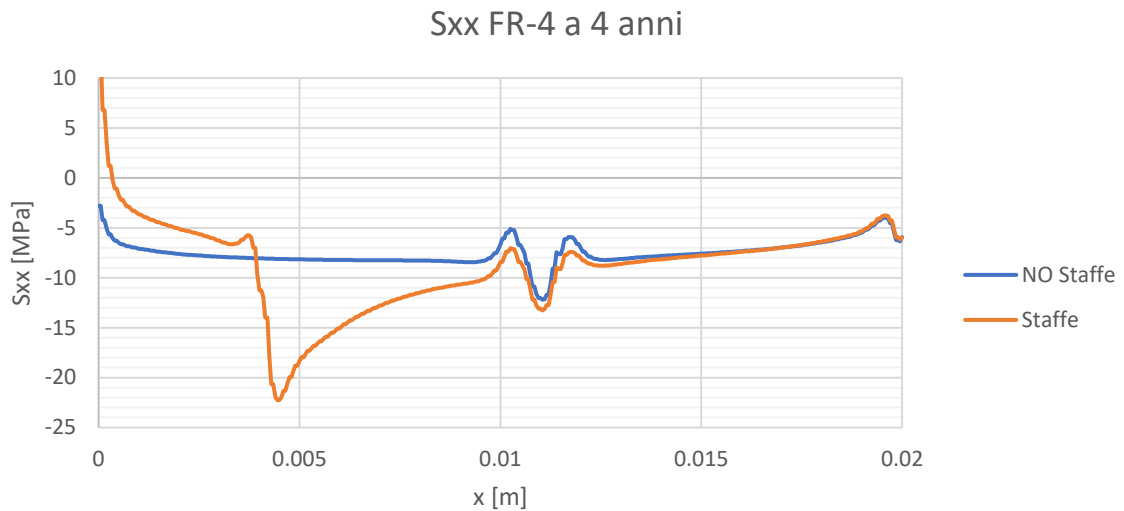


Figura 4.81 Sxx nel FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.35 Max e Min Sxx FR4

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	2.00	-4.91
	4 anni	-2.78	-12.19
Staffe	0	5.82	-5.74
	4 anni	12.92	-22.26

Nelle tensioni radiali si nota una forte discontinuità nelle tensioni radiali all'interno dello strato di FR4, in particolare, nel punto corrispondente al raggio della base del distanziale (4 mm). I picchi in compressione raggiungono -22 MPa circa all'interno dell'area senziante, a fronte dei circa -8 MPa del modello senza staffe.

Le tensioni circonferenziali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.82 e Figura 4.83.

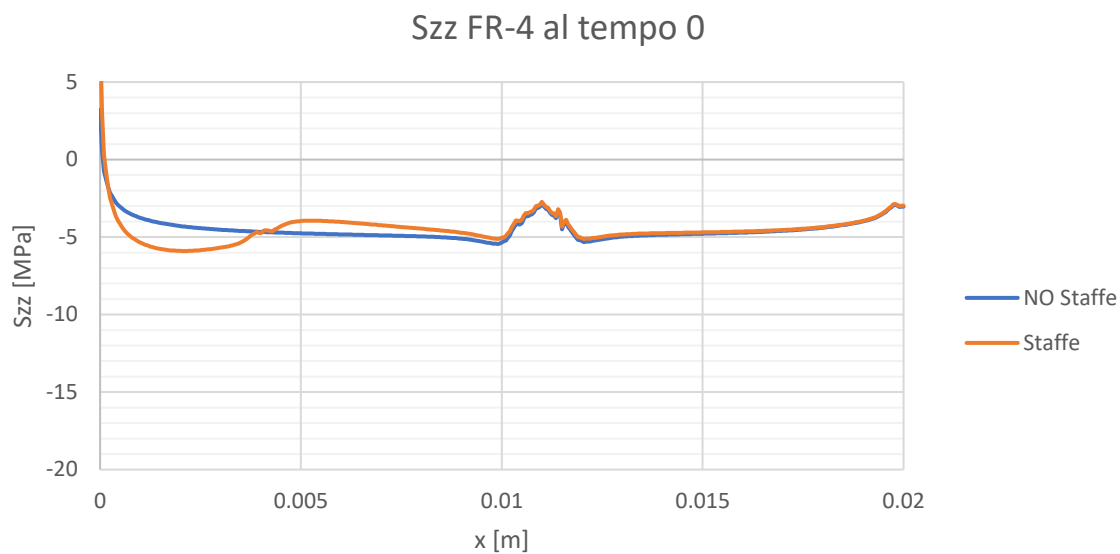


Figura 4.82 S_{zz} FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

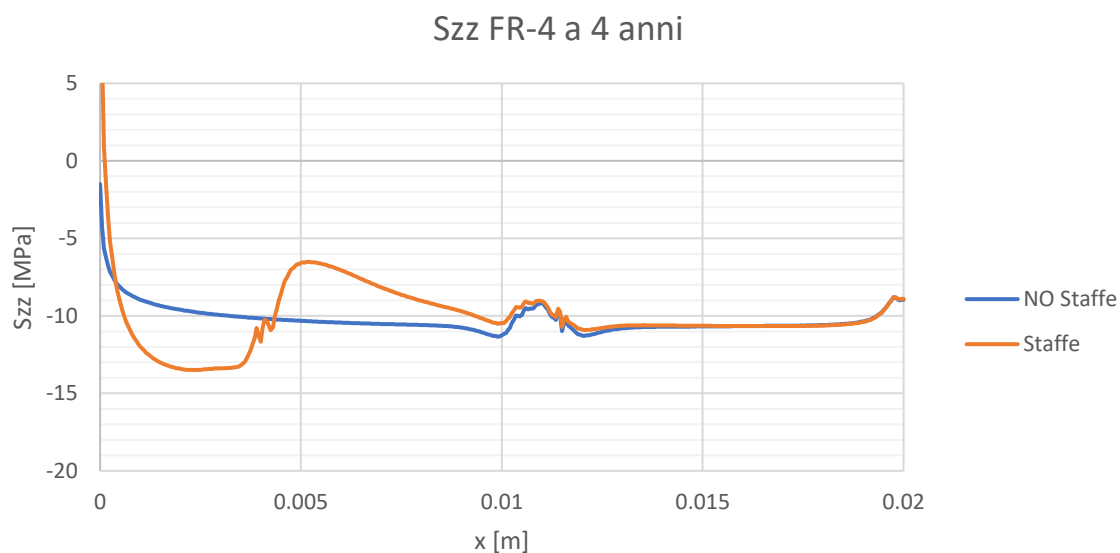


Figura 4.83 S_{zz} FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.36 Max e Min S_{zz} FR4

Sensore	Tempo	S_{zz} [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	3.22	-5.45
	4 anni	-1.51	-11.35
Staffe	0	8.30	-5.90
	4 anni	18.51	-13.49

Le staffe comportano delle forti discontinuità anche nelle tensioni circonferenziali, sia in trazione che in compressione.

4.4.4 Tensioni nella malta

Le tensioni assiali in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione posta nella malta a 0.5 cm dal sensore sono mostrate in Figura 4.84 e Figura 4.85:

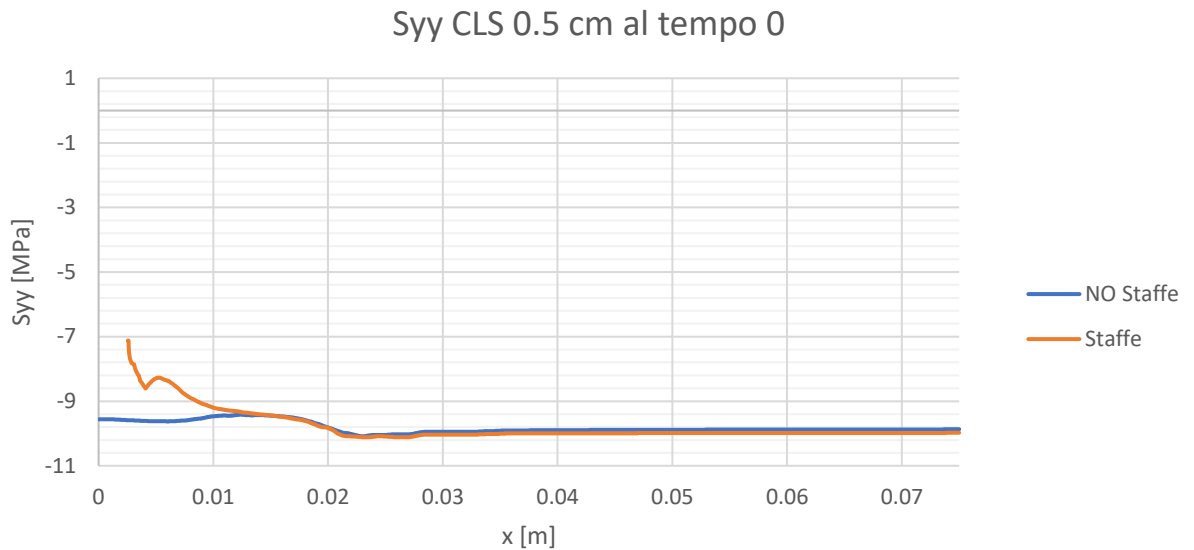


Figura 4.84 Syy CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

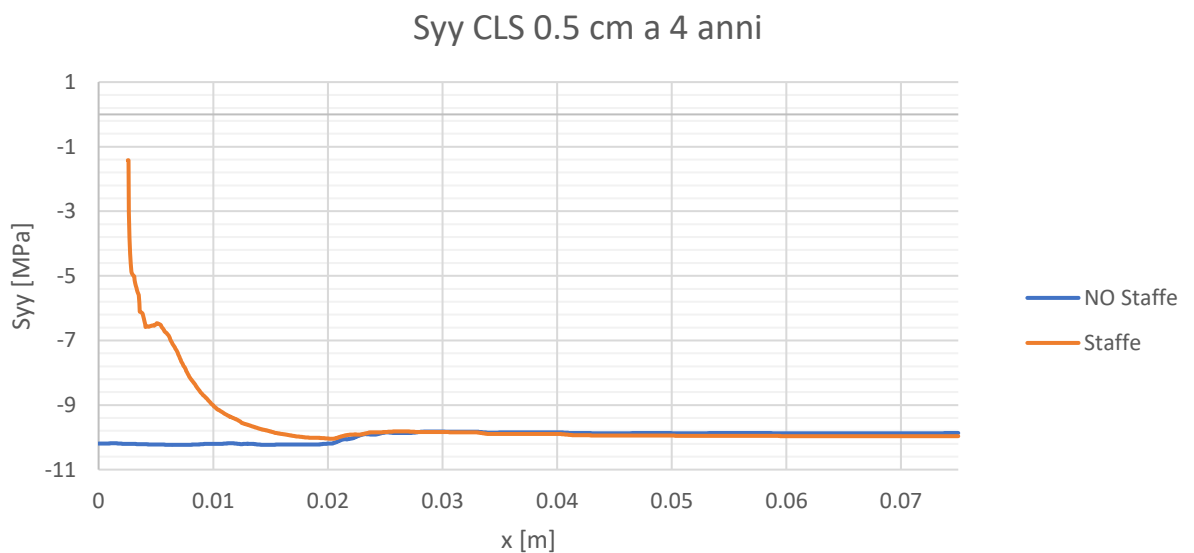


Figura 4.85 Syy CLS a 4 anni dall'applicazione del carico

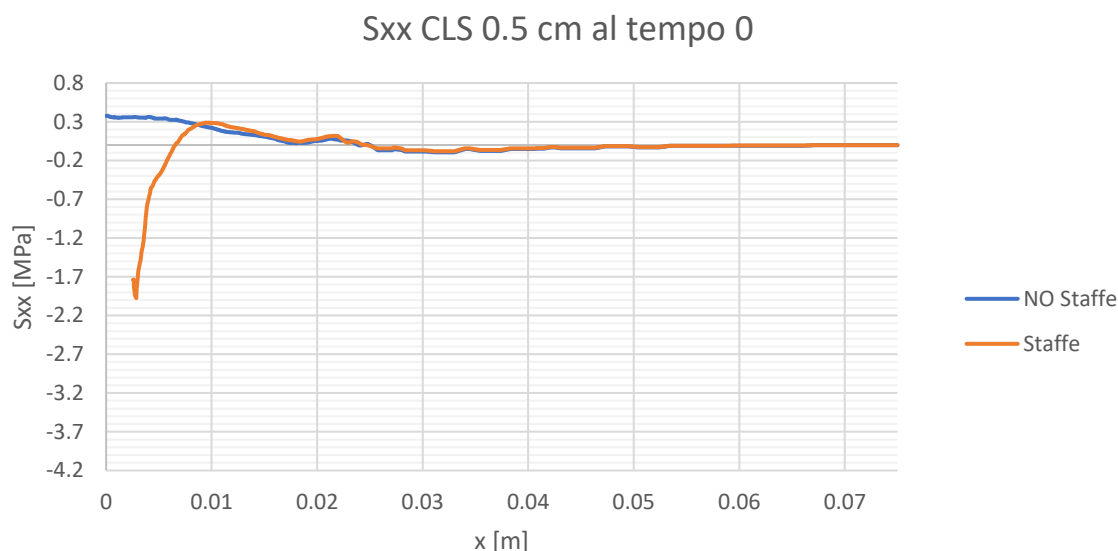
Tabella 4.37 Max e Min S_{yy} CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	-9.41	-10.09
	4 anni	-9.82	-10.24
Staffe	0	-7.12	-10.12
	4 anni	-1.42	-10.05

Dai grafici si nota come anche nella malta, le staffe portano una forte variazione di tensioni, specialmente in corrispondenza dell'interfaccia tra malta e staffe. Le tensioni, infatti, si avvicinano a zero e tendono a mandare in trazione la malta, che in quei punti fessura.

Procedendo verso il raggio esterno del sensore invece l'influenza delle staffe scompare e le curve tornano a sovrapporsi su un valore costante pari al carico applicato di -10 MPa.

Le tensioni radiali sono riportate in Figura 4.86 e Figura 4.87.

Figura 4.86 S_{xx} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

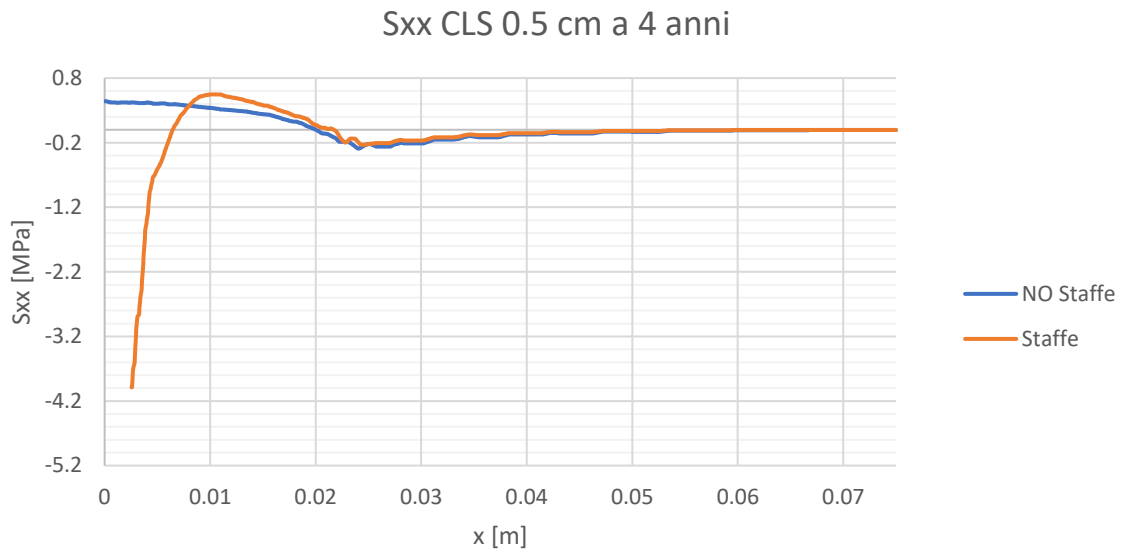


Figura 4.87 Sxx nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.38 Max e Min Sxx CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	0.38	-0.09
	4 anni	0.44	-0.29
Staffe	0	0.29	-1.98
	4 anni	0.55	-3.99

Nelle tensioni radiali si ha un comportamento praticamente inverso rispetto alle tensioni assiali. La presenza delle staffe, in corrispondenza dell'asse di rotazione tende a far aumentare le tensioni radiali di compressione, con un picco massimo di tensioni, a 4 anni, di circa 10 volte superiori alle tensioni che si hanno nel modello senza staffe.

Le tensioni circonferenziali sono riportate in Figura 4.88 e Figura 4.89.

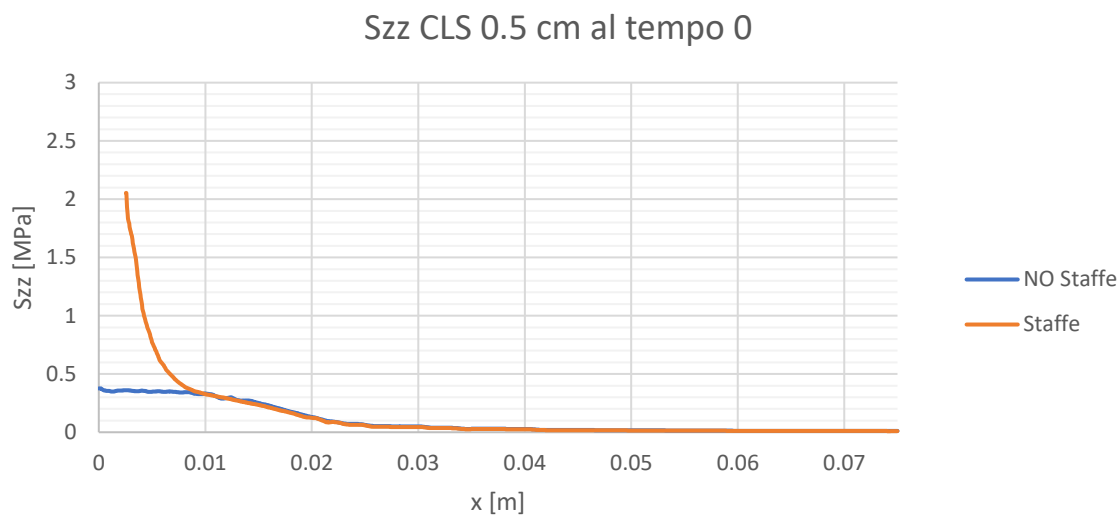


Figura 4.88 Szz nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

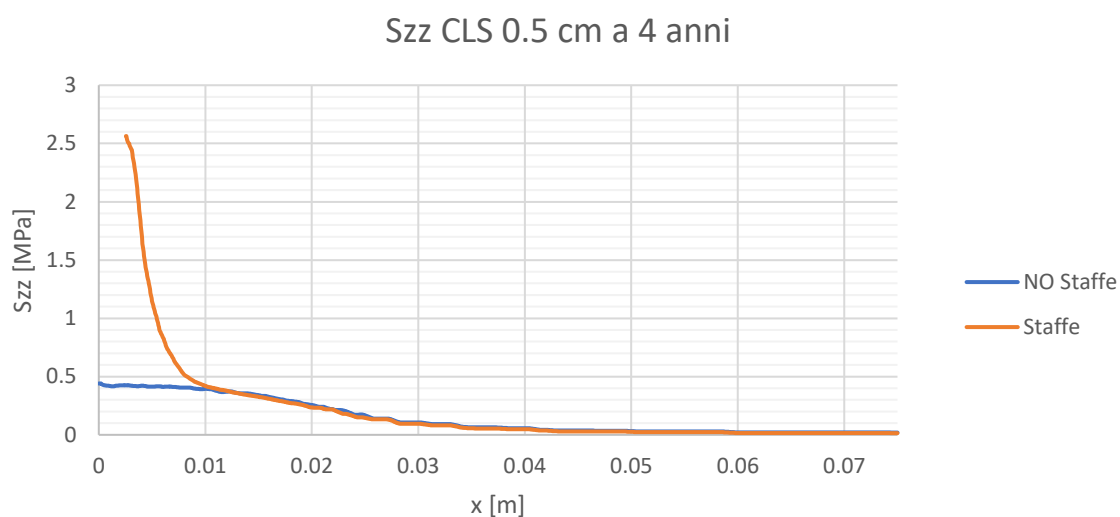


Figura 4.89 Szz nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.39 Max e Min Szz CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
NO Staffe	0	0.38	0.01
	4 anni	0.44	0.02
Staffe	0	2.05	0.01
	4 anni	2.56	0.01

Le staffe condizionano negativamente anche le tensioni circonferenziali. In corrispondenza dell'interfaccia tra malta e staffe, le tensioni raggiungono la tensione di fessurazione.

4.4.5 Evoluzione fessurazione nel tempo

Appena dopo l'applicazione della pressione di 10 MPa, quindi al tempo 0, si ha uno stato fessurativo come mostrato in Figura 4.90:

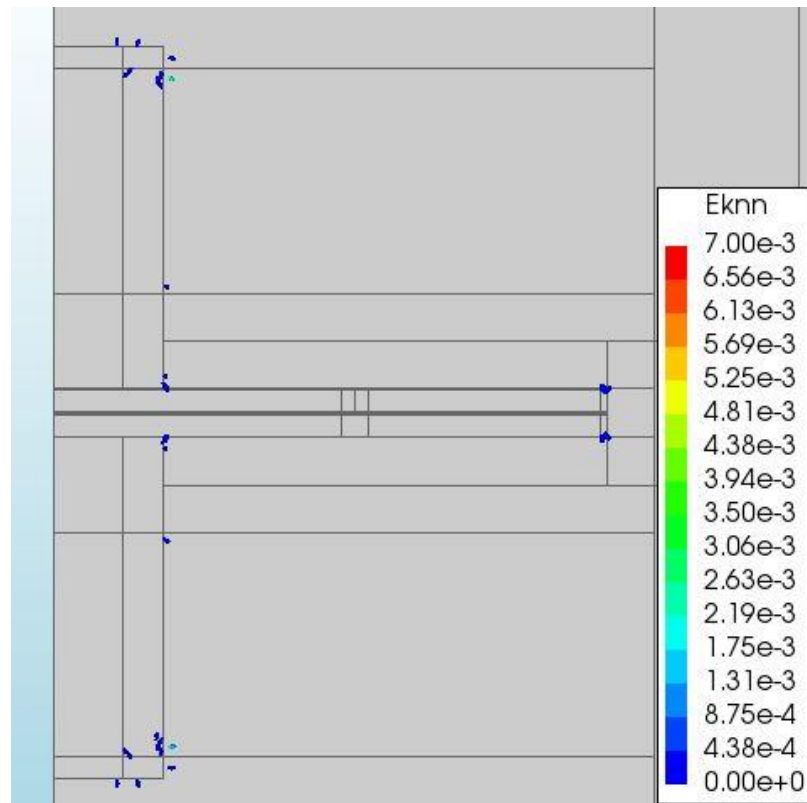


Figura 4.90 Stato fessurativo al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

Oltre alle fessure in corrispondenza dell'estremità del sensore, la presenza delle staffe comporta una fessurazione, anche subito dopo l'applicazione del carico, in corrispondenza delle zone di discontinuità dovute alla presenza delle stesse.

A distanza di un mese dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 4.91:

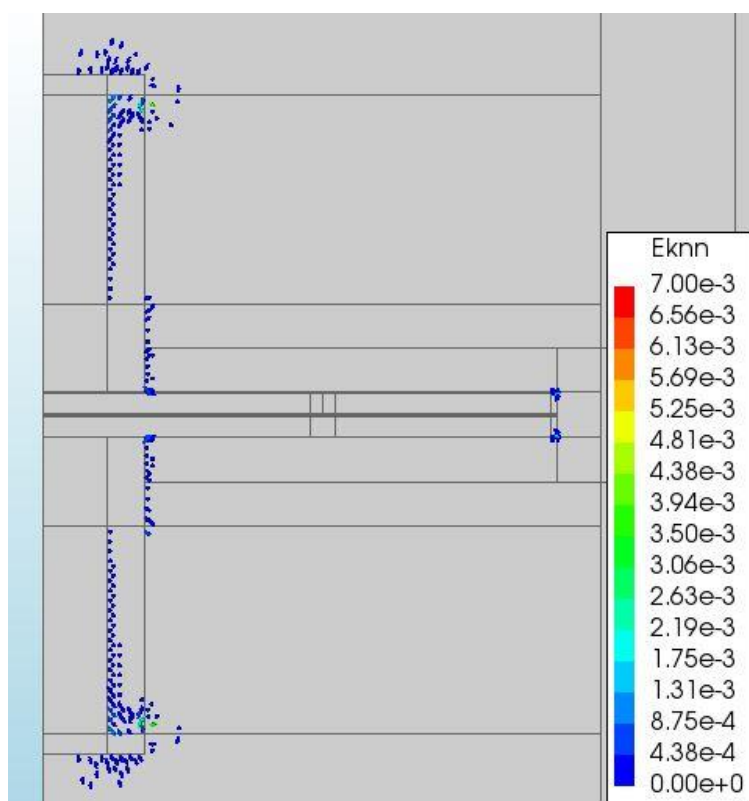


Figura 4.91 Stato fessurativo a distanza di 1 mese dall'applicazione del carico

A distanza di un anno dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 4.92.

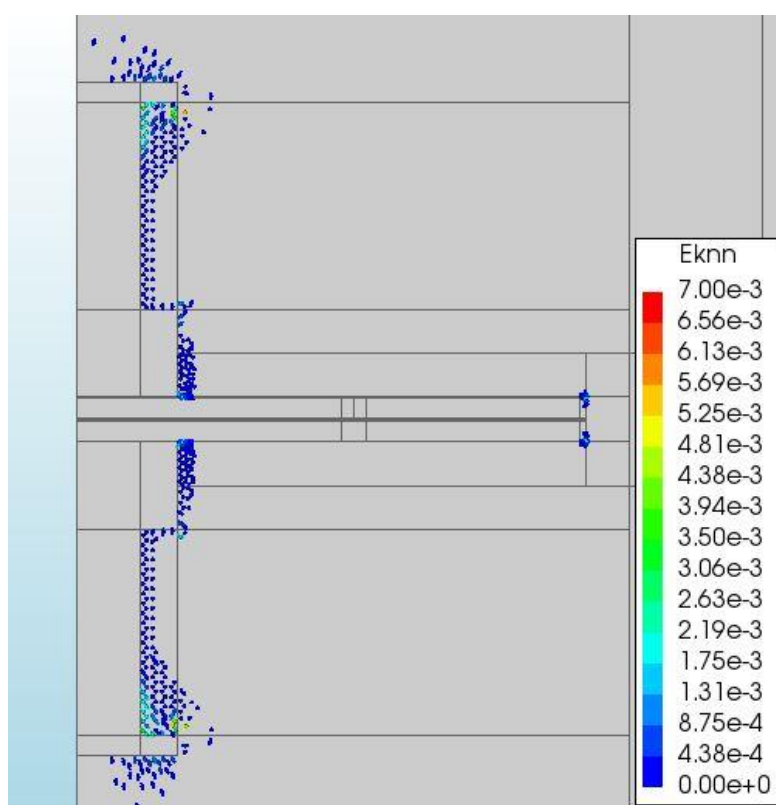


Figura 4.92 Stato fessurativo a distanza di 1 anno dall'applicazione del carico

A distanza di quattro anni dall'applicazione del carico, lo stato fessurativo si evolve e appare come in Figura 4.93.

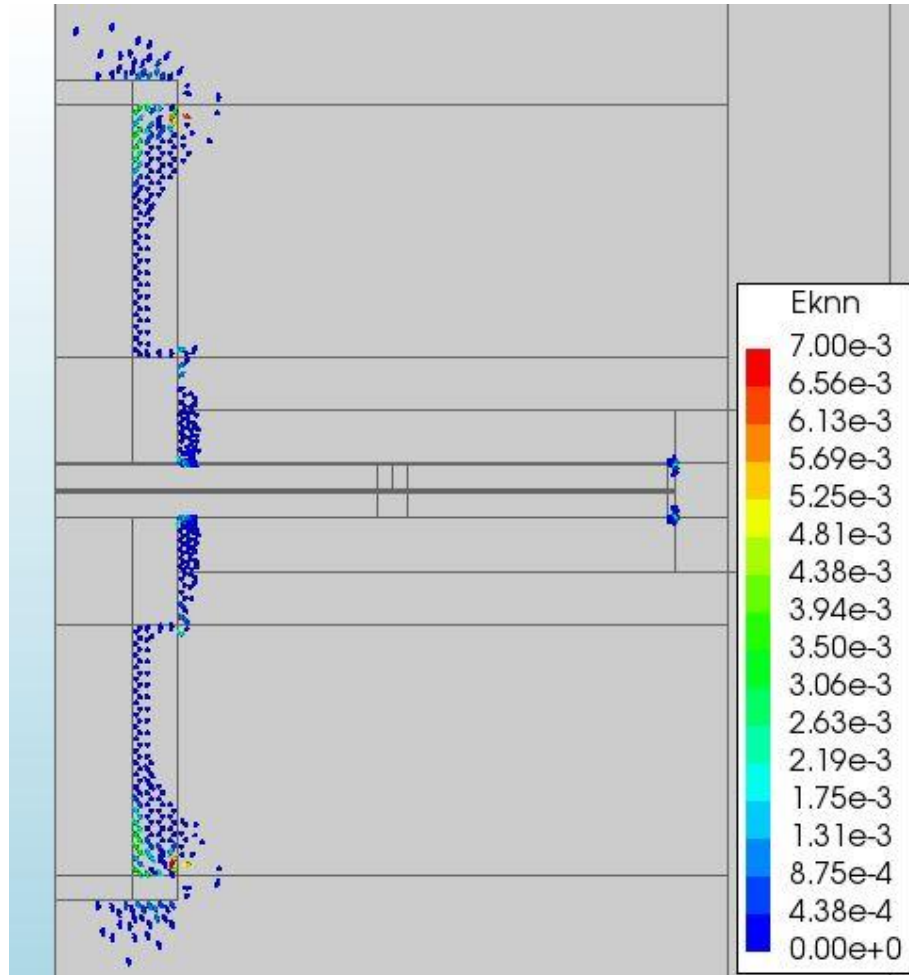


Figura 4.93 Stato fessurativo a distanza di 4 anni dall'applicazione del carico

Si nota come la fessurazione evolve nel corso del tempo, interessando maggiormente la zona di malta che circonda le staffe.

La deformazione normale al piano delle fessure $\varepsilon_{k,nn}$ massima è pari a circa $7.00e-3$.

4.4.6 Analisi area senziente

In Tabella 4.40 si riportano le variazioni di volume del kapton dovute alla deformazione assiale. Si riporta inoltre la media delle deformazioni assiali, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico.

Nell'analisi è stata presa in considerazione solo la zona senziente del sensore, cioè quella che si trova tra l'asse di rotazione e l'intaglio nel rame.

Tabella 4.40 Analisi area senziente

Sensore	Tempo	Var. Volume [mm ³]	Raggio [mm]	Area senziente [mm ²]	Var. spessore [%]	Media Eyy	Dev. St.	C.O.V.
NO Staffe	0	-2.42E-02	10.5	346	-0.28%	-2.70E-03	5.60E-04	-21%
	4 anni	-2.43E-02	10.5	346	-0.28%	-2.68E-03	6.47E-04	-24%
Staffe	0	-2.67E-02	10.5	346	-0.30%	-3.63E-03	1.27E-03	-35%
	4 anni	-3.22E-02	10.5	346	-0.37%	-5.82E-03	4.21E-03	-72%

Analizzando la variazione di spessore in percentuale si nota che la presenza delle staffe, influenzando le deformazioni assiali del kapton, comporta una variazione di spessore maggiore.

A 4 anni dall'applicazione del carico la deformazione media nel kapton si nota essere più del doppio nel modello con le staffe, pur rimanendo ampiamente nel campo elastico del materiale.

Esaminando anche il coefficiente di variazione si osserva come l'influenza delle staffe comporti ovviamente un aumento della deviazione standard, che si ripercuote di conseguenza nel C.O.V., che subisce una variazione del 37% tra il momento di applicazione del carico e 4 anni, a fronte del 3% riscontrata nel modello senza staffe.

4.5 Effetto della viscoelasticità dello strato dielettrico in kapton

Vengono messi a confronto i risultati ottenuti con la stessa geometria e lo stesso tipo di analisi dei capitoli precedenti, con la differenza che in uno il kapton è modellato come materiale viscoelastico (Paragrafo 3.2.5). I risultati sono riportati a 2 ore dall'applicazione del carico in quanto il kapton ha già sviluppato tutta la sua viscosità.

A causa del suo ridotto spessore e della viscosità piuttosto limitata non si riportano particolari differenze nel comportamento dei materiali che compongono il sensore. Le principali differenze si riportano nelle deformazioni del kapton in direzione assiale, che vengono riportate in Figura 4.94 e Figura 4.95, mentre quelle in direzione radiale e circonferenziale non subiscono variazioni significative.

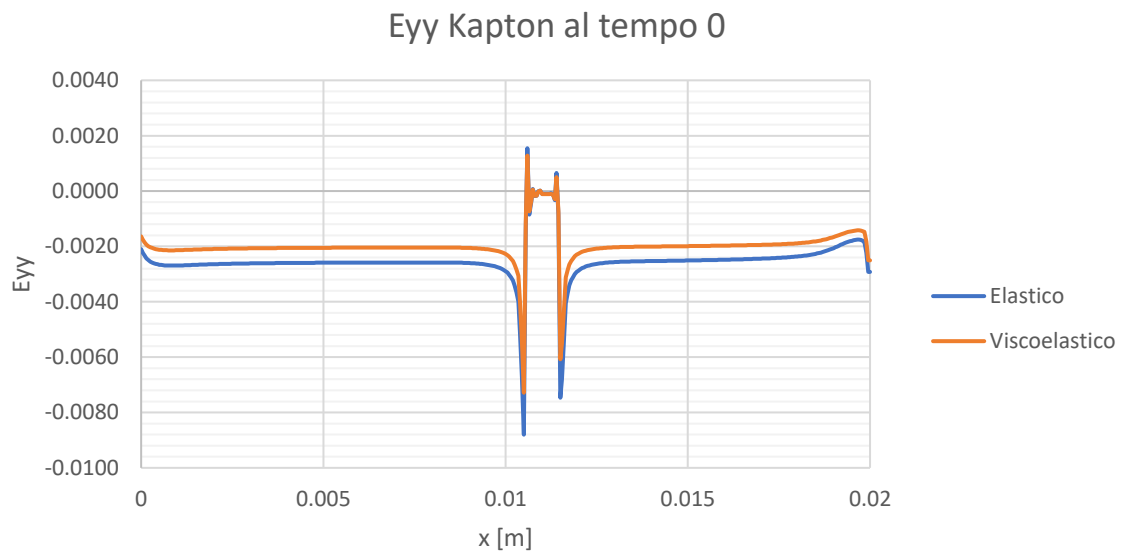


Figura 4.94 E_{yy} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

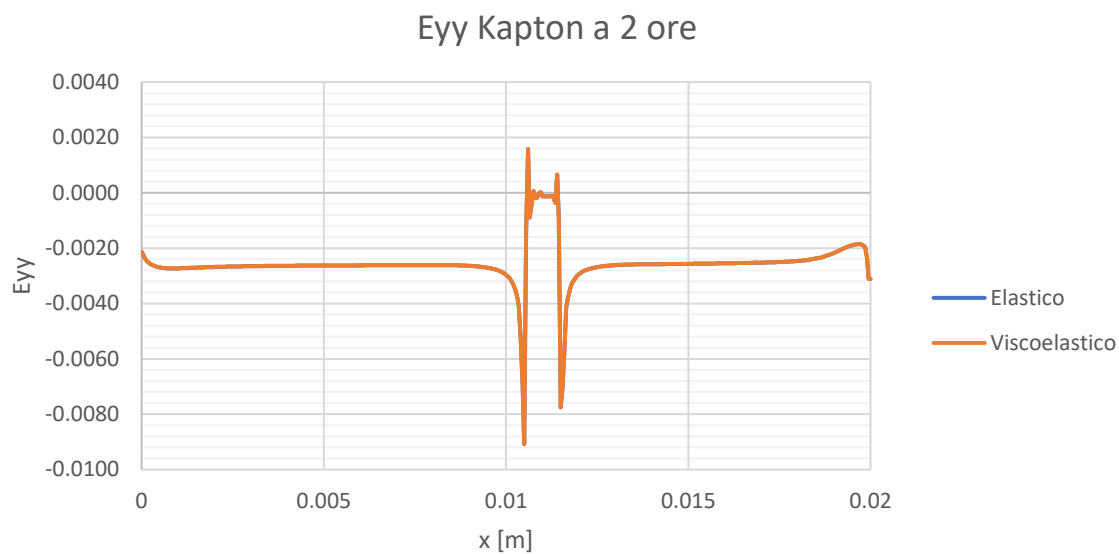


Figura 4.95 Eyy nel kapton a due ore dall'applicazione del carico

Tabella 4.41 Max e Min Eyy nel kapton

Sensore	Tempo	Eyy	
		Max	Min
Elastico	0	1.55E-03	-8.80E-03
	2 ore	1.58E-03	-9.09E-03
Viscoelastico	0	1.28E-03	-7.29E-03
	2 ore	1.58E-03	-9.08E-03

Dai grafici si nota che le deformazioni nel kapton aumentino nel tempo a causa del comportamento viscoso. In particolare, nell'area sensiente l'aumento della deformazione assiale nel kapton, sotto il carico applicato, è di oltre il 20% tra il momento dell'applicazione del carico e due ore.

4.5.1 Analisi area senziente

In Tabella 4.42 si riportano le variazioni di volume del kapton dovute alla deformazione assiale. Si riporta inoltre la media delle deformazioni assiali, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico.

Nell'analisi è stata presa in considerazione solo la zona senziente del sensore, cioè quella che si trova tra l'asse di rotazione e l'intaglio nel rame.

Tabella 4.42 Analisi area senziente

Sensore	Tempo	Var. Volume [mm ³]	Raggio [mm]	Area senziente [mm ²]	Var. spessore [%]	Media Eyy	Dev. St.	C.O.V.
Elastico	0	-2.42E-02	10.5	346	-0.28%	-2.70E-03	5.60E-04	-21%
	2 ore	-2.46E-02	10.5	346	-0.28%	-2.74E-03	5.82E-04	-21%
Visco elastico	0	-1.91E-02	10.5	346	-0.22%	-2.13E-03	4.60E-04	-22%
	2 ore	-2.46E-02	10.5	346	-0.28%	-2.74E-03	5.82E-04	-21%

La deformazione assiale media del kapton viscoelastico risulta minore al momento dell'applicazione del carico, per poi attestarsi sullo stesso valore del kapton elastico a due ore. Ovviamente ciò si ripercuote nella variazione di spessore del kapton che risulta minore al momento dell'applicazione del carico.

4.6 Effetto della geometria del sensore

Si riportano tensioni e deformazioni nei materiali dei sensori, al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico ed a quattro anni dall'applicazione del carico, considerando nell'analisi sia il creep che il ritiro. I sensori sono così indicati:

- ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5)
- ϕ 40 (14.5 – 1 – 4.5)
- ϕ 30 (13 – 1 – 1) NO kapton
- ϕ 30 (9.5 – 1 – 4.5)
- ϕ 40 (18 – 1 – 1)
- ϕ 40 (10.5 – 1 – 8.5)

4.6.1 Deformazioni nel kapton

Le deformazioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.96 e Figura 4.97.

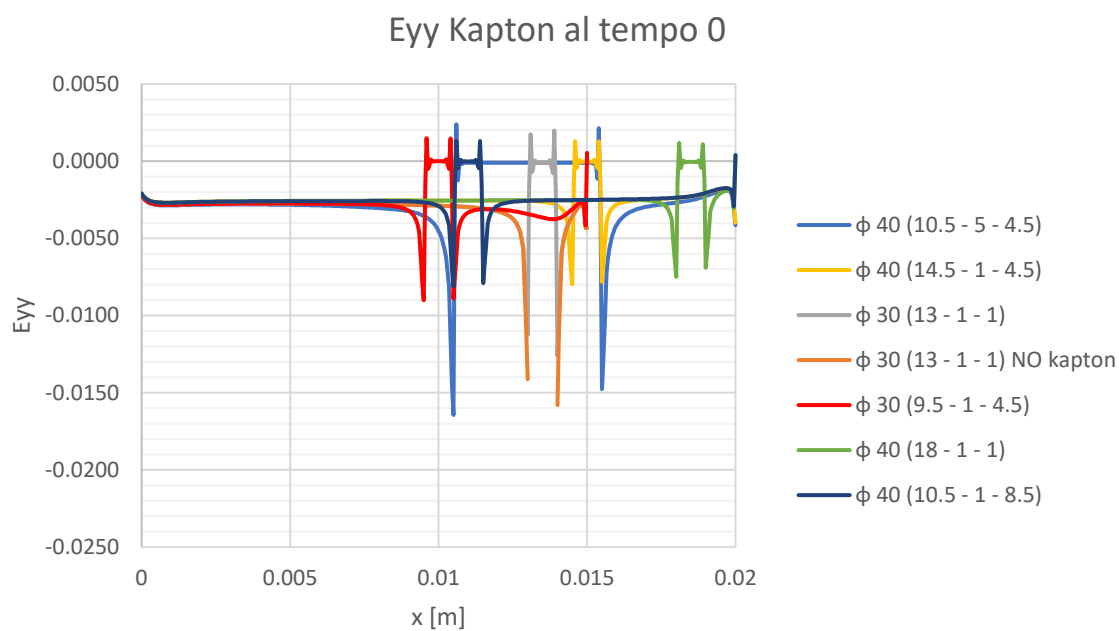


Figura 4.96 E_{yy} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

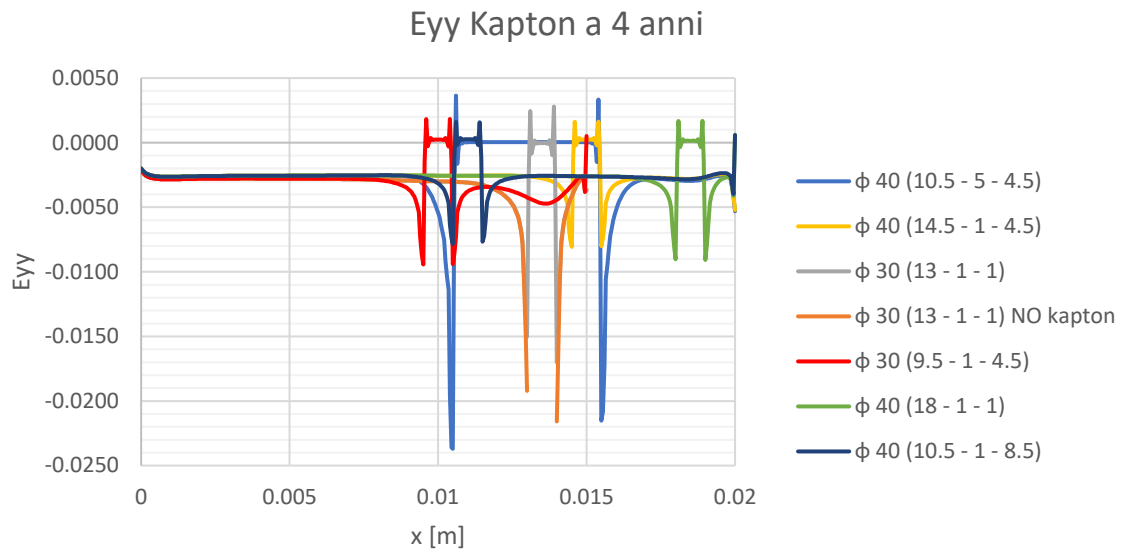


Figura 4.97 Eyy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.43 Max e Min Eyy nel kapton

Sensore	Tempo	Eyy	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	2.38E-03	-1.64E-02
	4 anni	3.64E-03	-2.37E-02
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	1.99E-03	-1.26E-02
	4 anni	2.80E-03	-1.70E-02
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	-2.20E-03	-1.58E-02
	4 anni	-2.15E-03	-2.16E-02
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	1.29E-03	-7.97E-03
	4 anni	1.62E-03	-8.07E-03
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	1.48E-03	-9.01E-03
	4 anni	1.84E-03	-9.43E-03
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	1.18E-03	-7.50E-03
	4 anni	1.68E-03	-9.08E-03
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	1.32E-03	-8.10E-03
	4 anni	1.61E-03	-7.85E-03

Al netto di posizione e dimensione della discontinuità e del fatto che i sensori con diametro di 30 mm sono più piccoli, il comportamento nel kapton è praticamente uguale nei sensori.

Nei sensori in cui l'intaglio nel rame è solo di 1 mm si riesce ad avere una zona uniforme di tensioni nel kapton più ampia, anche se il sensore è ridotto in dimensioni.

Interessante notare come i picchi di deformazione nel kapton si riducono di circa il 50% nei sensori con diametro di 40 mm ed intaglio di 1 mm, indipendentemente dalla posizione dell'intaglio.

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.98 e Figura 4.99.

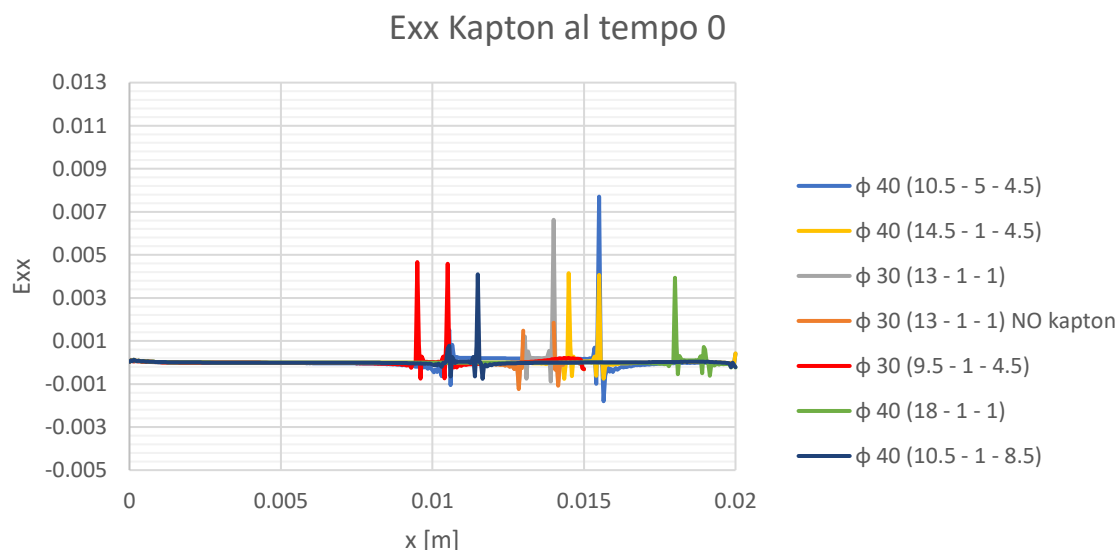


Figura 4.98 Exx nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

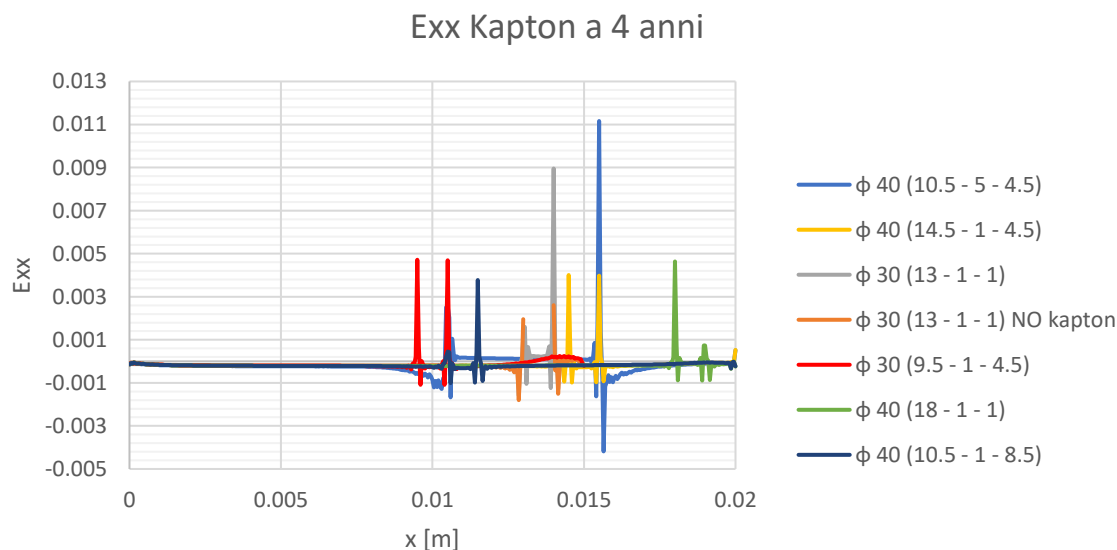


Figura 4.99 Exx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.44 Max e Min Exx nel kapton

Sensore	Tempo	Exx	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	7.71E-03	-1.80E-03
	4 anni	1.12E-02	-4.18E-03
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	6.63E-03	-1.10E-03
	4 anni	8.96E-03	-1.60E-03
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	1.85E-03	-1.24E-03
	4 anni	2.61E-03	-1.80E-03
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	4.15E-03	-7.60E-04
	4 anni	4.01E-03	-9.85E-04
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	4.66E-03	-7.49E-04
	4 anni	4.72E-03	-1.09E-03
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	3.94E-03	-6.16E-04
	4 anni	4.64E-03	-8.94E-04
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	4.10E-03	-7.59E-04
	4 anni	3.78E-03	-1.01E-03

Anche in direzione radiale X, al netto della dimensione e posizione della discontinuità il comportamento nel kapton per i sensori è pressoché lo stesso, ma si nota un comportamento migliore, con picchi più bassi di oltre il 50% a 4 anni, nei sensori con diametro di 40 mm ed intaglio di 1 mm.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.100 e Figura 4.101.

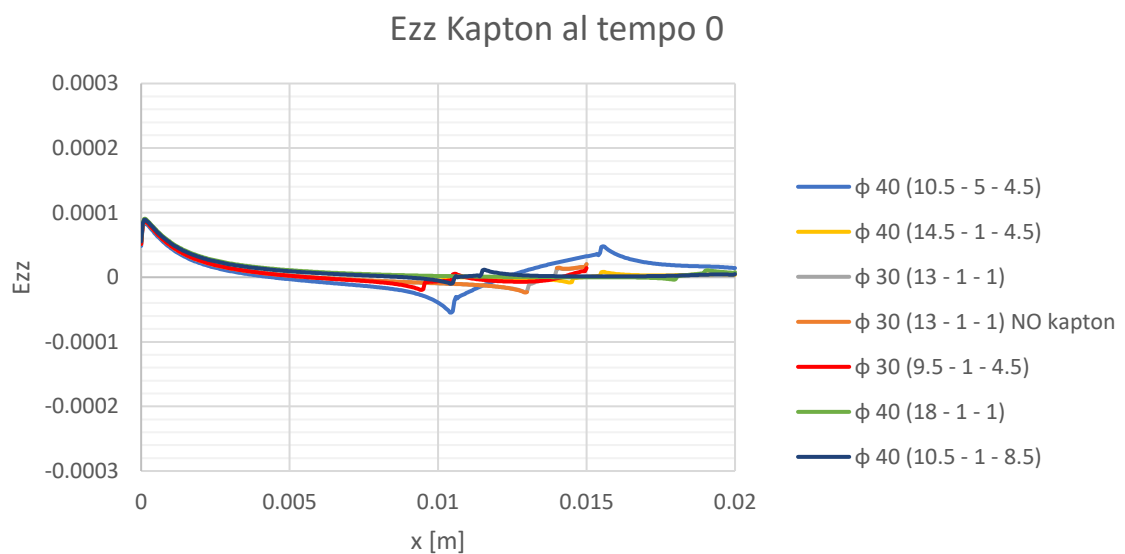


Figura 4.100 Ezz nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

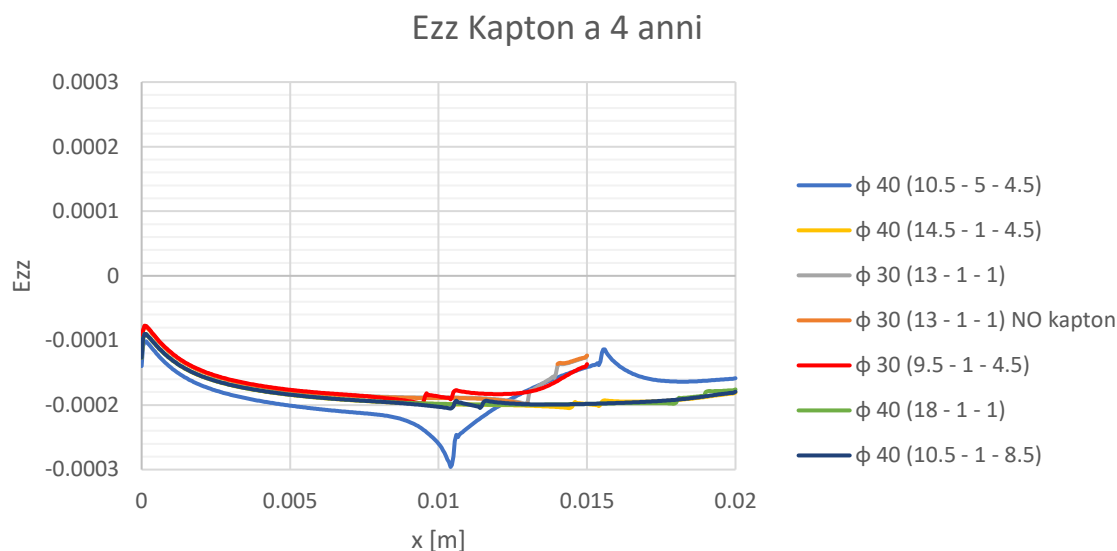


Figura 4.101 Ezz nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.45 Max e Min Ezz nel kapton

Sensore	Tempo	Ezz	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	8.41E-05	-5.47E-05
	4 anni	-1.02E-04	-2.96E-04
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	8.68E-05	-2.28E-05
	4 anni	-7.78E-05	-1.98E-04
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	8.68E-05	-2.36E-05
	4 anni	-7.83E-05	-2.00E-04
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	8.94E-05	-8.05E-06
	4 anni	-9.04E-05	-2.05E-04
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	8.70E-05	-1.96E-05
	4 anni	-7.71E-05	-1.98E-04
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	9.05E-05	-3.77E-06
	4 anni	-9.01E-05	-2.00E-04
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	8.91E-05	-9.83E-06
	4 anni	-9.00E-05	-2.06E-04

Nei sensori con diametro di 30 mm si riscontrano, all'estremità, delle deformazioni circonferenziali di compressione nel kapton inferiori di circa 2.0×10^{-5} , con una differenza di circa un ordine di grandezza rispetto alle deformazioni presenti nel materiale.

Il comportamento migliore anche in questo caso si riscontra però nei sensori con diametro di 40 mm ed intaglio di 1, con dei picchi praticamente inesistenti ed un comportamento uniforme lungo tutto il raggio del sensore.

4.6.2 Tensioni nel Kapton

Le tensioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.102 e Figura 4.103.

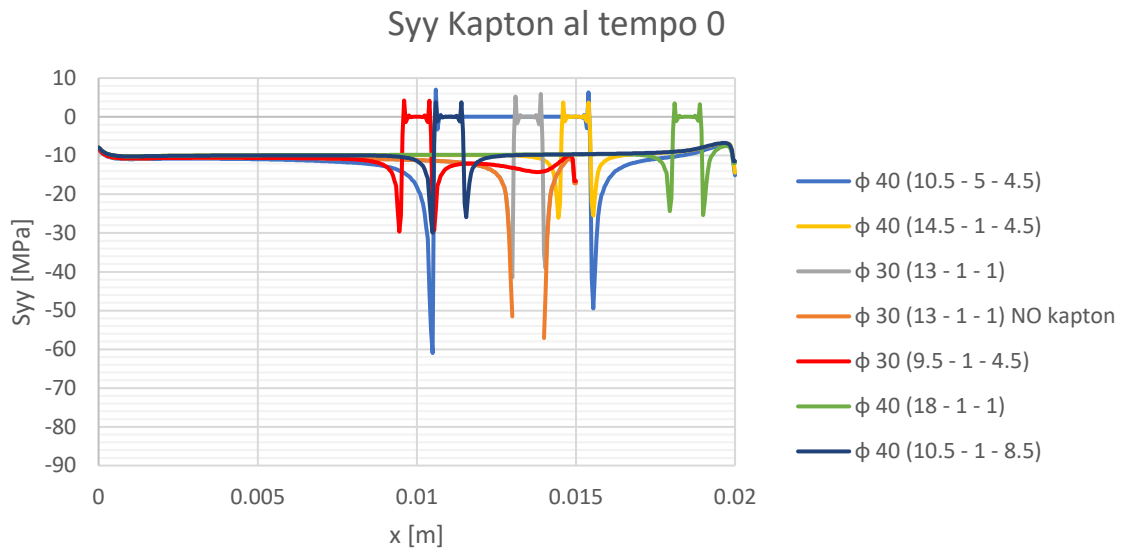


Figura 4.102 Syy nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

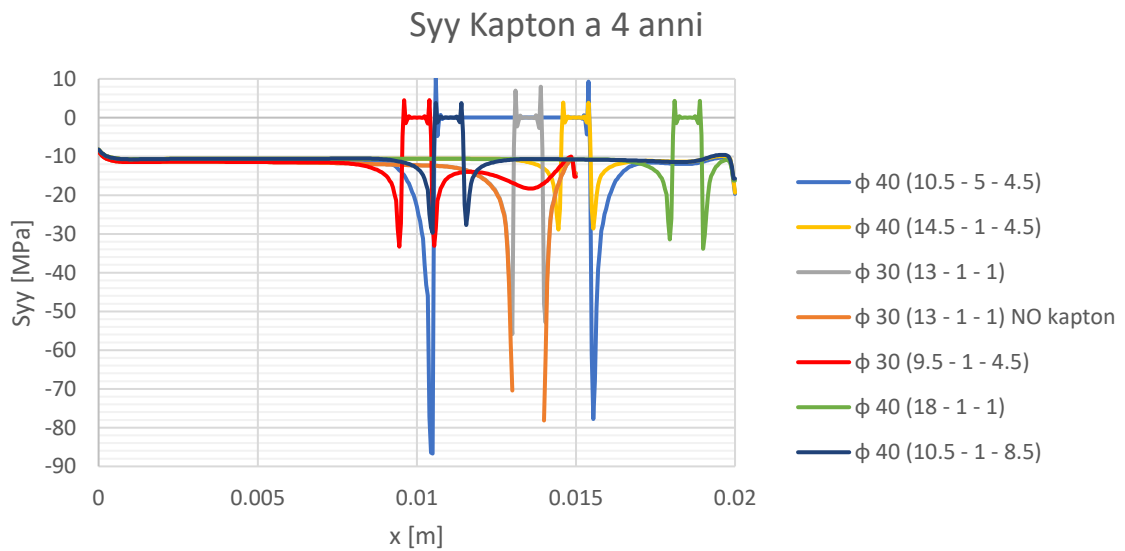


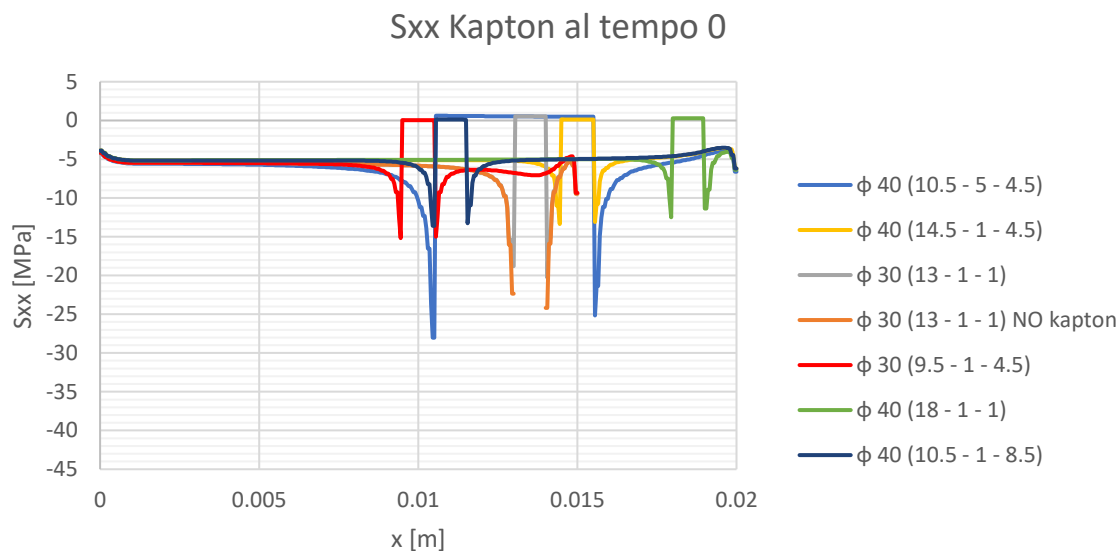
Figura 4.103 Syy nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.46 Max e Min S_{yy} nel kapton

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	7.02	-60.97
	4 anni	10.20	-86.69
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	5.89	-41.45
	4 anni	7.99	-55.86
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	-8.29	-57.10
	4 anni	-8.79	-78.16
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	3.72	-26.05
	4 anni	3.89	-28.89
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	4.21	-29.64
	4 anni	4.53	-33.30
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	3.49	-25.37
	4 anni	4.34	-33.85
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	3.78	-29.92
	4 anni	3.80	-29.73

Ovviamente nelle tensioni assiali si rispecchia il comportamento già visto nelle deformazioni assiali, con dei picchi che si riducono di oltre il 50% nei sensori con diametro di 40 mm ed intaglio di 1, indipendentemente dalla posizione dell'intaglio.

Le tensioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 4.104 e Figura 4.105.

Figura 4.104 S_{xx} nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

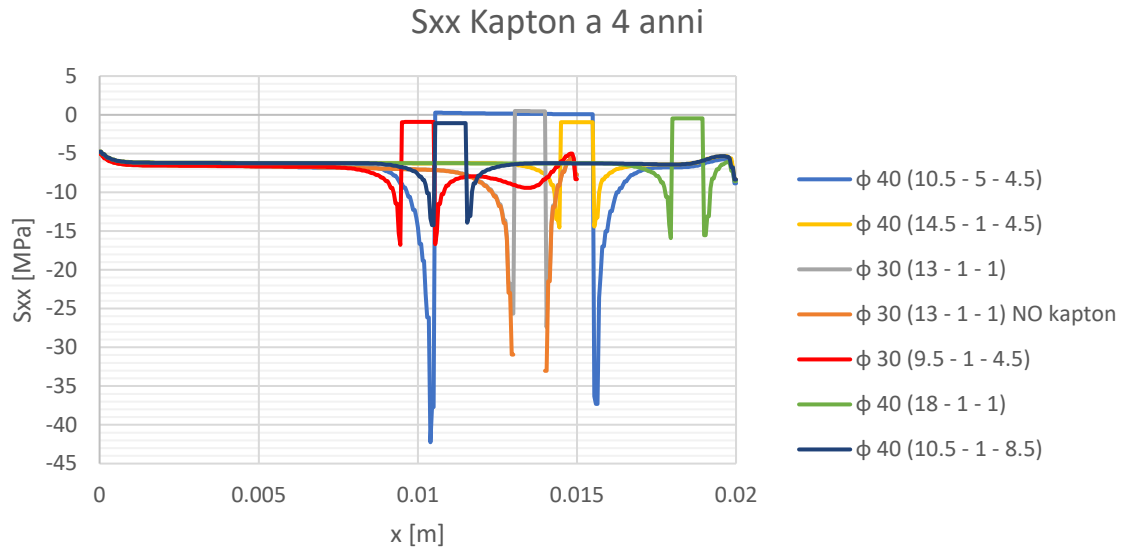


Figura 4.105 Sxx nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.47 Max e Min Sxx nel kapton

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	0.61	-28.03
	4 anni	0.29	-42.25
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	0.56	-20.28
	4 anni	0.50	-27.41
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	-4.12	-24.18
	4 anni	-5.02	-33.03
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	0.14	-13.36
	4 anni	-0.95	-14.53
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	0.05	-15.18
	4 anni	-0.92	-16.78
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	0.28	-12.49
	4 anni	-0.46	-15.91
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	0.11	-13.60
	4 anni	-1.07	-14.23

Le tensioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 4.106 e Figura 4.107.

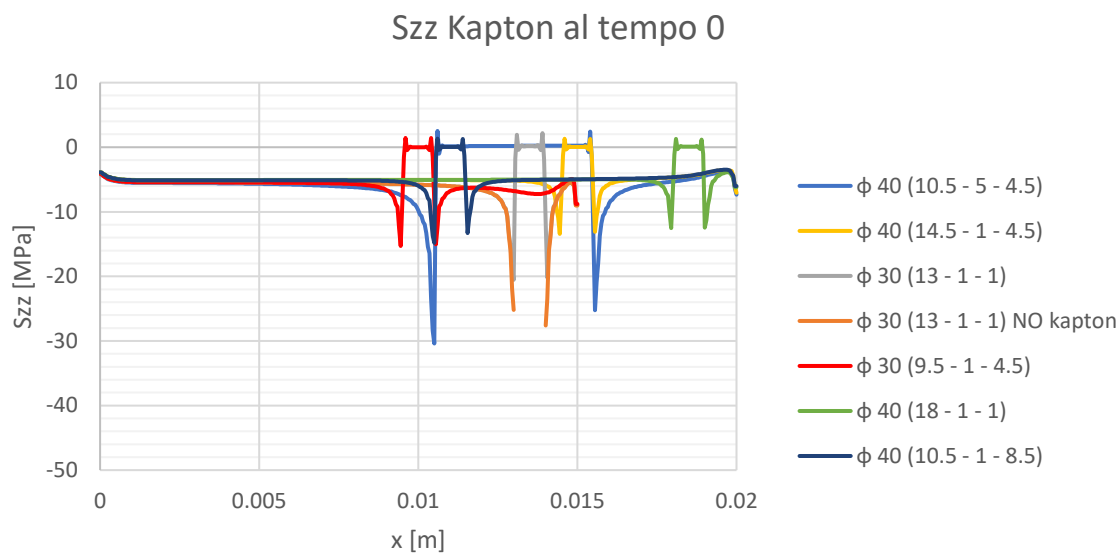


Figura 4.106 Szz nel kapton al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

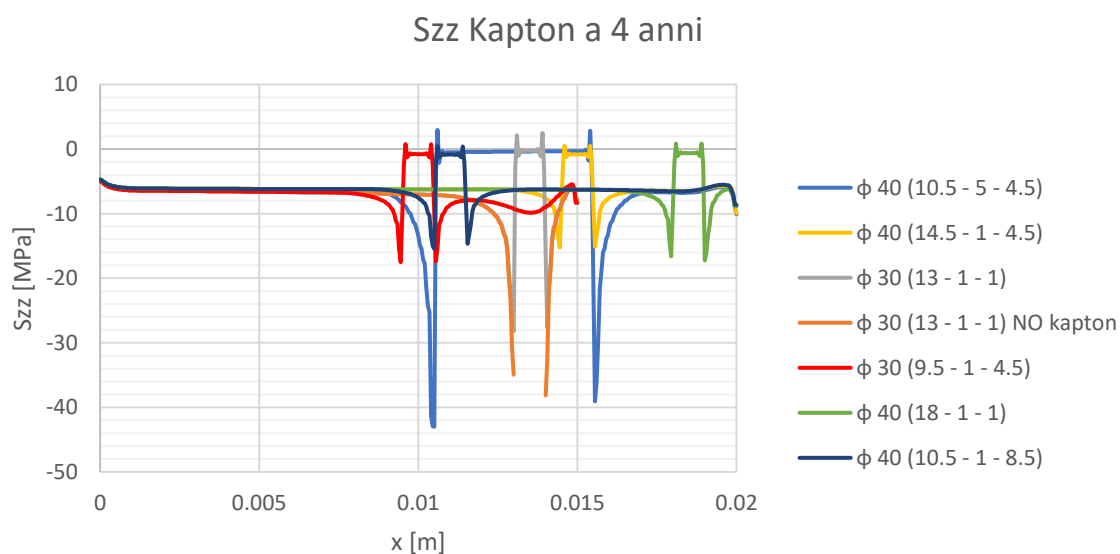


Figura 4.107 Szz nel kapton a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.48 Max e Min S_{zz} nel kapton

Sensore	Tempo	S_{zz} [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	2.52	-30.39
	4 anni	2.95	-43.00
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	2.18	-20.53
	4 anni	2.48	-28.21
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	-4.09	-27.60
	4 anni	-4.99	-38.15
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	1.31	-13.42
	4 anni	0.51	-15.27
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	1.43	-15.29
	4 anni	0.77	-17.52
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	1.29	-12.52
	4 anni	0.85	-17.24
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	1.33	-14.82
	4 anni	0.44	-15.45

Anche per le tensioni radiali e circonferenziali il comportamento del kapton è molto simile, ad eccezione dell'ampiezza delle zone di discontinuità, come già riscontrato nell'analisi delle deformazioni.

4.6.3 Tensioni nell'FR4

Le tensioni assiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.108 e Figura 4.109.

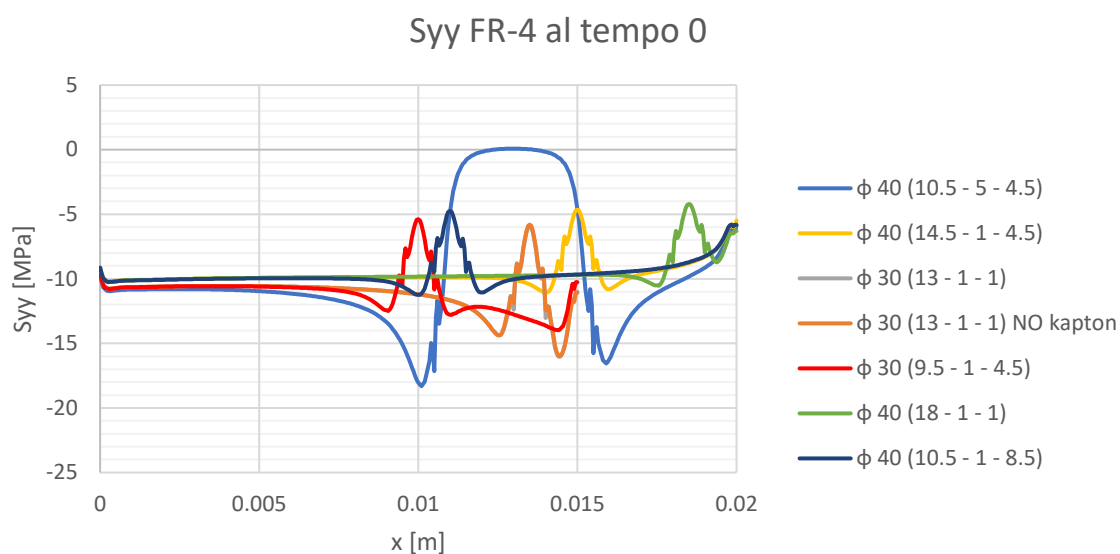


Figura 4.108 Syy nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

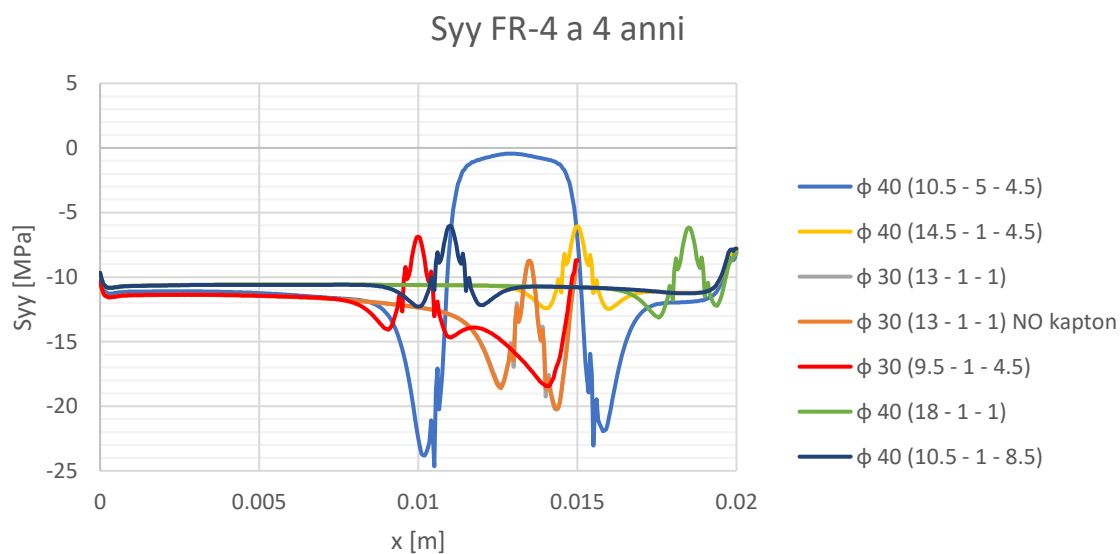


Figura 4.109 Syy FR4a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.49 Max e Min S_{yy} FR4

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	0.07	-18.31
	4 anni	-0.44	-24.66
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	-5.94	-16.04
	4 anni	-8.78	-20.27
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	-5.81	-15.99
	4 anni	-8.72	-20.20
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	-4.65	-11.07
	4 anni	-6.07	-12.46
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	-5.39	-13.99
	4 anni	-6.87	-18.45
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	-4.21	-10.54
	4 anni	-6.16	-13.14
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	-4.75	-11.24
	4 anni	-6.03	-12.28

Con la riduzione dell'ampiezza della discontinuità, dovuta alla mancanza del rame, i picchi di tensione in tale zona sono decisamente ridotti. Nel sensore ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5), le tensioni assiali nel FR4 variano tra 0 e -25 MPa mentre si nota dal grafico precedente che le tensioni nei modelli con sensore di diametro pari a 30 mm, variano tra -9 e -20 MPa circa.

Anche in questo caso, tuttavia, il comportamento migliore si riscontra nei sensori con diametro di 40 mm e discontinuità di 1 mm con delle tensioni assiali che variano tra -4 e -13 MPa circa a 4 anni, ma in generale con un comportamento più uniforme.

Le tensioni radiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.110 e Figura 4.111.

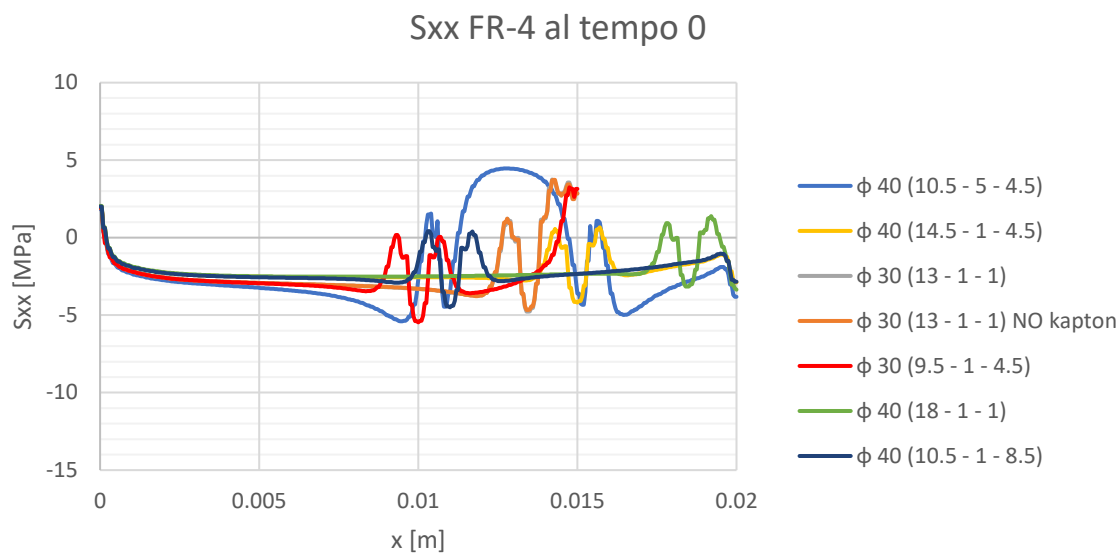


Figura 4.110 Sxx nel FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

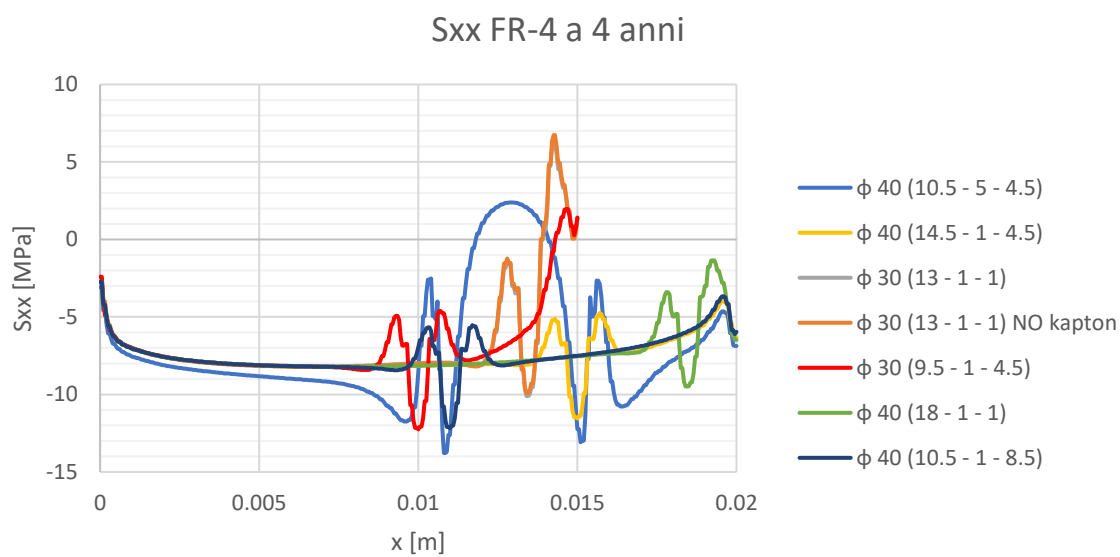


Figura 4.111 Sxx nel FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.50 Max e Min Sxx FR4

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	4.46	-5.40
	4 anni	2.39	-13.78
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	3.75	-4.77
	4 anni	6.21	-10.10
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	3.73	-4.66
	4 anni	6.74	-9.90
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	2.01	-4.19
	4 anni	-2.75	-11.55
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	3.24	-5.47
	4 anni	1.96	-12.25
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	2.05	-3.36
	4 anni	-1.35	-9.49
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	2.01	-4.50
	4 anni	-2.74	-12.18

Dai grafici si nota come le tensioni al tempo iniziale siano praticamente coincidenti. Tuttavia, il picco di trazione che si osserva nel materiale lo troviamo nella zona di discontinuità per il sensore ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5), all'esterno del sensore invece per quelli di 30 mm.

A 4 anni dall'applicazione del carico si osservano dei picchi in compressione fino a -14 MPa per il sensore ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5), fino a -10 MPa per il sensore ϕ 30 (13 – 1 – 1), e fino a -12 MPa circa per il sensore ϕ 30 (9.5 – 1 – 4.5). Per i picchi in trazione invece si ha una situazione inversa in cui si raggiungono quasi 7 MPa per i sensori con diametro pari a 30 mm mentre ci si ferma appena sotto i 3 MPa per i sensori ϕ 40 (10.5 – 1 – 4.5) e ϕ 30 (9.5 – 1 – 4.5),

Per i sensori con diametro di 40 mm e discontinuità di 1 si riscontra sempre un comportamento migliore con dei picchi che non portano mai il materiale in trazione ed una compressione che varia tra -1 e -12 MPa circa.

Anche in questo caso si nota come l'assenza del kapton nella zona di discontinuità non comporta alcuna variazione.

Le tensioni circonferenziali nell'FR4 sono mostrate in Figura 4.112 e Figura 4.113.

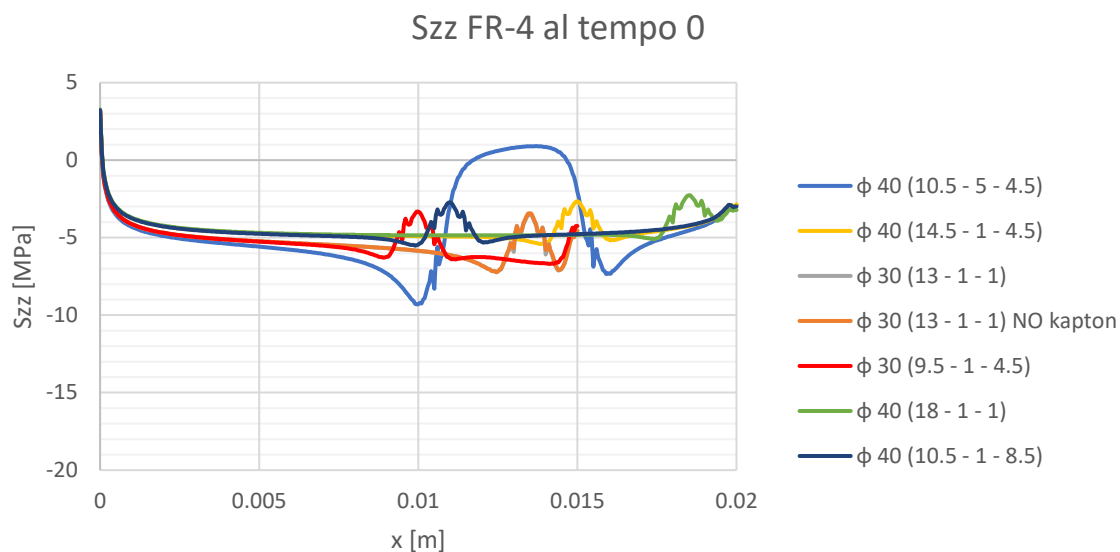


Figura 4.112 Szz FR4 al tempo: 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

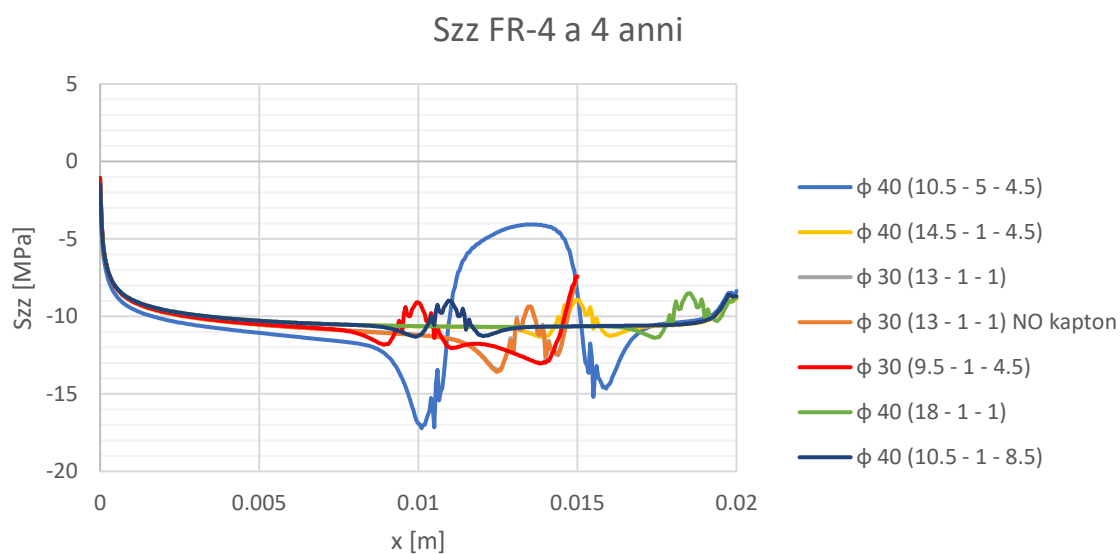


Figura 4.113 Szz FR4 a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.51 Max e Min Szz FR4

Sensore	Tempo	Szz [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	3.15	-9.31
	4 anni	-1.74	-17.22
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	3.21	-7.24
	4 anni	-1.08	-13.48
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	3.20	-7.23
	4 anni	-1.09	-13.59
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	3.23	-5.42
	4 anni	-1.48	-11.36
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	3.22	-6.70
	4 anni	-1.06	-13.04
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	3.26	-5.10
	4 anni	-1.47	-11.39
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	3.23	-5.52
	4 anni	-1.46	-11.32

Con la riduzione dell'ampiezza della discontinuità dovuta alla mancanza del rame si sono ridotti notevolmente i picchi di tensioni in tale zona. Nel sensore ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5), le tensioni circonferenziali nel FR4 variano tra -4 e -17 MPa mentre nei sensori con diametro di 30 mm variano tra -7 e -14 MPa circa.

Nei sensori con diametro di 40 mm e discontinuità di 1 le tensioni circonferenziali di compressione si attestano tra -7 e -11, registrando anche in questo caso una variazione inferiore rispetto agli altri.

4.6.4 Tensioni nella malta

Le tensioni assiali in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione posta nella malta a 0.5 cm dal sensore sono mostrate in Figura 4.114 e Figura 4.115:

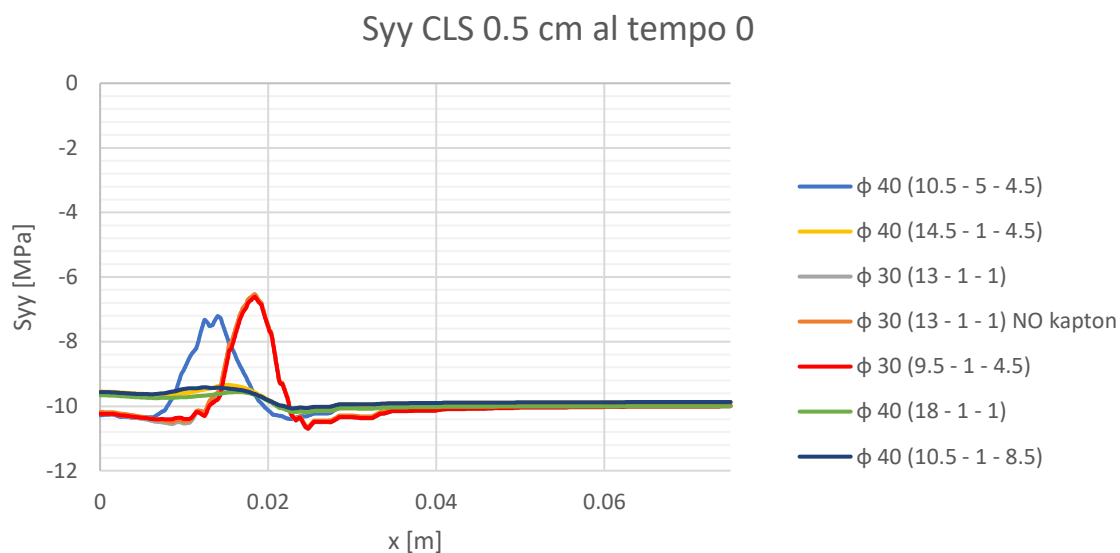


Figura 4.114 Syy CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

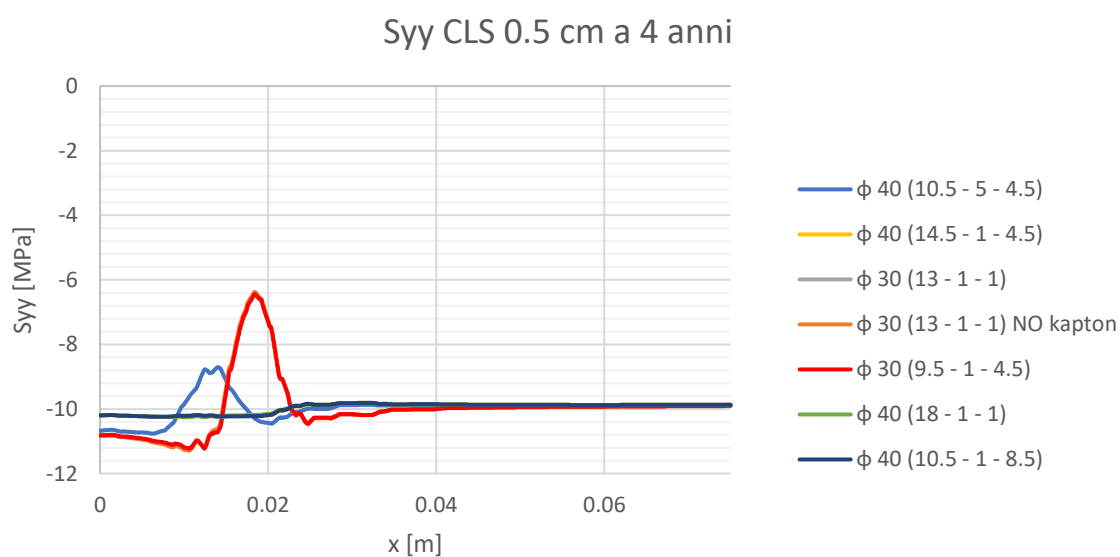


Figura 4.115 Syy CLS a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.52 Max e Min S_{yy} CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	S_{yy} [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	-7.20	-10.40
	4 anni	-8.70	-10.76
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	-6.54	-10.71
	4 anni	-6.38	-11.28
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	-6.53	-10.65
	4 anni	-6.37	-11.29
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	-9.34	-10.08
	4 anni	-9.81	-10.25
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	-6.60	-10.69
	4 anni	-6.44	-11.23
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	-9.56	-10.19
	4 anni	-9.81	-10.25
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	-9.41	-10.07
	4 anni	-9.81	-10.24

Sia al tempo 0 che a 4 anni dall'applicazione del carico si nota come ci sia una zona in cui si registra una riduzione delle tensioni di compressione che troviamo: nella zona della discontinuità nel ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5), all'esterno del sensore per quelli con diametro di 30 mm.

A 4 anni dall'applicazione del carico, inoltre si nota come la riduzione delle tensioni di compressione sia più marcata dei sensori con diametro pari a 30 mm.

Nei sensori con diametro di 40 mm e discontinuità di 1 mm il comportamento che si registra è praticamente privo di picchi di tensioni, con un andamento piuttosto uniforme, indipendentemente dalla posizione dell'intaglio.

Le tensioni radiali sono riportate in Figura 4.116 e Figura 4.117.

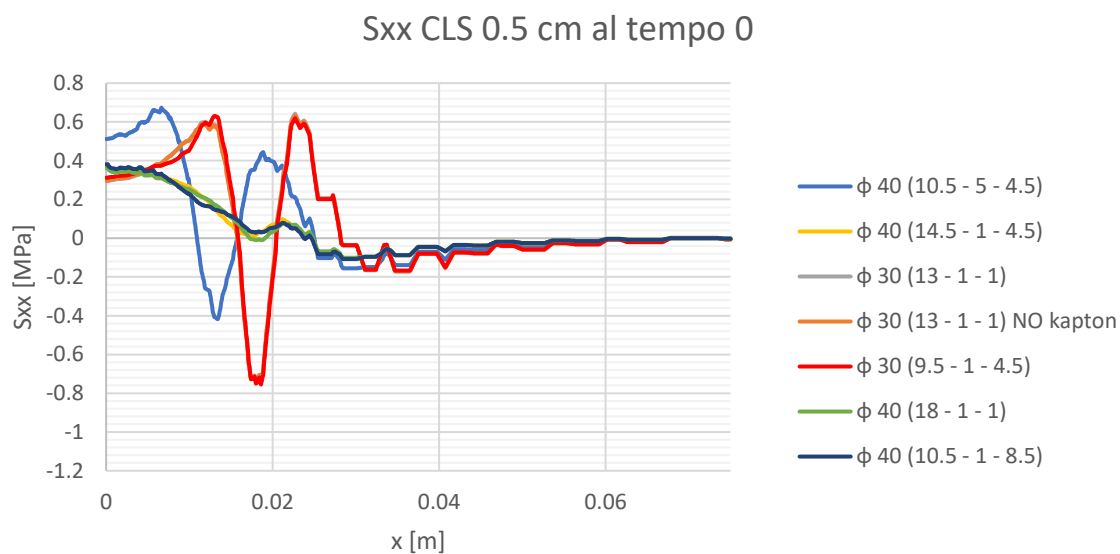


Figura 4.116 S_{xx} nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

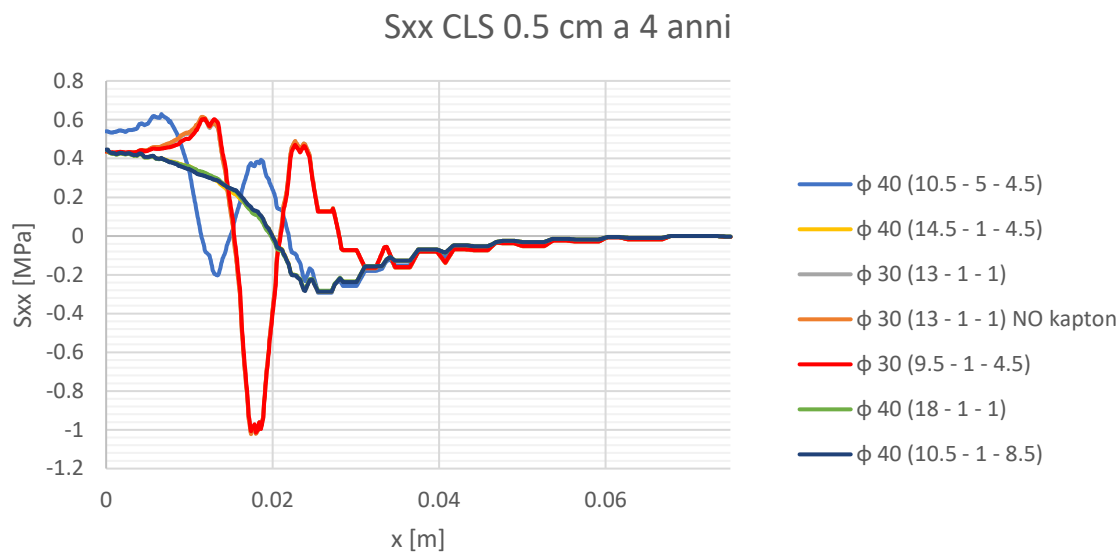


Figura 4.117 S_{xx} nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.53 Max e Min Sxx CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	Sxx [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	0.67	-0.42
	4 anni	0.63	-0.29
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	0.64	-0.74
	4 anni	0.61	-1.02
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	0.64	-0.74
	4 anni	0.62	-1.02
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	0.37	-0.11
	4 anni	0.44	-0.29
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	0.63	-0.75
	4 anni	0.60	-1.01
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	0.36	-0.10
	4 anni	0.44	-0.28
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	0.38	-0.11
	4 anni	0.45	-0.29

Si notano dei picchi in compressione che troviamo in zone differenti: nella zona di discontinuità nel sensore di 40 mm e discontinuità di 5, all'esterno dello stesso nei sensori di 30 mm. Il picco di compressione risulta più marcato, fino a -1 MPa a 4 anni, nei modelli con sensore di 30 mm.

Nei sensori con diametro di 40 mm e discontinuità di 1 non si presentano dei picchi di tensioni, con un andamento uniforme che varia da 0.44 MPa circa in corrispondenza dell'asse di rotazione, a -0.3 MPa circa all'estremità del sensore. Anche in questo caso quindi la posizione dell'intaglio non ha alcuna influenza sulla malta posta ad una distanza di 0.5 cm dal sensore.

Le tensioni circonferenziali sono riportate in Figura 4.118 e Figura 4.119.

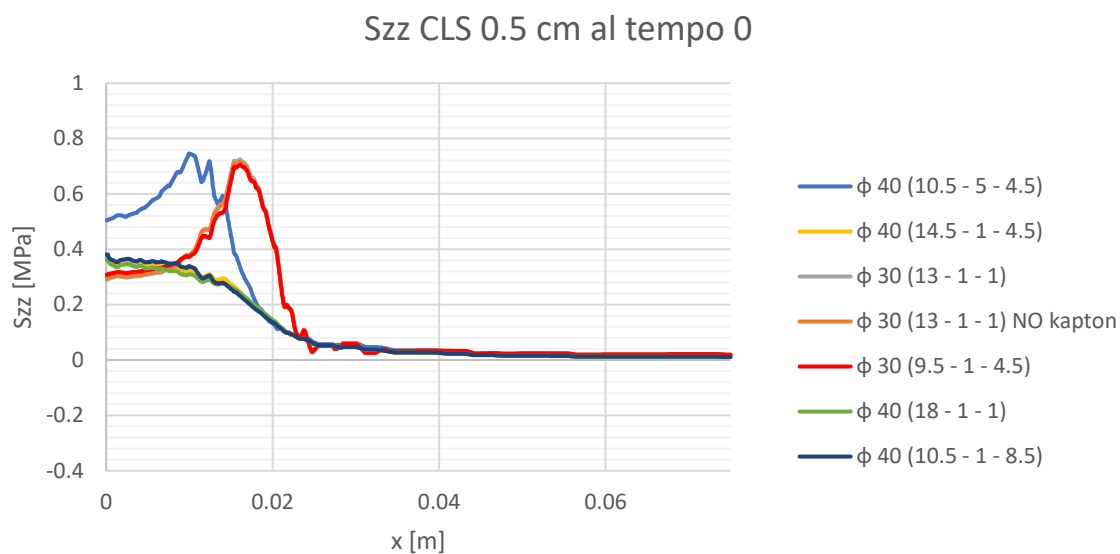


Figura 4.118 Szz nel CLS a 0.5 cm al tempo 0, immediatamente successivo all'applicazione del carico

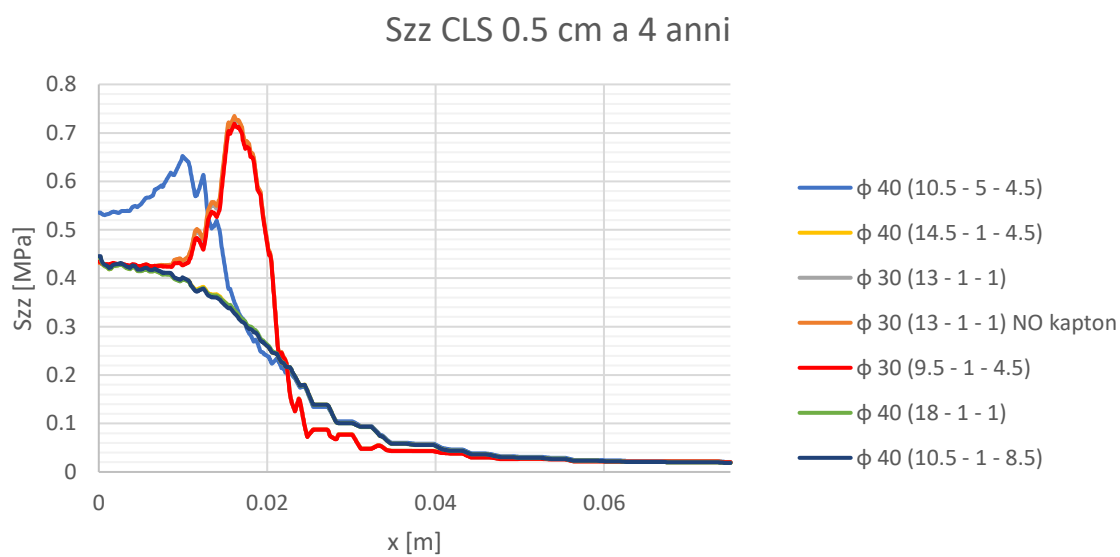


Figura 4.119 Szz nel CLS a 0.5 cm a 4 anni dall'applicazione del carico

Tabella 4.54 Max e Min S_{zz} CLS a 0.5 cm

Sensore	Tempo	S_{zz} [MPa]	
		Max	Min
ϕ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	0.75	0.02
	4 anni	0.65	0.02
ϕ 30 (13 - 1 - 1)	0	0.73	0.02
	4 anni	0.73	0.02
ϕ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	0.72	0.02
	4 anni	0.73	0.02
ϕ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	0.37	0.01
	4 anni	0.44	0.02
ϕ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	0.71	0.02
	4 anni	0.72	0.02
ϕ 40 (18 - 1 - 1)	0	0.36	0.01
	4 anni	0.44	0.02
ϕ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	0.38	0.01
	4 anni	0.45	0.02

Anche per le tensioni circonferenziali i picchi di trazione si ritrovano in zone diverse nei modelli con sensore di 40 e 30 mm, con un picco di trazione di 0.74 MPa nei modelli con sensore di 30 mm e di 0.66 MPa nel modello con sensore ϕ 40 (10.5 – 5 – 4.5).

I modelli con sensore di 40 mm e discontinuità di 1 presentano invece un comportamento uniforme con delle tensioni circonferenziali che partono da 0.44 MPa circa in corrispondenza dell'asse di rotazione fino ad annullarsi al di fuori del sensore.

Dall'analisi del comportamento della malta si nota che l'intaglio di 1 mm, sia che i sensori siano da 30 o da 40 mm di diametro, non ha alcuna influenza sul comportamento della malta cementizia.

4.6.5 Analisi area senziente

In Tabella 4.55 si riportano le variazioni di volume del kapton dovute alla deformazione assiale. Si riporta inoltre la media delle deformazioni assiali, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico.

Nell'analisi è stata presa in considerazione solo la zona senziente del sensore, cioè quella che si trova tra l'asse di rotazione e l'intaglio nel rame.

Tabella 4.55 Analisi area senziente

Sensore	Tempo	Var. Volume [mm ³]	Raggio [mm]	Area senziente [mm ²]	Var. spessore [%]	Media Eyy	Dev. St.	C.O.V.
φ 40 (10.5 - 5 - 4.5)	0	-3.05E-02	10.5	346	-0.35%	-3.22E-03	1.49E-03	-46%
	4 anni	-3.17E-02	10.5	346	-0.37%	-3.23E-03	2.55E-03	-79%
φ 30 (13 - 1 - 1)	0	-4.12E-02	13	531	-0.31%	-2.95E-03	7.94E-04	-27%
	4 anni	-4.50E-02	13	531	-0.34%	-3.13E-03	1.23E-03	-39%
φ 30 (13 - 1 - 1) NO kapton	0	-4.15E-02	13	531	-0.31%	-2.97E-03	9.65E-04	-32%
	4 anni	-4.56E-02	13	531	-0.34%	-3.16E-03	1.48E-03	-47%
φ 40 (14.5 - 1 - 4.5)	0	-4.44E-02	14.5	661	-0.27%	-2.65E-03	4.54E-04	-17%
	4 anni	-4.50E-02	14.5	661	-0.27%	-2.65E-03	5.34E-04	-20%
φ 30 (9.5 - 1 - 4.5)	0	-2.13E-02	9.5	284	-0.30%	-2.89E-03	6.60E-04	-23%
	4 anni	-2.21E-02	9.5	284	-0.31%	-2.97E-03	7.83E-04	-26%
φ 40 (18 - 1 - 1)	0	-6.67E-02	18	1018	-0.26%	-2.61E-03	3.66E-04	-14%
	4 anni	-6.98E-02	18	1018	-0.27%	-2.66E-03	5.52E-04	-21%
φ 40 (10.5 - 1 - 8.5)	0	-2.39E-02	10.5	346	-0.28%	-2.70E-03	5.44E-04	-20%
	4 anni	-2.41E-02	10.5	346	-0.28%	-2.68E-03	6.04E-04	-23%

Senza dubbio il comportamento migliore è assunto dai sensori con diametro di 40 mm ed intaglio di 1 mm che, indipendentemente dalla posizione dell'intaglio, presentano delle variazioni di spessore, tra 0 e 4 anni, inferiori rispetto agli altri.

La deviazione standard ci fornisce un'indicazione sulla variazione della deformazione assiale nello spazio, in questo caso tra l'asse di rotazione e l'estremità dell'area senziente, che varia per ogni sensore. Il sensore che presenta la dev. Standard più bassa è il sensore φ 40 (18 - 1 - 1). Ciò è dovuto al fatto che l'area senziente è più ampia, di conseguenza l'integrazione delle deformazioni si effettua su un'area più ampia e i picchi di deformazione in corrispondenza dell'intaglio hanno un'influenza minore.

Per quanto riguarda il C.O.V., anche se quello minore in assoluto (-14%) si riscontra nel sensore $\phi 40$ (18 – 1 – 1), la differenza minore (3%) dal momento dell'applicazione del carico a 4 anni si riscontra nei sensori $\phi 40$ (14.5 – 1 – 4.5) e $\phi 40$ (10.5 – 1 – 8.5).

5 Modello con muratura

5.1 Geometria e analisi

Mantenendo la geometria del sensore esistente in stato prototipale (Capitolo 3) è stato realizzato un modello in cui il sensore non è più inserito in un cilindro di malta omogeneo ma all'interno di una muratura la cui geometria per semplicità è stata mantenuta assialsimmetrica.

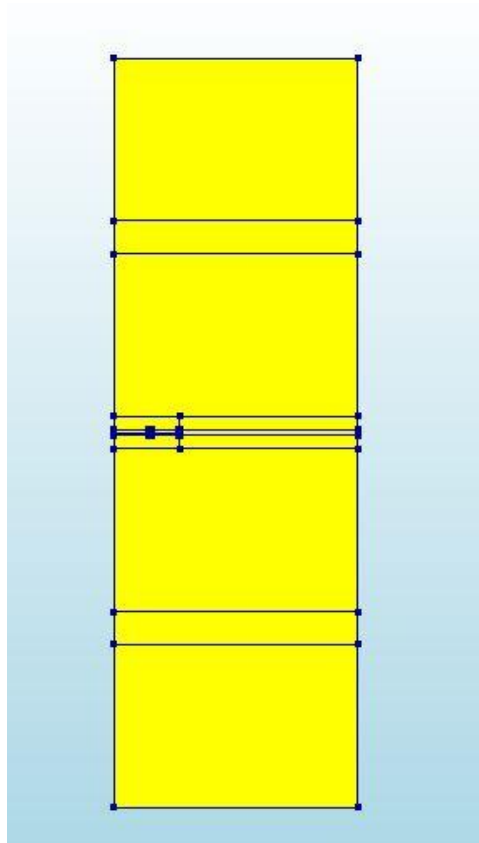


Figura 5.1 Geometria modello muratura

Sono stati modellati 4 mattoni di altezza pari a 5 cm, intervallati da 3 giunti di malta di 1 cm, per un'altezza totale del modello pari a 23 cm. La geometria utilizzata nel modello FEM è riportata in Figura 5.1.

Si è considerata la malta come un materiale elastico isotropo in grado di fessurare, se soggetto a trazione, con caratteristiche riportate in Tabella 5.1.

Tabella 5.1 Caratteristiche malta in grado di fessurare

Malta			
Modulo elastico	$E =$	791.48	MPa
Resistenza a compressione	$f_{ck} =$	7.57	MPa
Resistenza a trazione	$f_{ctk} =$	2.23	MPa
Deformazione di fessurazione	$\varepsilon_{cr} =$	$2.81 \cdot 10^{-3}$	
Deformazione ultima a trazione	$\varepsilon_{cr,u} =$	$5 \cdot 10^{-3}$	
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,2	
Densità	$\rho =$	2300	kg/m ³

È stato scelto un modello fessurativo diffuso che assume a trazione una legge elastica lineare fino al raggiungimento della deformazione di fessurazione e poi una legge lineare decrescente per il ramo di softening, dalla deformazione di fessurazione fino alla deformazione ultima ($\varepsilon_{cr,u} = 5 \cdot 10^{-3}$). La legge costitutiva è mostrata in Figura 5.2.

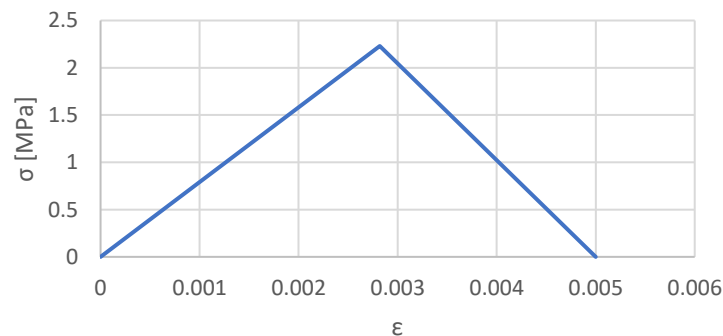


Figura 5.2 Legge costitutiva a trazione malta

I mattoni sono stati modellati con materiale elastico isotropo in grado di fessurare se soggetto a trazione con le seguenti caratteristiche:

Tabella 5.2 Caratteristiche Mattone

Mattone			
Modulo elastico	$E =$	2550	MPa
Resistenza a compressione	$f_{bm} =$	23.39	MPa
Resistenza a trazione	$f_{tbm} =$	2.339	MPa
Deformazione di fessurazione	$\varepsilon_{cr} =$	$9.17 \cdot 10^{-4}$	
Coefficiente di Poisson	$\nu =$	0,2	

È stato scelto un modello fessurativo diffuso che assume una legge elastica lineare fino al raggiungimento della deformazione di fessurazione, per poi assumere un comportamento di tipo fragile (Figura 5.3).

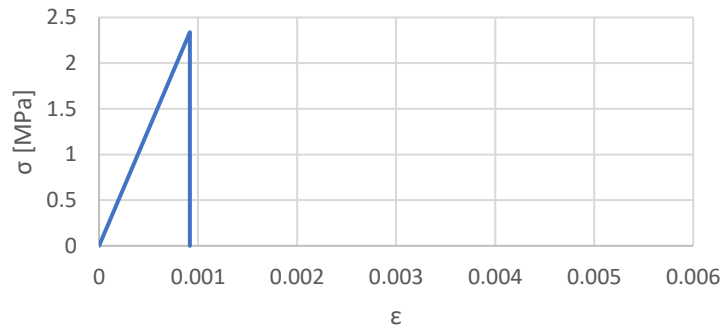


Figura 5.3 Legge costitutiva a trazione mattone

È stato quindi assunto un comportamento elasto-fragile a trazione del mattone accettando una resistenza a trazione del materiale pari al 10% della resistenza a compressione.

5.2 Analisi effettuate

È stata effettuata un'analisi elastica lineare applicando una tensione di compressione uniformemente distribuita pari a 10 MPa sulle facce circolari del provino in muratura.

5.3 Risultati

Il confronto tra le due analisi, cioè modello con malta e modello in muratura, in termini di tensioni e deformazioni, è riportato di seguito.

5.3.1 Deformazioni nel kapton

Le deformazioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 5.4.

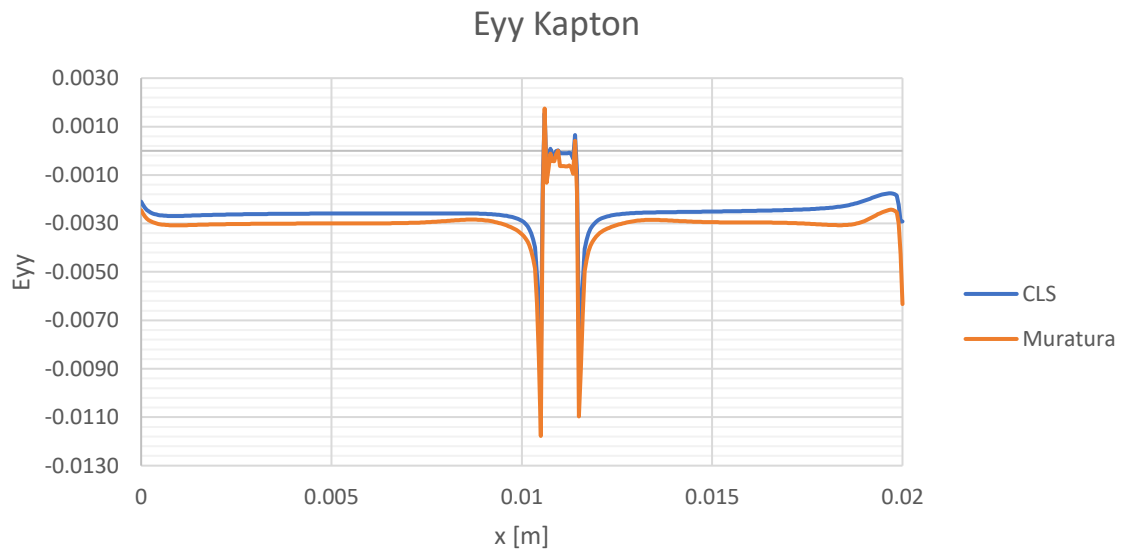


Figura 5.4 Eyy nel kapton

Tabella 5.3 Max e Min Eyy nel kapton

Sensore	Eyy	
	Max	Min
CLS	1.55E-03	-8.80E-03
Muratura	1.74E-03	-1.18E-02

Tra il modello in calcestruzzo ed il modello in muratura nelle deformazioni assiali nel kapton non registrano delle differenze significative ($\approx 6\%$)

Le deformazioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 5.5.

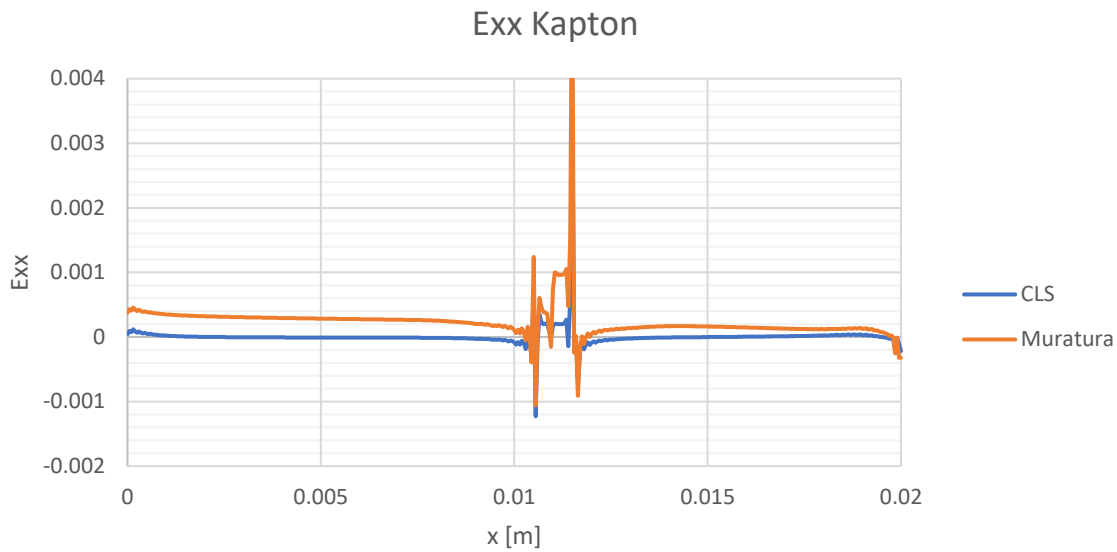


Figura 5.5 Exx nel kapton

Tabella 5.4 Max e Min Exx nel kapton

Sensore	Exx	
	Max	Min
CLS	3.95E-03	-1.23E-03
Muratura	6.22E-03	-1.06E-03

Nella zona senziante si registrano delle differenze nelle tensioni radiali all'interno dello strato di kapton, che risulta leggermente teso in direzione radiale nel modello in muratura. Ciò è dovuto al minor modulo elastico della malta rispetto al calcestruzzo, che tende a dilatarsi in direzione radiale.

Le deformazioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 5.6.

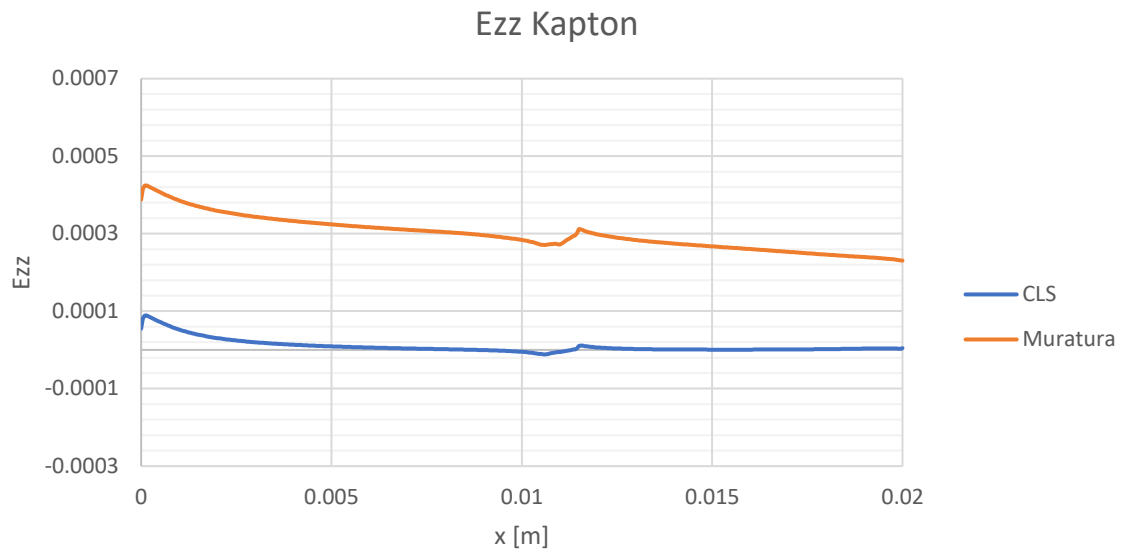


Figura 5.6 Ezz nel kapton

Tabella 5.5 Max e Min Ezz nel kapton

Sensore	Ezz	
	Max	Min
CLS	8.87E-05	-1.19E-05
Muratura	4.24E-04	2.30E-04

In direzione circonferenziale si riscontrano delle deformazioni non trascurabili nel modello in muratura rispetto al modello in calcestruzzo, maggiori di circa 4,8 volte nel punto di massimo.

5.3.2 Tensioni nel Kapton

Le tensioni assiali nel kapton sono mostrate in Figura 5.7.

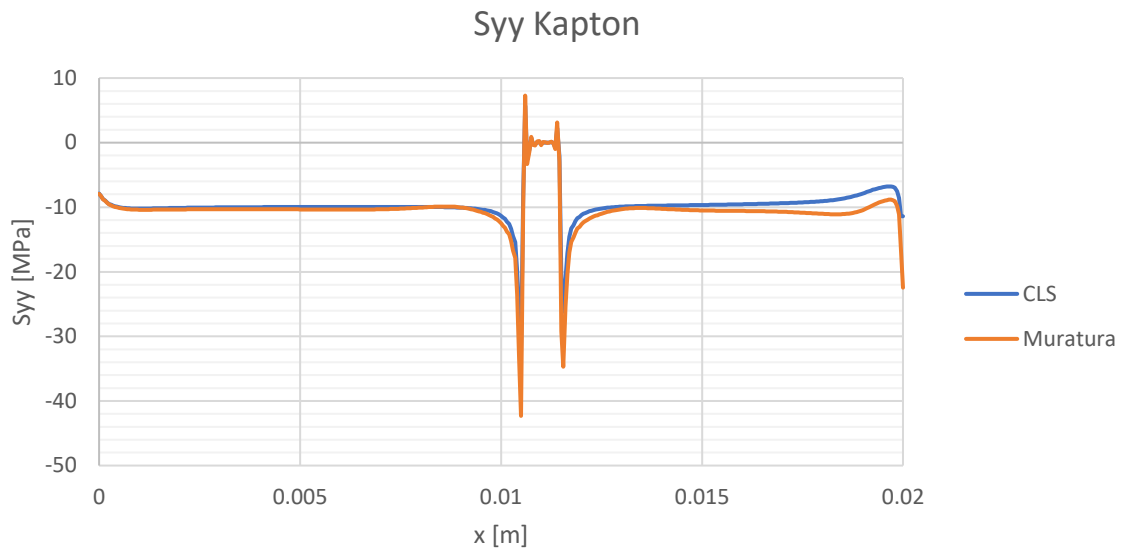


Figura 5.7 Syy nel kapton

Tabella 5.6 Max e Min Syy nel kapton

Sensore	Syy [MPa]	
	Max	Min
CLS	5.74	-32.37
Muratura	7.29	-42.31

Come nelle deformazioni, anche nelle tensioni assiali non ci sono differenze significative tra il modello in muratura e il modello in calcestruzzo.

Le tensioni radiali nel kapton sono mostrate in Figura 5.8.

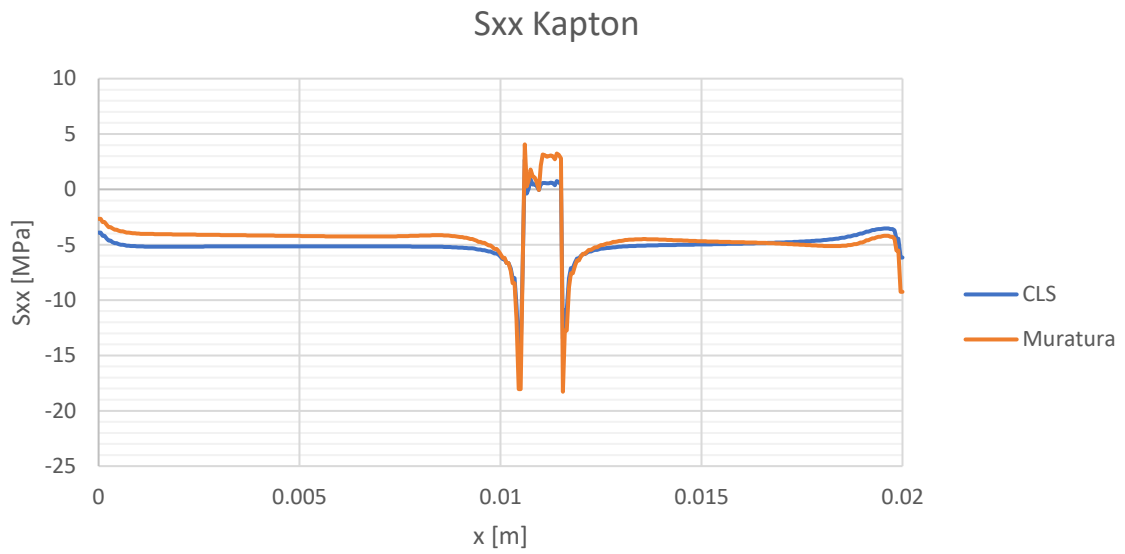


Figura 5.8 Sxx nel kapton

Tabella 5.7 Max e Min Sxx nel kapton

Sensore	Sxx [MPa]	
	Max	Min
CLS	2.68	-14.53
Muratura	4.06	-18.28

In direzione radiale si registrano delle differenze dell'ordine di 1 MPa, corrispondenti a circa il 20% delle tensioni radiali presenti nel materiale, con il kapton che risulta leggermente meno compresso nel modello in muratura.

Le tensioni circonferenziali nel kapton sono mostrate in Figura 5.9.

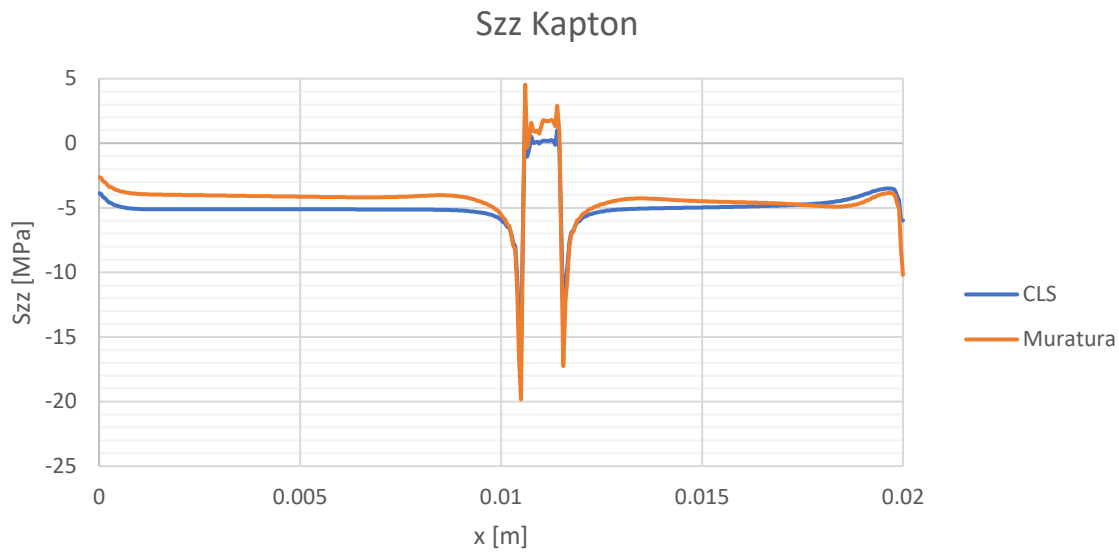


Figura 5.9 Szz nel kapton

Tabella 5.8 Max e Min Szz nel kapton

Sensore	Szz [MPa]	
	Max	Min
CLS	2.83	-15.97
Muratura	4.54	-19.84

Anche in direzione circonferenziale si registrano delle differenze dell'ordine di 1 MPa, corrispondenti a circa il 20% delle tensioni circonferenziali presenti nel materiale, con il kapton che risulta leggermente meno compresso nel modello in muratura.

5.3.3 Tensioni nell'FR4

Le tensioni assiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 5.10.

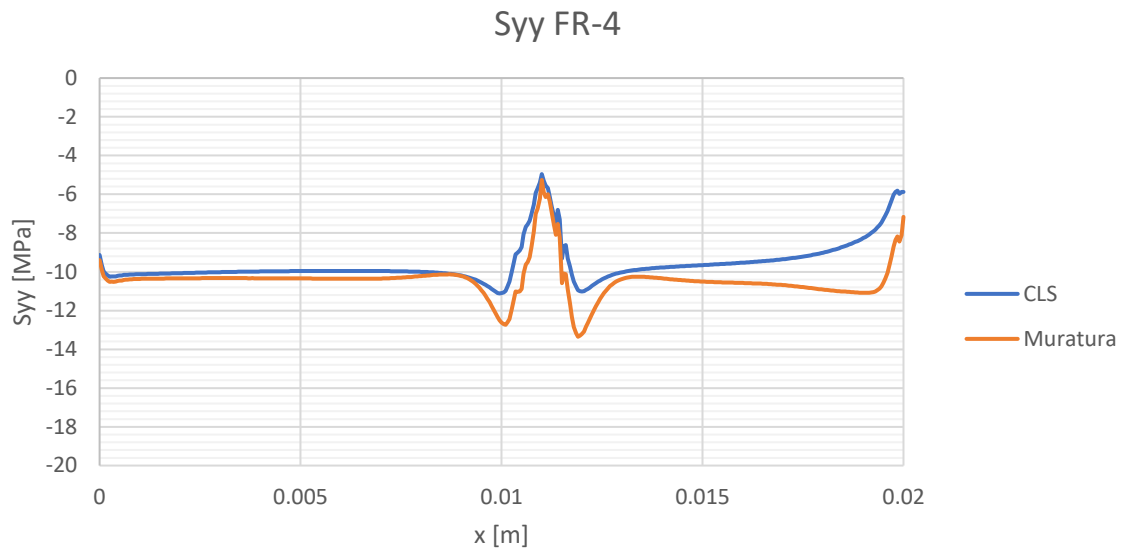


Figura 5.10 Syy nel FR4

Tabella 5.9 Max e Min Syy FR4

Sensore	Syy [MPa]	
	Max	Min
CLS	-4.96	-11.12
Muratura	-5.26	-13.35

In direzione assiale, all'interno dell'area senziante, non si registrano delle differenze significative di tensione nello strato di FR4 tra il modello in calcestruzzo ed il modello in muratura.

Le tensioni radiali nell'FR4 sono mostrate in Figura 5.11.

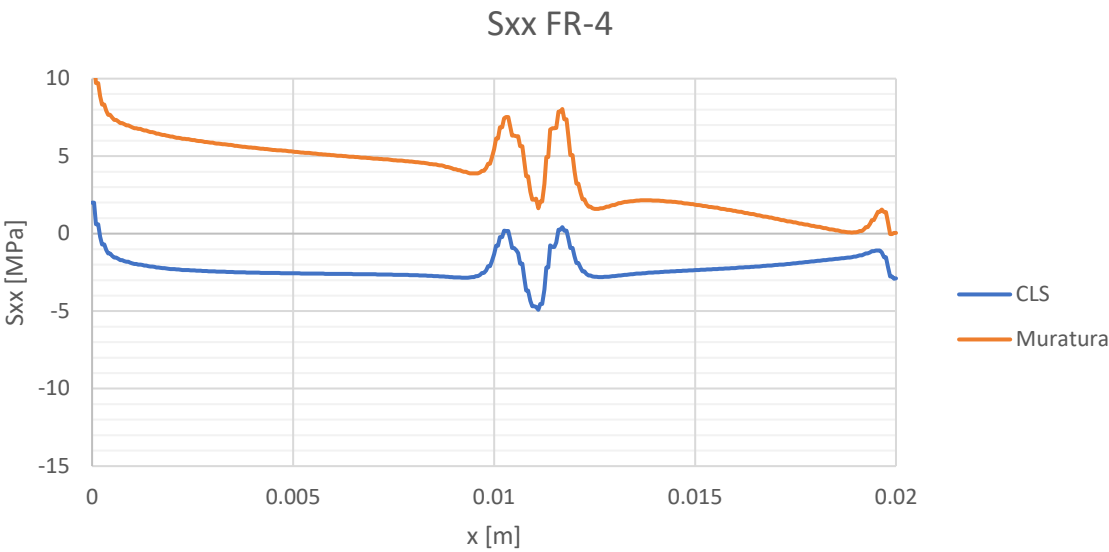


Figura 5.11 Sxx nel FR4

Tabella 5.10 Max e Min Sxx FR4

Sensore	Sxx [MPa]	
	Max	Min
CLS	2.00	-4.91
Muratura	11.12	-0.03

In direzione radiale il comportamento è decisamente differente tra i due modelli. Nel modello con il calcestruzzo lo strato di FR4 risulta quasi interamente compresso mentre nel modello in muratura lo strato di FR4 risulta interamente teso, con picchi che raggiungono 10 MPa circa in corrispondenza dell'asse di rotazione.

Le tensioni circonferenziali nell'FR4 sono mostrate in Figura 5.12.

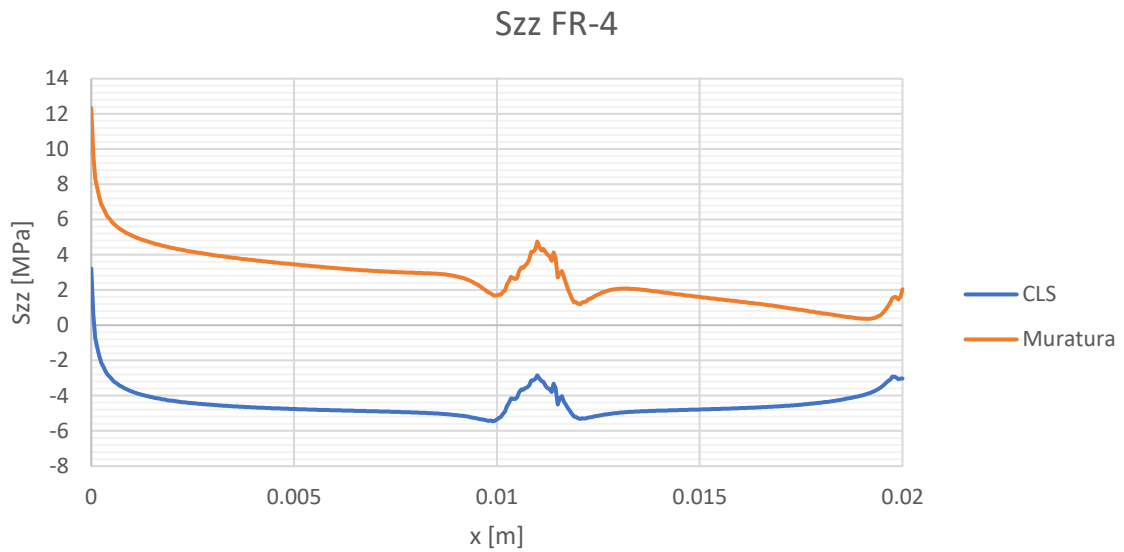


Figura 5.12 Szz FR4

Tabella 5.11 Max e Min Szz FR4

Sensore	Szz [MPa]	
	Max	Min
CLS	3.22	-5.45
Muratura	12.34	0.36

Anche per le tensioni circonferenziali, nell'FR4 il comportamento è diverso nei due modelli, con lo strato compresso nel modello in calcestruzzo e teso nel modello in muratura.

5.3.4 Tensioni nella malta e mattoni

Le tensioni assiali in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione posta nella malta a 0.5 cm dal sensore sono messe in confronto in Figura 5.13 con le tensioni registrate in mezzzeria dello strato di malta, in mezzzeria del mattone e quelle registrate in una sezione perpendicolare all'asse di rotazione, posta nel mattone, ad 1 cm di distanza dallo strato di malta a contatto con il sensore.

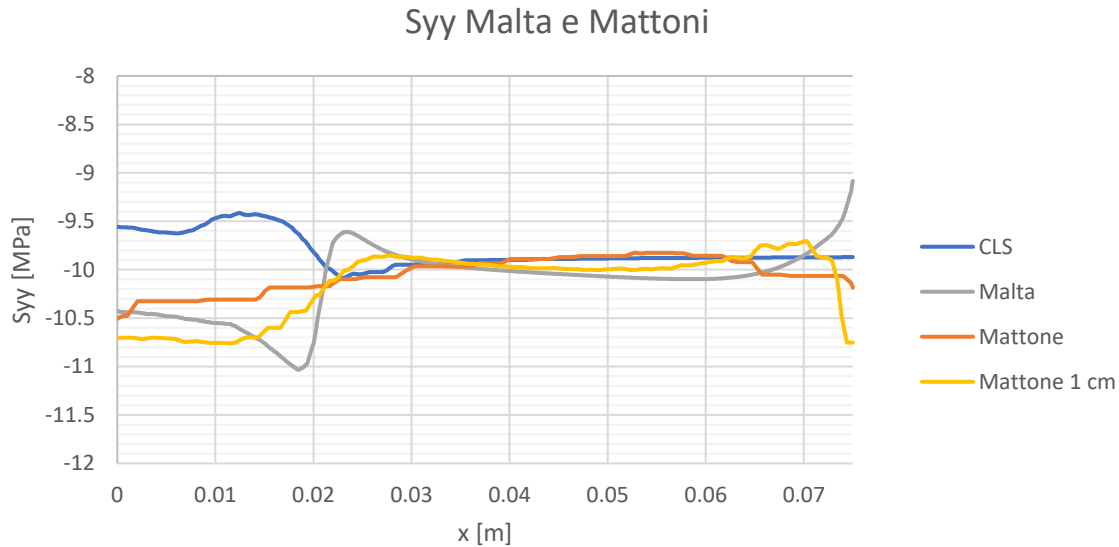


Figura 5.13 Syy Malta, Mattone e CLS

Tabella 5.12 Max e Min Syy Malta, Mattone e CLS

Sensore	Syy [MPa]	
	Max	Min
CLS	-9.41	-10.09
Malta	-9.08	-11.03
Mattone	-9.83	-10.50
Mattone 1 cm	-9.70	-10.76

In direzione assiale si nota subito come ci sia una differenza tra i due modelli nella zona in cui si risente del disturbo indotto dalla presenza del sensore, per poi convergere al carico applicato di -10 MPa all'esterno del sensore.

Le tensioni radiali sono riportate in Figura 5.14.

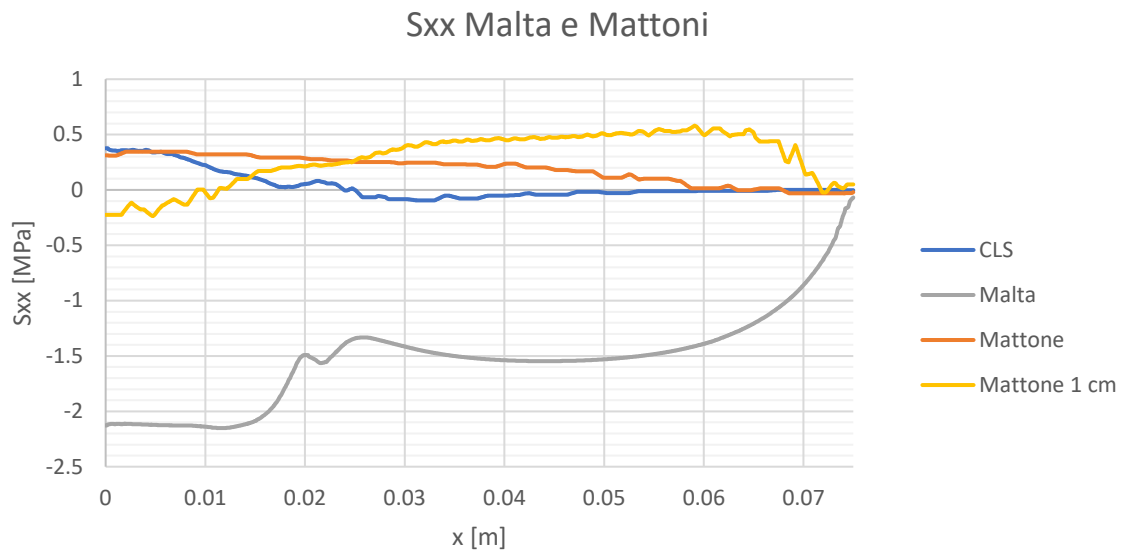


Figura 5.14 Sxx Malta, Mattone e CLS

Tabella 5.13 Max e Min Sxx Malta, Mattone e CLS

Sensore	Sxx [MPa]	
	Max	Min
CLS	0.38	-0.09
Malta	-0.07	-2.15
Mattone	0.34	-0.03
Mattone 1 cm	0.58	-0.24

Anche se le variazioni sono piuttosto contenute si possono riscontrare comportamenti diversi in direzione radiale. Si nota come nella mezzeria del mattone il comportamento sia molto simile al comportamento del modello in calcestruzzo, con delle tensioni che decrescono procedendo dall'asse di rotazione verso il raggio esterno del provino in muratura.

Nella sezione posta nel mattone, ad 1 cm di distanza dalla malta, si osserva come il comportamento sia opposto rispetto alla sezione di mezzeria, con le tensioni che crescono procedendo dall'asse di rotazione verso l'esterno del modello

Questo comportamento è dovuto al fatto che la malta, avendo un modulo elastico minore rispetto a quello dei mattoni, tende a dilatarsi in direzione radiale, trovando un vincolo nei mattoni.

Le tensioni circonferenziali sono riportate in Figura 5.15.

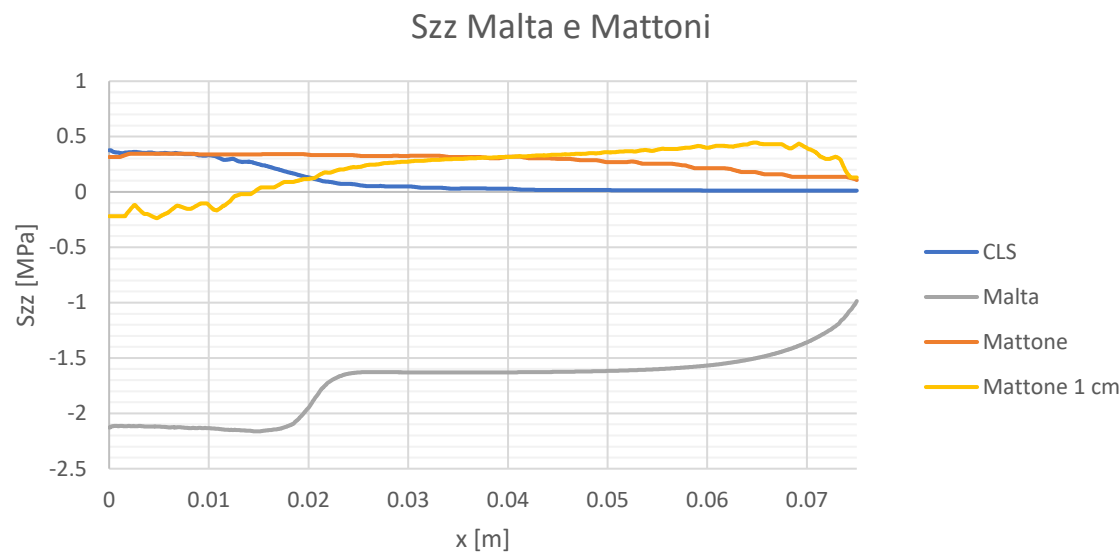


Figura 5.15 Szz Malta, Mattone e CLS

Tabella 5.14 Max e Min Szz Malta, Mattone e CLS

Sensore	Szz [MPa]	
	Max	Min
CLS	0.38	0.01
Malta	-0.99	-2.16
Mattone	0.34	0.11
Mattone 1 cm	0.45	-0.24

Per le tensioni circonferenziali il comportamento è simile alle tensioni radiali, e valgono le stesse considerazioni.

5.3.5 Analisi area senziente

In Tabella 5.15 si riportano le variazioni di volume del kapton dovute alla deformazione assiale. Si riporta inoltre la media delle deformazioni assiali, la deviazione standard ed il coefficiente di variazione, al tempo 0 e a 4 anni dall'applicazione del carico.

Nell'analisi è stata presa in considerazione solo la zona senziente del sensore, cioè quella che si trova tra l'asse di rotazione e l'intaglio nel rame.

Tabella 5.15 Analisi area senziente

Sensore	Tempo	Var. Volume [mm ³]	Raggio [mm]	Area senziente [mm ²]	Var. spessore [%]	Media Eyy	Dev. St.	C.O.V.
CLS	0	-2.42E-02	10.5	346	-0.28%	-2.70E-03	5.60E-04	-21%
Muratura	0	-2.80E-02	10.5	346	-0.32%	-3.11E-03	7.79E-04	-25%

Analizzando la variazione di spessore in percentuale si nota che il sensore ha un comportamento molto simile sia nel calcestruzzo che nella muratura, con una variazione di spessore paragonabile ed una differenza nella deformazione assiale media nel kapton di circa il 13% sotto il carico applicato di 10 MPa.

5.3.6 Considerazioni sul modello in muratura

Nonostante le caratteristiche diverse tra il calcestruzzo ed i materiali che compongono la muratura, le tensioni e le deformazioni registrate nei materiali che costituiscono il sensore sono del tutto paragonabili, con delle differenze trascurabili.

Considerando l'area senziente del sensore i risultati sono analoghi, con delle deformazioni assiali medie nello strato dielettrico che differiscono del 10% circa sotto il carico applicato di 10 MPa.

I risultati confermano l'idoneità teorica del sensore anche ad un utilizzo su strutture in muratura, con prestazioni simili all'utilizzo su strutture in calcestruzzo.

6 Conclusioni

Uno dei problemi più rilevanti nell'ambito del monitoraggio strutturale è rappresentato dalla misura delle tensioni all'interno dei solidi. Le tecniche più datate sono rimpiazzate oggi da tecnologie all'avanguardia che permettono una misura più accurata e a costi ridotti, ma soprattutto che consentono di effettuare un monitoraggio continuo e prolungato nel tempo, praticamente impossibile con i metodi utilizzati nel passato.

Dei nuovi sensori, basati su tecnologie piezoresistive e capacitive, sono oggetto di brevetti recenti che vedono coinvolto il Politecnico di Torino. I sensori piezoresistivi, o ceramici, sono già stati sviluppati e testati in diverse condizioni. I sensori capacitivi sono presenti ad oggi solo come prototipi e sono oggetto di una campagna di test.

Il presente lavoro di tesi ha il fine di individuare il comportamento meccanico del sensore capacitivo e la geometria ottimale degli strati che costituiscono il sensore, per valutare l'affidabilità delle misure sotto carichi prolungati nel tempo, in presenza di fenomeni viscosi.

In tutte le analisi effettuate, è bene premettere che tutti i materiali che costituiscono il sensore restano in campo elastico con i livelli di carico considerati. Esaminando, in particolare, lo strato di kapton all'interno dell'area sensiente, si registrano delle deformazioni assiali di circa 0.3%, ampiamente al di sotto del 3%, che rappresenta la deformazione plastica del materiale.

Nello studio preliminare (Capitolo 2) è stato constatato come gli effetti reologici della malta del provino in cui il sensore è inserito, comportino delle variazioni non trascurabili nel tempo delle tensioni e delle deformazioni nei materiali che costituiscono il sensore. Nonostante ciò, nello strato di kapton, in direzione assiale, non si riscontrano effetti significativi che possano alterare la misura.

Analizzando la geometria del sensore capacitivo, attualmente esistente come prototipo, (Capitolo 3), lo spessore dello strato di kapton e dello strato di FR4 non influenzano significativamente il comportamento meccanico del sensore. La variazione di questi spessori influisce in modo trascurabile sulla misura. La scelta degli spessori attualmente in uso sembra già essere ottimizzata. Le staffe, previste per il poter usare il sensore anche per misurare tensioni di trazione, sembrano invece avere un effetto negativo nella misura delle tensioni di compressione, generando delle concentrazioni di sforzo, che possono risultare controproducenti.

L'analisi parametrica della geometria del sensore (Paragrafo 4.6) ha dimostrato che la geometria attualmente utilizzata è adeguata. Tutti i sensori con diametro pari a 40 mm e con un intaglio pari ad 1 mm, indipendentemente dalla posizione dell'intaglio all'interno del sensore, hanno dato buoni risultati.

Dall'analisi del modello in cui il sensore è collocato all'interno di una muratura (Capitolo 5) si evince come il sensore abbia un comportamento molto simile a quello riscontrato nelle simulazioni con provini interamente in calcestruzzo. Questo risultato conferma l'adeguatezza del sensore ad un utilizzo sia in strutture in calcestruzzo che in elementi in muratura.

Ulteriori valutazioni potrebbero essere effettuate affiancando alle simulazioni numeriche delle prove di laboratorio mirate a validare i parametri meccanici usati nelle simulazioni. Un primo set di prove di laboratorio su elementi semplici in muratura è già stato eseguito presso l'Università di Palermo fornendo risultati incoraggianti, ma evidenziando alcune criticità nel comportamento del sensore sul campo. Un nuovo set di prove è in svolgimento presso lo stesso laboratorio.

Inoltre, si ritiene particolarmente utile al fine di ottenere una completa caratterizzazione del sensore, la realizzazione di prove di laboratorio sui singoli fogli di kapton e di FR4 per valutarne il comportamento viscoso con carichi di lunga durata. La viscosità del kapton è infatti stata misurata in campo aerospaziale per applicazioni su vele solari, ma i test finora condotti riguardano lassi di tempo molto più corti di quelli tipici dell'edilizia.

7 Bibliografia e sitografia

- [1]. A. Kumar Ayyaswamy, *Characterization of electronic board material properties under impact loading*, 2007
- [2]. C. Anerdi, D. Gino, M. Malavisi, G. Bertagnoli, *A sensor for embedded stress measure of concrete: testing and material heterogeneity issues*, 2018
- [3]. CEB-FIP MODEL CODE 1990
- [4]. Diana FEA User's Manual, <https://dianafea.com/manuals/d103/Diana.html>
- [5]. G. Ionascu, C. I. Rizescu, L. Bogatu, L. A. Carta, E. Manea, *Study of Influence of Surface Microtexture and Roughness on Friction Coefficient*, 2017
- [6]. L. Cavaleri, A. Failla, L. La Mendola, M. Papia, *Experimental and analytical response of masonry elements under eccentric vertical loads*, 2005
- [7]. L. La Mendola, M. C. Oddo, M. Papia, F. Pappalardo, A. Pennisi, G. Bertagnoli, F. Di Trapani, A. Monaco, F. Parisi, S. Barile, *Performance of a new stress sensor imbedded in mortar joints of masonry elements*, 2021
- [8]. M. Abbasi, C. Anerdi, G. Bertagnoli, *Measuring pressure forces inside concrete: a new sensor able to overcome rheology issues*, 2020
- [9]. MADA: MASONRY Database, Selezione online di dati sperimentali sui parametri meccanici delle murature.
http://www.reluis.it/index.php?option=com_mada&Itemid=160
- [10]. N. R. Bhavsar, H. P. Shinde, M. Bhat, *Determination of Mechanical Properties of PCB*, 2014
- [11]. P. Samyn, J. Quintelier, G. Schoukens, P. De Baets, *Sliding properties of polyimide against various steel and dlc-coated counterfaces*, pp. 506-515
- [12]. Y. Dharmadasa, M. McCallum, F. Lopez Jimenez, *Characterizing and modeling the viscoplastic behavior of creases in Kapton polyimide films*, 2020