

Università IUAV di Venezia

Scuola di Dottorato

Innovazione per il costruire e per il patrimonio culturale

Tesi di Dottorato
XXXV ciclo

Performance meccaniche, potenzialità e criticità strutturali del calcestruzzo stampato 3D.

I relatori:
Prof. Arch. Ing. Salvatore Russo
Prof.ssa Antonella Cecchi

Il dottorando:
Arch. Alberto Bretini

I controrelatori:
Prof. Rosario Ceravolo, Politecnico di Torino
Prof. Domenico Liberatore, Università “Sapienza” di Roma

Il Coordinatore del comitato scientifico:
Prof. Arch. Ing. Salvatore Russo

a.a. 2023/2024

Ai miei genitori, alle mie nonne e miei nonni

Indice

1. Stato dell'arte 7
1.1 Nascita e storia dell'evoluzione in campo ingegneristico 7
1.2 Evoluzione del calcestruzzo 10
1.3 Mix design del calcestruzzo 13
Bibliografia 18
2 Il Materiale 20
2.1 Proprietà fisico-meccaniche 25
2.2 La Carbonatazione 26
2.3 Ritiro Plastico, igrometrico e Creep (o scorrimento viscoso) 27
2.4 Fatica e Microcracking 28
Bibliografia 30
3. La Normativa 32
3.1 Normativa di riferimento sulla base degli obiettivi prefissati 32
3.2 Normativa relativa al calcestruzzo 35
Compressione 35
Flessione su tre punti 37
Triplette su Muratura 39
Bibliografia 42
4. Sperimentazione 44
4.1 Setup delle prove e design 44
4.1.1. Test a Compressione 54
4.1.2. Test a Flessione su tre punti 65
4.1.3. Test a Flessione su quattro punti 65
4.1.4. Test delle Triplette 105
Bibliografia 139
5. Modellazione Numerica FEM 141
5.1 Descrizione modello 141
Modello FEM a Compressione 142
Modello FEM a Flessione su tre punti 146
Modello FEM a Flessione su quattro punti 150
Modello FEM a Triplette 154
Bibliografia 159
6. Conclusioni 161
6.1 Confronto tra test sperimentali e modelli FEM 161
6.2 Tipi di collasso nel calcestruzzo stampato 3D 168

6.3 coefficiente di attrito: muratura vs calcestruzzo. 172
Bibliografia 175
7. Applicazioni Future 176
Bibliografia: 180
8. Ringraziamenti 182

1. Stato dell'arte

La ricerca nata dalla convenzione per attività di ricerca tra l'Università Iuav di Venezia e la Società Master Builder Solutions Italia S.p.A. di Treviso, di seguito denominata MBS Italia S.p.A., ha come obiettivo lo studio del comportamento meccanico di conglomerati cementizi di ultima generazione realizzati mediante lo stampaggio tridimensionale. Il conglomerato preso in esame è privo di rinforzi d'acciaio e privo di fibre. La ricerca pone lo sguardo anche sulle potenzialità e criticità strutturali del calcestruzzo stampato 3D. Tali approfondimenti sono stati possibili tramite l'esecuzione di accurate prove sperimentali eseguite in laboratorio a cui si aggiungono anche analisi numeriche che approfondiscono le tematiche ed i protocolli non ancora normati. La ricerca si conclude con una comparazione tra le prove sperimentali e i modelli ad elementi finiti nonché con una dettagliata caratterizzazione delle criticità intrinseche del materiale sia in fase di stampa sia in fase di test.

1.1 Nascita e storia dell'evoluzione in campo ingegneristico

A partire dagli anni '80 del novecento vengono avviate le prime sperimentazioni in campo ingegneristico in cui la stampa tridimensionale venne applicata ai materiali come i polimeri, il metallo o l'argilla. La tecnologia alla base di questa innovazione consiste nel depositare strati successivi di materiale mediante il controllo computerizzato al fine di realizzare la sagoma disegnata mediante specifici software. Dagli anni '10 del duemila, la tecnologia è stata messa a disposizione e implementata per la stampa di prodotti cementizi. (Horvat, 2014)

Le prime ricerche sul tema della stampa tridimensionale le dobbiamo al dr. Hideo Kodama che nel 1980 documentò la prima sperimentazione a carattere ingegneristico sul tema. Il suo obiettivo era lo sviluppo di una prototipazione rapida ed il metodo da lui creato prevedeva una stampa in cui la resina esposta alla luce ultravioletta si consolidava generando un solido tridimensionale. Purtroppo, il suo metodo di stampa non fu mai commercializzato in quanto non completò tutti i requisiti per ottenere il brevetto. (Khan et al. 2020)
Chi invece, è spesso accreditato come il padre fondatore della stampa tridimensionale è Chuck Hall. Nel 1984 deposita un brevetto per la stampa 3D: SLA, acronimo di stereolitografia, dove gli oggetti si solidificano stampando strati di materiale che si indurisce alla luce ultravioletta. Questo metodo, del tutto simile a quello di Kodama, necessita di: una resina, una sorgente di luce e file di stampa 3D digitale noti come file STL.



Fig. 1.1.1 Chuck Hall a sinistra ed un prototipo di cerchione per auto. A destra il primo computer e la prima stampante tridimensionale da lui progettate

Nel 1987 nacque un nuovo metodo di stampa: la stampa 3D SLS. L'acronimo deriva dalle parole Selective Laser Sintering ed il processo di stampa preclude l'utilizzo di un laser che trasforma la polvere che, una volta sciolta, si solidifica generando un materiale solido. L'innovazione sta nel materiale: con la stampa SLA si utilizzava la resina mentre con la stampa SLS polvere. L'inventore di questo più sofisticato stampaggio è Carl Deckard che iniziò a

sviluppare la stampa 3D SLS quando era ancora studente presso l'Università del Texas ad Austin. La tecnologia venne così migliorata durante gli anni del suo dottorato con il supporto del professor Joe Beaman. Sempre nel 1987, Deckard e Beaman fondarono la Desk Top Manufacturing Corp. (DTM Corp) ma ci vollero circa altri 20 anni (nel 2006) prima che la stampa 3D SLS diventasse disponibile in commercio. (Khan et al. 2020)

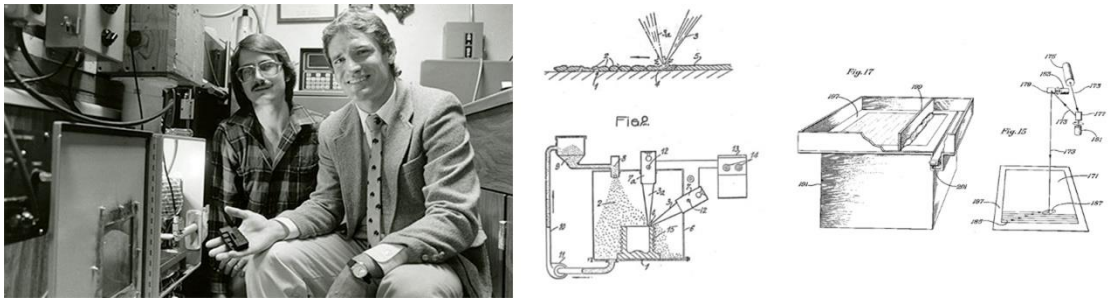


Fig. 1.1.2: Deckard e Beaman a sinistra; il brevetto a destra

Nel 1988 avvenne la svolta: S.Scott Crump inventò la stampa 3D Fused Modeling Deposition (FDM). L'idea nacque mentre Crump stava realizzando una rana giocattolo per sua figlia utilizzando una pistola per colla a caldo e una miscela di polietilene e cera di candela. Crump capì che poteva usare lo stesso concetto per costruire oggetti tridimensionali. Il primo prototipo FDM è stato creato nel 1988 ed è stato chiamato macchina "Fused Deposition Modeling". La macchina è stata progettata per stampare parti termoplastiche fondendo il materiale plastico e depositandolo strato dopo strato. Il passo successivo fu brevettare la nuova tecnica e fondare la società Stratasys insieme a sua moglie, nel 1989. (Khan et al. 2020) Nel 1990 fu venduta la prima macchina FDM e all'inizio degli anni 2000 la FDM fu ampiamente adottata da molti settori. Oggi, la stampa 3D prevede la creazione di un oggetto tridimensionale da un modello digitale aggiungendo strati di materiale. FDM è un tipo specifico di tecnologia di stampa 3D che utilizza un filamento termoplastico come materiale di costruzione. Il filamento viene fuso e poi estruso attraverso un ugello, strato dopo strato, per creare il prodotto finale. (Comb, 1994)

La tecnologia FDM è nota per la sua versatilità, poiché può stampare un'ampia gamma di materiali, tra cui ABS, PLA, nylon e policarbonato. Una stampante FDM è costituita da vari componenti come un piano di stampa, un estrusore, un ugello e un filamento. Il piano di stampa è il luogo in cui viene stampato l'oggetto. Può essere riscaldato o non riscaldato, a seconda del materiale utilizzato. L'estrusore ha il compito di spingere il filamento attraverso l'hot end e fuori dall'ugello. Il filamento viene fuso nell'hot end e depositato sul piano di stampa per creare l'oggetto. La dimensione dell'ugello può variare a seconda della risoluzione richiesta per la stampa. Tuttavia, la FDM ha i suoi limiti, difatti può essere difficile ottenere livelli elevati di dettaglio e precisione con FDM e le linee dei livelli possono essere visibili sul prodotto finale. Nonostante queste limitazioni, la tecnologia FDM rimane una scelta popolare sia per gli appassionati che per i professionisti della stampa 3D. Questa tecnologia è ampiamente utilizzata in vari settori, tra cui quello aerospaziale, automobilistico e sanitario. (Kun, 2016)

I suoi importanti indici di prestazione, tra cui lavorabilità, tempo di presa e indurimento e proprietà meccaniche, possono essere ottimizzati selezionando i materiali e i parametri di stampa. Ad oggi, molte strutture edilizie sono state stampate con successo utilizzando la tecnologia del calcestruzzo stampato in 3D, alcune delle quali hanno persino raggiunto le sue reali applicazioni. Il calcestruzzo stampato in 3D ha un grande potenziale per le applicazioni pratiche, come la costruzione di alloggi a prezzi accessibili nei paesi a basso reddito, i bunker

militari e le costruzioni complesse in cui la cassaforma è difficile da produrre. (Zhang et al. 2019) Riassumendo, la stampa tridimensionale offre molti vantaggi nel settore edile:

- *Flessibilità*: maggiore liberà per l'architetto e l'ideatore del progetto nel realizzare e personalizzare le proprie idee (e quelle del cliente) anche quando costituite da forme complesse. Inoltre, il concetto di flessibilità si ritrova nella facilità di gestire cantieri. (Xiao, 2021)
- *Sostenibilità*: un'alternativa sostenibile che si affianca al tradizionale "modo" di costruire. Vengono ridotti gli scarti di lavorazione, possono essere utilizzati materiali riciclati e locali provenienti anche da elementi realizzati essi stessi con stampa 3D, il tutto nel pieno rispetto dei principi dell'economia circolare. (Sing, 2023)
- *Sicurezza*: cantiere produce minor rumore e polverosità, oltretutto riduce al minimo le sovrapposizioni tra lavorazioni e di conseguenza ne riduce i rischi. (Sing, 2023)
- *Accuratezza*: la stampa 3D offre un diretto passaggio di informazioni dal progetto (e quindi da modello 3D) alle operazioni di costruzione, attraverso una ottima realizzazione dei dettagli e riduzione delle possibilità di errori. (Xiao, 2021)
- *Rapidità*: la stampa 3D è un processo più veloce e talvolta meno costoso rispetto ai tradizionali cantieri grazie ad un uso più efficiente dei materiali e dell'organizzazione del cantiere. (Xiao, 2021)

Il mondo delle costruzioni sta cambiando e la stampa 3D sta giocando un ruolo fondamentale. Le innovazioni riguardano tutta la filiera del progetto (dal disegno al progetto, dall'organizzazione al cantiere). La possibilità di poter utilizzare materiali locali amplifica l'orizzonte di possibilità come la precisione nella costruzione di strutture complesse, la velocità di costruzione e la riduzione dei costi. Tutti questi fattori stanno trasformando il modo in cui viene progettata, costruita e gestita la costruzione. (Zhang et al. 2019)

Di esempi nel mondo cominciano ad essercene molti dato che col passare del tempo sempre più aziende si stanno orientando verso la stampa 3D. Anche l'Italia ha un ruolo importante nel panorama internazionale, sia nel campo della ricerca che in quello costruttivo. Approfonditi studi vengo effettuati ogni anno nei laboratori delle università italiane, basti pensare allo IUAV, all'Università di Brescia, alla Federico II di Napoli e all'università di Bologna. Importanti articoli su riviste scientifiche analizzano nel dettaglio i vari campi di applicazione: dalle proprietà chimico fisiche a quelle meccaniche delle miscele, fino alle proprietà meccaniche di vari elementi strutturali e architettonici realizzati mediante stampa strato su strato. (Bretini, 2022) (Licciardello, 2022)

A livello pratico, più la tecnologia progredisce, più ci si spinge oltre nel campo dell'edilizia. Partendo da semplici manufatti quali passerelle a Venezia (Striatus, un ponte in muratura ad arco composto da blocchi di cemento stampati in 3D assemblati senza malta o rinforzo) (Fig. 1.1.3) (INGENIO 2021a) si è arrivati alla realizzazione di padiglioni stampati combinando argilla, sabbia e fibre naturali mediante un braccio meccanico. (Fig. 1.1.4) (INGENIO 2021b)



Fig. 1.1.3: Padiglione Dior - Dubai

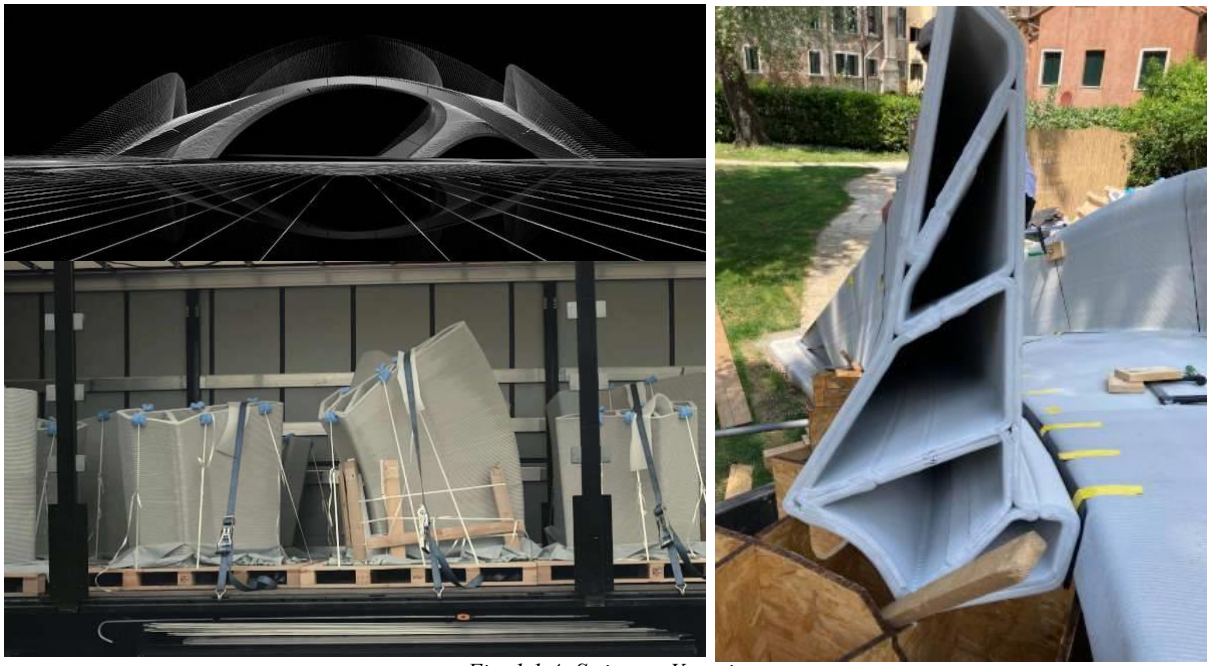


Fig. 1.1.4: Striatus - Venezia

In ambito ingegneristico possiamo citare l'esempio di Italcementi che grazie alla collaborazione tra aziende del settore (MATERIAS) ed università, si studiano innovativi concept nel campo del design strutturale. L'obiettivo è "personalizzare" gli oggetti strutturali e, di conseguenza, l'intero processo progettuale degli stessi. Inoltre, a valle del processo di stampa, è possibile realizzare veri e propri elementi strutturali in c.a. (ossia caratterizzati dalla presenza di rinforzo metallico) attraverso una tecnica di assemblaggio con l'ausilio di dispositivi in acciaio che rendono monolitica la struttura. Si tratta di un processo design-to-product che dà la possibilità di controllare tutta la filiera fino al monitoraggio implementando lo scambio di informazioni nella rete infrastrutturale.
L'utilizzo della stampa 3D porta verso una nuova cultura del "costruire" sostenibile, un sistema di progettazione e realizzazione basato sulle tecnologie digitali che coinvolge gli studi di architettura e di progettazione, le imprese di costruzioni, le maestranze, i centri di ricerca, le università. (Hidelberg 2021)

1.2 Evoluzione del calcestruzzo

Di derivazione latina (struttura di calce), nel diciannovesimo secolo viene man mano utilizzato sempre più nel campo dell'architettura e dell'ingegneria. Marco Vitruvio Pollione, nel suo trattato De architectura, definisce tale tecnica come opus caementicium. Nella descrizione contenuta nel De Architectura, il termine caementum (dal verbo caedo che significa tagliare in pezzi) indicava il rottame di pietra usato per confezionare il calcestruzzo (Elsen 2022). Il termine cementum, nel latino volgare, conservò prima il significato di "rottame di pietra", per poi assumere nel tardo Medioevo, con il termine italiano di cemento, il significato di tutto il conglomerato, cioè l'attuale calcestruzzo. Solo alla fine del diciottesimo secolo il termine cemento assunse quello attuale di legante idraulico, mentre al conglomerato venne definitivamente assegnato il termine calcestruzzo. (Collepardi 1991)

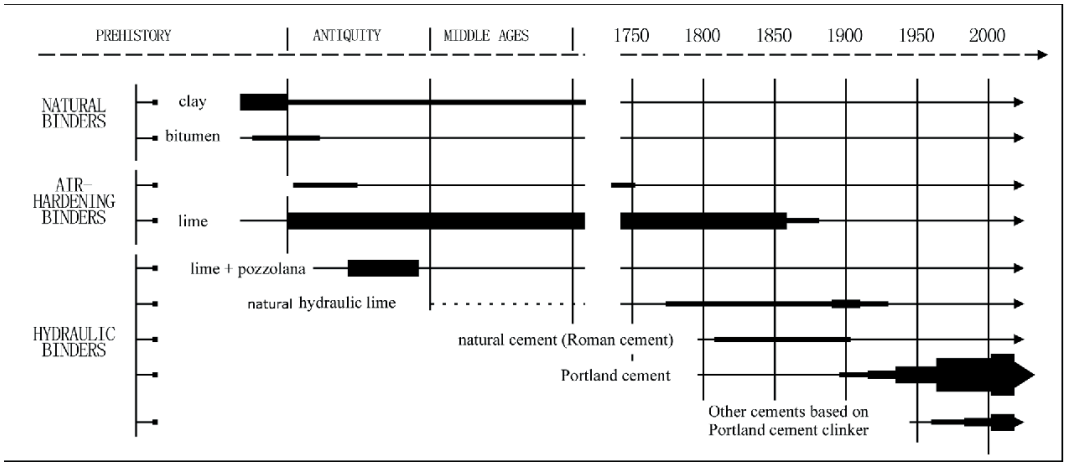


Fig. 1.2.1: Linea temporale dell'evoluzione dell'opus caementicium

Tracce del primordiale calcestruzzo si hanno nelle civiltà assira ed egizia in cui utilizzavano una mistura di materiale minuto. Un'altra civiltà che conosceva questa tecnologia era quella greca in cui uno splendido esempio sono i serbatoi di Sparta. L'impulso maggiore lo diedero i romani che lo utilizzarono per un notevole numero di opere, ancora oggi in buono stato di conservazione. I romani impiegavano il calcestruzzo per opere ingegneristiche in ambito stradale, fondazionale e soprattutto per opere murarie. Le tecniche dell'opus incertum, dell'opus reticulatum e dell'opus caementicium sono descritte da Vitruvio nel suo De Architectura (Elsen 2022). Brevemente, l'opus caementicium era costituito da una muratura a sacco: si erigevano due paramenti murari in mattoni con corsi di malta, che fungevano da casseri e nel mezzo il vuoto veniva colmato da malta e rottami di pietra o mattone. (Gros 1997)
Nel terzo millennio avanti cristo, in Egitto fu realizzato il primo legante della storia che fungeva da collante per i conci di pietra. Fino a quando il legante della malta era costituito soltanto dalla calce, l'indurimento del calcestruzzo avveniva con estrema lentezza, poiché il progressivo consolidamento di una malta a base di calce è dovuto alla reazione dell'idrossido di calcio con l'anidride carbonica presente nell'aria con la successiva produzione di carbonato di calcio. Essendo quasi nulla la possibilità di contatto tra la calce idrata interna all'opus caementicium e l'anidride carbonica presente nell'aria, la reazione avveniva molto lentamente con prodotti finali a bassa resistenza. In alcune antiche costruzioni murarie in calcestruzzo confezionato con legante a base di calce sono state trovate, anche a distanza di vari secoli, quantità significative di calce non ancora trasformata in carbonato di calcio e quindi non ancora indurita. (Adam 1994)
A partire dal I secolo a.C., l'opus caementicium viene perfezionato al massimo nel momento in cui la sabbia che costituiva la malta viene sostituita in parte o in tutto dalla pozzolana o dal cocciopesto. Questa innovazione segnò la rivoluzione in campo ingegneristico a tal punto che lo stesso Vitruvio nel II libro del De Architectura ne decanta le qualità: "la pozzolana di Baia o di Cuma fa gagliarda non solo ogni specie di costruzione ma in particolare quelle che si fanno in mare sott'acqua". Grazie al comportamento pozzolanico della pozzolana e del cocciopesto, il calcestruzzo faceva presa e induriva anche in acqua, senza la necessità del contatto con l'aria, consentendo così la produzione di malte ad alta resistenza e rapido indurimento. (Adam 1994)

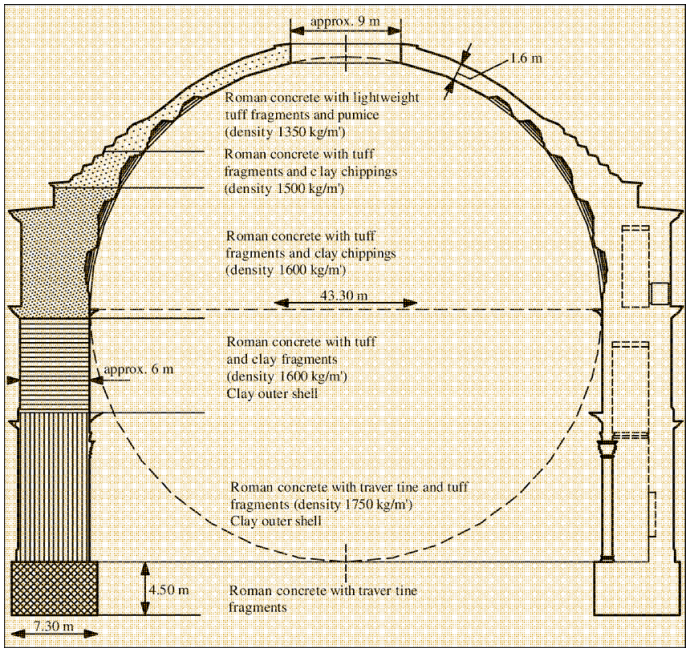


Fig. 1.2.2: Il calcestruzzo romano usato come materiale strutturale nella cupola del Pantheon. (Radic, 2008)

La caduta dell'Impero Romano portò ad un inesorabile peggioramento della qualità delle costruzioni realizzate con il calcestruzzo. Ad aggravare la situazione si considera che venne abbandonato anche l'uso della pozzolana, il materiale principale del calcestruzzo. Tale declino perdurò per tutto il medioevo dove si preferirono tecnologie costruttive più semplici da realizzare. Un esempio di ciò è rappresentato dalla sostituzione del legante cemento con il grassello di calce. (Adam 1994)

Per una riscoperta graduale delle tecnologie romane, e nel nostro caso del calcestruzzo, bisognerà aspettare l'età umanistica. Con la traduzione e rilettura dei libri di Plinio il Vecchio e di Vitruvio, si riscoprì l'uso e la realizzazione del calcestruzzo romano. Tali studi avvennero in Francia nel Settecento ma solo in Inghilterra, per mano dell'ingegnere britannico John Smeaton, venne scoperta la calce idraulica. Essa era composta da una miscela ottenuta dalla cottura di calcare contenente una discreta quantità (11% circa) di impurezza argillosa. (Fieni, 1997)

La scoperta della calce idraulica segna uno spartiacque tra il calcestruzzo romano e quello moderno. Un impulso notevole venne anche dal mondo della chimica dove si riuscì a governare un nuovo processo di sintesi che porterà prima alla calce idraulica artificiale, poi al moderno cemento Portland. Infatti, una volta scoperto che le impurità di silice e allumina, presenti nell'argilla che accompagnano naturalmente alcuni calcari, sono responsabili della formazione dei silicati e alluminati di calcio capaci di indurire sott'acqua, s'iniziarono le sperimentazioni nella cottura di miscele artificiali di calcare e argilla a temperatura sempre più elevata fino ad arrivare a una rudimentale scarificazione del prodotto finale. (Frampton et al. 1982)

Tra la fine del settecento e gli inizi dell'ottocento, fiorirono brevetti e sperimentazioni che portarono alla produzione dei primi leganti idraulici industriali: i cementi. Nel 1796 Parker fabbrica il primo cemento a presa rapida cuocendo nei suoi forni da calce concrezioni marnose contenute nelle argille del Tamigi, mentre nel 1800 Lesage ottiene un materiale idraulico di alta resistenza calcinando i ciottoli calcarei di Boulogne sur Mer. Nel 1818 l'ingegnere Vicat definisce la formula della calce idraulica artificiale mentre nel 1824, Joseph Aspidin, un fornaciaro di York, realizzò il cemento Portland. Nel 1844 J.C. Johnson mise in evidenza l'importanza dei processi di cottura ad alte temperature che portavano alla formazione del clinker, prodotto finale del procedimento. Infatti, mentre per la cottura della calce idraulica si richiedono 600 - 700 °C, si devono raggiungere i 1.600 °C e più per ottenere i cementi a lenta

presa, poiché deve prodursi un principio di vetrificazione. Nel 1860 M. Chatelier stabilì la composizione chimica del cemento consentendo così la produzione industrializzata del calcestruzzo. (Frampton et al. 1982) Le Chatelier intuì che le proprietà dei leganti idraulici derivavano dalla sovrapposizione di fenomeni di tipo chimico (idratazione), fisico (cristallizzazione) e meccanico (indurimento). Stabilì che il ferro non esercitava alcun ruolo nei cementi Portland e concluse che la reazione fondamentale che provocava l'indurimento dei cementi era la seguente (Taddia, 2021):

$$SiO_2 \cdot 3CaO + H_2O = SiO_2 \cdot CaO \cdot 2{,}5H_2O + 2Ca(OH)_2 \quad (1.1)$$

A cui si aggiungeva l'idratazione dell'alluminato:

$$Al_2O_3 \cdot 3CaO + Ca(OH)_2 + H_2O = Al_2O_3 \cdot 4CaO \cdot 12H_2O \qquad (1.2)$$

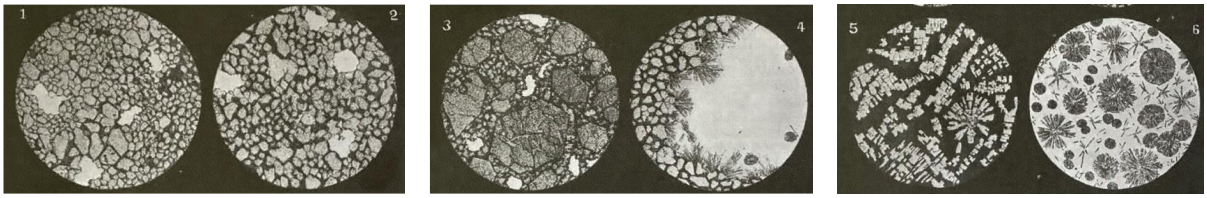


Fig. 1.2.3: Analisi microscopica dei cementi dalla tesi di Le Chatelier. (Taddia, 2021)

1.3 Mix design del calcestruzzo

La pasta di cemento allo stato fresco può essere schematizzata come una sospensione più o meno fluida costituita da granuli dice di dimensione variabile all'incirca tra 1 μm e 200 μm dispersi in un mezzo acquoso a partire dal mescola dell'acqua col cemento Esiste sempre un periodo durante il quale le paste possono essere trasportate iniettate, pompate, spruzzate, colate, plasmate, ecc… e la durata di questo periodo, dipende sostanzialmente dal tipo di cemento, dal rapporto acqua cemento, dalla temperatura e dell'eventuale presenza di additivi. Il particolare stato in cui si trovano le paste di cemento durante questo periodo viene indicato con il termine di stato fresco e corrisponde all'incirca con lo stato assunto dalla pasta prima che inizi la presa le caratteristiche principali di una pasta allo stato fresco riguardano le proprietà reologiche la stabilità. (Collepardi 1991)
L'area reologica è la scienza che studia lo scorrimento la deformazione della materia. Essa si applica quindi, molto bene alle paste fresche di cemento che sono deformabili ed al tempo stesso capace di scorrere. Molti altri fluidi, comprese le sospensioni di cemento in acqua, si comportano come i fluidi così detti fluidi plastici per i quali il comportamento reologico è descritto dalla formula (1.3) detta funzione di Bingham:

$$\tau = f + \eta D \quad (1.3)$$

con:
η = viscosità plastica
f = limite di scorrimento e cioè il minimo valore della tensione τ che occorre applicare per far muovere il fluido. (Collepardi 1991)

Il comportamento reologico di una pasta cementizia può essere caratterizzato dalla conoscenza di questi tre parametri: la viscosa plastica (η), il limite di scorrimento (f) e l'area (A) del ciclo

di isteresi compresa tra la curva ascendente e quella discendente. Maggiore è l'area (A) più distanti tra loro sono la curva ascendente e quella discendente. Se A è nullo il sistema si comporta come un fluido newtoniano o plastico; un valore positivo di A indica che il sistema è tixotropico mentre un valore negativo indica che la pasta si comporta dal fluido dilatante o anti tixotropico. Purtroppo la determinazione di questi fattori dipende fortemente dalla storia del sistema e cioè dal trattamento subito dal materiale prima di iniziare le misure reologiche.

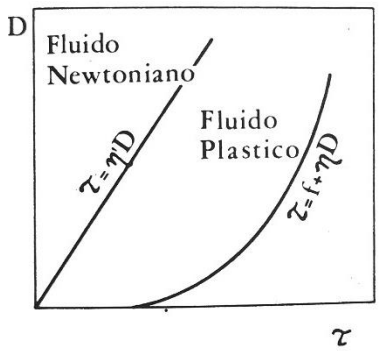


Fig. 1.3.1– Andamento schematico del gradiente di scorrimento (D) in funzione della tensione di scorrimento (τ) per un fluido dilatante o anti-tixotropico.

Nella figura 1.3.2 è illustrata la viscosità plastica di alcuni cementi Portland unitamente ad un cemento pozzolanico ed altoforno ottenuti per aggiunta rispettivamente di pozzolana o di loppa di altoforno ad un cemento Portland di tipo ferrico. Si può osservare che la viscosità plastica aumenta con la finezza del cemento mentre l'aggiunta di pozzolana o di loppa fanno aumentare il limite di scorrimento ma non modificano sostanzialmente la viscosità plastica.

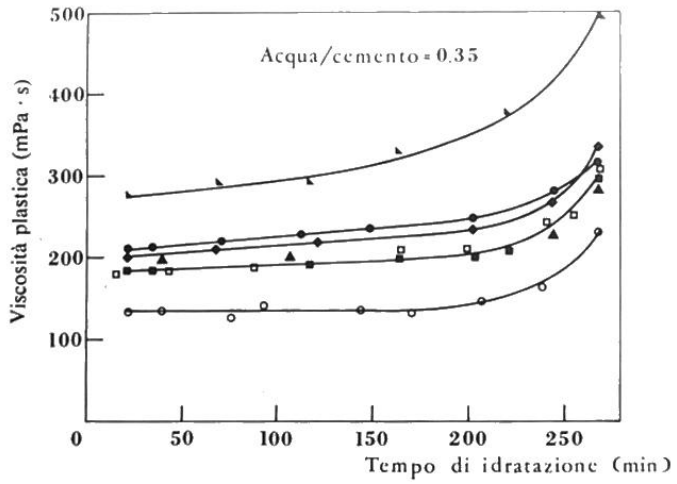


Fig. 1.3.2 – Viscosità plastica in funzione del tempo di idratazione per paste preparate con diversi cementi e con rapporto a/c di 0,35

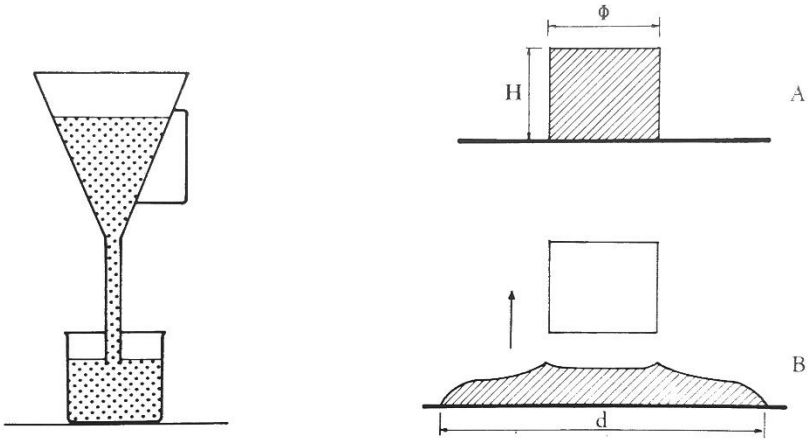


Fig. 1.3.3 – A sinistra: Apparecchio di misura dello scorrimento di una pasta cementizia. A destra: Misura dello spandimento di una pasta introdotta in un cilindro (A) quindi sformata (B)

La pasta di cemento allo stato fresco è un sistema microscopicamente eterogeneo costituito da particelle solide di cemento disperse in un mezzo acquoso. A causa della diversa massa volumica delle particelle solide e dell'acqua, il sistema non è stabile e tende a segregare: si osserva una sedimentazione delle particelle solide sul fondo unitamente ad un accumulo di acqua più o meno limpida sulla superficie. L'accumulo di acqua sulla superficie si manifesta visivamente attraverso la formazione di uno strato speculare di acqua che prende il nome di acqua essudata o acqua di bleeding. La capacità di bleeding aumenta con il contenuto di acqua e diminuisce con la superficie specifica del cemento (figura 1.3.5):

Velocità di bleeding (cm/s × 10^6)

Rapporto acqua/cemento	Area superficiale specifica (cm²/g)			
	1500	2000	3000	4000
0,30	80	50	15	5
0,35	180	75	45	10
0,40	a	120	65	25
0,50	a	245	140	65
0,60	a	a	215	135
0,80	a	a	a	a
1,00	a	a	a	a

a = Bleeding anomalo.

Fig. 1.3.5 – Effetto dell'acqua e dell'area superficiale specifica

Quando la velocità di bleeding è superiore alla velocità di evaporazione dell'acqua, la superficie della pasta cementizia si ricopre di uno strato di acqua orizzontale e planare. Quando però, l'evaporazione dovuta alle condizioni ambientali provoca una sottrazione di acqua dalla superficie della pasta cementizia, superiore a quella che vi si accumula a causa del bleeding, la superficie della pasta perde la sua planarità per la formazione di una miriade di menischi con la concavità rivolta in alto. Ciò crea l'instaurarsi di una pressione capillare (P), di eguale grandezza ma di segno opposto alla differenza di pressione idrostatica attraverso i menischi come è mostrato nell'equazione 1.4:

$$P = -\gamma\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \qquad (1.4)$$

con:

γ = tensione superficiale dell'acqua;
r_1 e r_2 = raggi di curvatura dei menischi.

In laboratorio il ritiro plastico si manifesta attraverso il distacco della pasta dai confini dello stampo, in cantiere, per esempio in un pavimento fresco di calcestruzzo, la compressione laterale generata dai menischi d'acqua si manifesta attraverso una serie di fessure denominate fessure da ritiro plastico. In genere, le fessure da ritiro plastico si formano durante le prime 10/12 ore dopo il getto. Pertanto è necessario proteggere l'impasto fresco o con pellicole anti evaporanti, usare inerti per bagnati se sono porosi e raffreddare l'impasto per ridurre o eliminare completamente l'evaporazione dell'acqua. È ovvio che queste misure sono indispensabili quando si è in ambienti caldi asciutti e ventilati che rendono la velocità di evaporazione dell'acqua superiore a quella del bleeding e creano quindi, più facilmente, le condizioni del ritiro plastico.

Il mix design (o progetto della miscela) è un procedimento in base al quale viene definita la composizione del calcestruzzo. Tale composizione viene calcolata sulla base di alcuni requisiti tecnici prioritari che tengono conto di:

- Proprietà richieste al materiale per la realizzazione della struttura (resistenza meccanica, modulo elastico, durabilità)
- Esigenze esecutive (lavorabilità, modalità del getto, maturazione)
- Materiali disponibili (tipo di cemento, aggregati, additivi, eventuali aggiunte)

Con il mix design è così possibile formulare una composizione del calcestruzzo il cui risultato sarà tanto più rispondente alle specifiche di progetto quanto più vaste ed esaurienti saranno le informazioni a disposizione.
Il mix design può essere diviso in:

- *Mix design semplice*: se impostato su 4 elementi base necessari per ogni tipo di mix-design (la resistenza caratteristica Rck, la lavorabilità, il tipo di cemento, il diametro massimo dell'aggregato disponibile)
- *Mix design complesso*: se ottenuto aggiungendo ai quattro precedenti dei quesiti fondamentali, almeno un altro richiesto dalla particolarità dell'opera (ritiro, durabilità, fluidità, ecc....)

Dove non si può garantire un'accurata vibrazione e compattazione del calcestruzzo è consigliabile aumentare la lavorabilità del conglomerato a classi di consistenza S4 o S5 come indicato nella UNI 9418. Sono idonei alla produzione di calcestruzzo per uso strutturale gli aggregati ottenuti dalla lavorazione di materiali naturali, artificiali, oppure provenienti da processi di riciclo conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 12620 e, per gli aggregati leggeri, alla norma europea armonizzata UNI EN 13055. Il sistema di valutazione e verifica della costanza della prestazione, di tali aggregati, ai sensi del Regolamento UE 305/2011, è in dicato nella seguente Figura 1.3.6:

Specifica Tecnica Europea armonizzata di riferimento	Uso Previsto	Sistema di Valutazione e Verifica della Costanza della Prestazione
Aggregati per calcestruzzo UNI EN 12620 e UNI EN 13055-1	Calcestruzzo strutturale	2 +

Fig. 1.3.6 – Estratto Tab. 11.2.II – NTC 2018

Nei calcestruzzi è ammesso l'impiego di aggiunte, in particolare di ceneri volanti, loppe granulate d'altoforno e fumi di silice, purché non ne vengano modificate negativamente le caratteristiche prestazionali. Le ceneri volanti devono soddisfare i requisiti della norma europea

armonizzata UNI EN 450-1 e, per quanto riguarda i fumi di silice, devono soddisfare i requisiti della norma europea armonizzata UNI EN 13263-1. 11.2.9.4.
Gli additivi devono essere conformi alla norma europea armonizzata UNI EN 934-2. 11.2.9.5, mentre l'acqua d'impasto, ivi compresa l'acqua di riciclo, deve essere conforme alla norma UNI EN 1008: 2003. In assenza di specifica norma armonizzata europea, il fabbricante di miscele preconfezionate di componenti per calcestruzzi, cui sia da aggiungere in cantiere l'acqua di impasto, deve documentare per ogni componente utilizzato la conformità alla relativa norma armonizzata europea.

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

Abar, B. M., C. Kelly, N. B. Allen, and K. Gall. 2024. *"1 - Historical perspectives on 3D printing."* Clin. Appl. 3D Print. Foot Ankle Surg. First Ed., P. D. Highlander, ed., 1–16. New Delhi: Elsevier.

Adam, J.-P. 1994. "*L' arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche"*. Longanesi.

Bretini A., Moro S., Russo S. 2022. *"Adhesion analysis between Concrete layers generated by a 3D Printing."* Key Engineering Materials, 916, 115-122. https://doi.org/10.4028/p-7sjq14

Collepardi, M. 1991. "*Scienza e tecnologia del calcestruzzo"*. HOEPLI EDITORE.

Comb J., Priedeman, W., & Turley P. W. 1994. *"FDM® Technology process improvements"* http://hdl.handle.net/2152/68588

ELSEN 2022 - *"Historic Concrete Science: Opus Caementicium to Natural Cements"*

Fieni L. 1997. *"Louis Bernard Guyton De Morveau : l'interesse di uno scienziato del XVIII secolo per le calci ed i cementi"* Archeologia dell'architettura : II, doi: 10.1400/236181, issn: 2038-6567

Forty, A. 2013. "*Concrete and Culture: A Material History*." Reaktion Books.

Frampton, K., M. De Benedetti, and R. Poletti. 1982. "*Storia dell'architettura moderna."* Zanichelli.

Gros, P. (Ed.). 1997. "*Vitruvio, De architectura."* Einaudi.

Hidelberg, M. 2021. *"La tecnologia 3D Printing per le case del futuro." Heidelb. Mater.* https://www.heidelbergmaterials.it/it/tecnologia-3d-printing.

Horvath, J. 2014. "*A Brief History of 3D Printing. In: Mastering 3D Printing.*" Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-0025-4_1

INGENIO. 2021a. *"Cemento e Stampa 3D: Striatus, ecco il design del primo ponte ad arco."* Ingenio. https://www.ingenio-web.it/articoli/striatus-il-primo-ponte-ad-arco-stampato-in-cemento-3d/.

INGENIO. 2021b. *"Abitare in 3D: Dior a Dubai con 2 moduli abitativi realizzati con stampanti e in materiali naturali."* Ingenio. https://www.ingenio-web.it/articoli/abitare-in-3d/.

Khan, M. S., F. Sanchez, and H. Zhou. 2020. *"3-D printing of concrete: Beyond horizons."* Cem. Concr. Res., 133: 106070. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106070.

Kun K., 2016. Reconstruction and Development of a 3D Printer Using FDM Technology. Procedia Engineering, Volume 149, pages 203-211, ISSN 1877-7058. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.657.

Licciardello, L., Carleschi, E., Massari, S. A., Reggia, A., Metelli, G., & Plizzari, G. A. 2022. "*Multilevel Design Approach to 3D Printed Concrete Elements."* Il calcestruzzo nella transizione ecologica - Concrete in the ecological transition. (pp. 98-102). GWMAX srl.

Per, J. 2018. "*History of concrete. A very old and modern material*." Co-published with Chemical Industry Press.

Siemiński, P. 2021. *"Chapter 7 - Introduction to fused deposition modelling."* Addit. Manuf., Handbooks in Advanced Manufacturing, J. Pou, A. Riveiro, and J. P. Davim, eds., 217–275. Elsevier.

Singh N, Colangelo F, Farina I. 2023. *"Sustainable Non-Conventional Concrete 3D Printing—A Review"* Sustainability. 15(13):10121. https://doi.org/10.3390/su15131012

Su, A., and S. J. Al'Aref. 2018. *"Chapter 1 - History of 3D Printing."* 3D Print. Appl. Cardiovasc. Med., S. J. Al'Aref, B. Mosadegh, S. Dunham, and J. K. Min, eds., 1–10. Boston: Academic Press.

Zhang, J., J. Wang, S. Dong, X. Yu, and B. Han. 2019. *"A review of the current progress and application of 3D printed concrete." Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, 125: 105533. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533.

Xiao, J., Ji, G., Zhang, Y., Ma, G., Mechtcherine, V., Pan, J., ... & Du, S. 2021. "*Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities."* Cement and Concrete Composites, 122, 104115. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115

Riferimenti normativi

NTC 2018: D.M. 17 Gennaio 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8

2 Il Materiale

Una delle grandi sfide di questa ricerca era dare una forma testabile ai provini di calcestruzzo privi di armatura e privi di fibre. La prima problematica riguardava la realizzazione di una macchina per la stampa dei provini. Il laboratorio della MBS nella figura del tecnico G. Mudadu ha costruito una stampante 3D con l'intento di realizzare provini con un'area massima di stampa di 60x40 cm. La malta cementizia accuratamente realizzata nei laboratori MBS viene versata in un imbuto che, tramite un tubo, convoglia il prodotto direttamente nell'ugello che ha un diametro di 2,5 cm. In commercio ne esistono di varie forme e dimensioni che identificano differenti tipi di prodotti finali. Gli ugelli con diametro ridotto stampano i provini, mentre gli ugelli con forma rettangolare e angoli smussati vengono utilizzati in cantiere o in laboratorio per la realizzazione di elementi strutturali veri e propri come ad esempio travi o setti strutturali. (Yang 2023)

Il mix design sperimentato in questa ricerca è di tipo complesso, cioè quando, oltre ai quattro elementi di base, esistono anche altre proprietà che si ritiene di dover conferire o comunque osservare nel confezionamento del calcestruzzo. Tuttavia, seguendo il criterio sopraesposto e utilizzando opportune correlazioni tra i requisiti richiesti (ad esempio la durabilità, il ritiro, la resistenza allo scassero, ecc.) e il rapporto a/c da scegliere in funzione di questi è possibile calcolare correttamente i componenti del calcestruzzo.

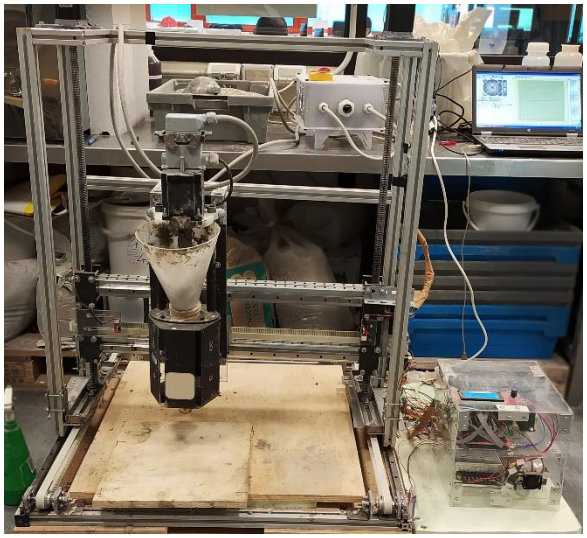


Fig. 2.0.1 – Stampante 3D laboratori MSB



Fig. 2.0.2 – Percentuale componenti nella miscela cementizia

Nella fattispecie, per questa ricerca, la miscela è composta da 14% di Filler Calcareo, 25% da Cemento 52,2 I R, 46% da sabbia, 13% d'acqua e 2%di additivo. In generale, gli additivi sono sostanze chimiche fondamentali che vengono disciolte o disperse nella miscela in piccole quantità (circa dal 0.2% al 2%), modificando le proprietà chimiche e fisiche del calcestruzzo, inoltre inducono particolari modifiche nelle proprietà del materiale fresco e indurito. Secondo la UNI EN 197/1 la quantità totale di additivi da aggiungere all'impasto non deve superare l'1,0% rispetto al cemento (espresso in kg/m3). Ovviamente gli additivi non devono alterare negativamente la qualità del calcestruzzo né agire negativamente con quei materiali usati assieme alla miscela di calcestruzzo (ad esempio l'acciaio nel calcestruzzo armato). Gli additivi si classificano in base alla loro funzione e possono incrementare: la fluidità, la presa, la viscosità ed il ritiro. Nella seguente ricerca, l'additivo aggiunto nella malta cementizia utilizzata per la ripresa di getto è un accelerante denominato P4000.

Fludificanti
I fluidificanti, sono gli antenati dei super-fluidificanti (comparsi nel mercato a metà degli anni ’70 del novecento). I fluidificanti migliorano la lavorabilità del calcestruzzo a pari valore del rapporto acqua/cemento (a/c). Tali additivi diminuendo la tensione superficiale dell'acqua nell’impasto, consentono di ridurre il fabbisogno d'acqua per la data consistenza desiderata. Perciò, senza modificare il dosaggio di cemento (riduzione del rapporto a/c) ne risulta un aumento della resistenza caratteristica a compressione (Rck) e una miglioria la durabilità riducendone anche il ritiro igrometrico. I fluidificanti erano di norma a base di ligninsolfonato ottenuto come residuo dell'estrazione della cellulosa dal legno. Altri prodotti sono stati utilizzati quali il gluconato sodico e il glucosio, più costosi ma anche più efficaci del ligninsolfato.

Super-fluidificanti
I superfluidificanti o super riduttori di acqua (HRWR - High-range water reducer) hanno le stesse caratteristiche dei fluidificanti ma sono quattro volte più efficaci essendo tutti a base di polimeri idrosolubili. I primi superfluidificanti (metà degli anni ’70 del novecento) erano a base di polinaftalensolfonati (PNS) o polimelanninsolfonati (PMS) inventati rispettivamente dal giapponese Hattori e dal tedesco Anigesberger. Dalla fine anni '80 del novecento, sono stati introdotti additivi a base di poliacrilati (PA) o policarbossilati (PC) privi di gruppi solfonici. In generale, con un dosaggio dell'1% di additivo rispetto alla massa del cemento, si può ridurre il tenore di acqua di impasto del 20-30%. Se invece, si vogliono utilizzare super-fluidificanti con una percentuale superiore al 2%, all’interno della miscela cementizia si utilizzerà fumo di silice essendo questo materiale enormemente più fino del cemento. (Collepardi, 1991)

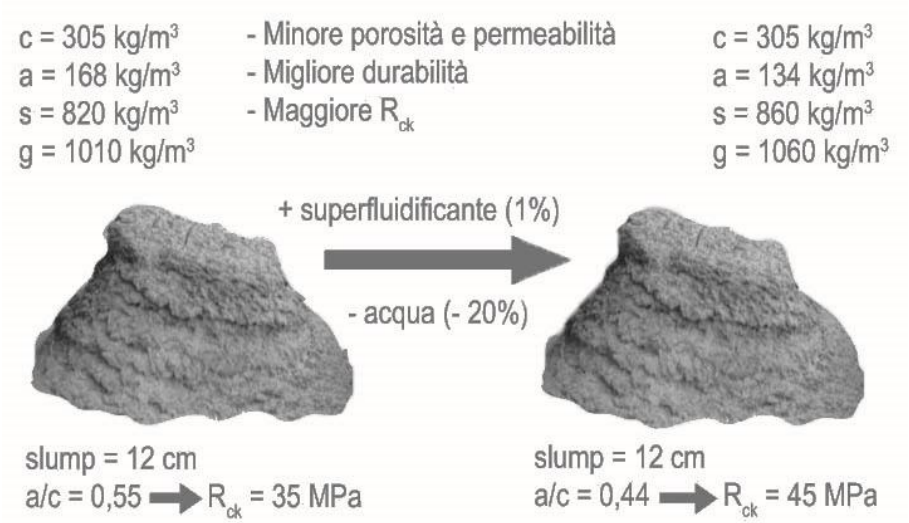


Fig. 2.0.3 – Benefici di additivi in cui si aggiunge del superfluidificante (1%) con riduzione di acqua (-20%) e del rapporto a/c *(-20%), a pari lavorabilità, con miglioramento della durabilità ed aumento della resistenza meccanica.*

Acceleranti
Gli acceleranti di presa e di indurimento alterano il grado di idratazione del cemento alle brevi stagionature in modo da ridurre i tempi di presa (acceleranti di presa) o di incrementare la resistenza meccanica nei primi giorni (acceleranti di indurimento) soprattutto nei climi invernali quando la bassa temperatura rallenta la reazione tra l'acqua e il cemento. La UNI EN 934-2 distingue gli additivi acceleranti di presa da quelli acceleranti di indurimento nel seguente modo:

- Acceleranti di presa: garantiscono un tempo di presa iniziale di 30 minuti a 20 °C e al massimo il 60% del tempo di presa iniziale a 5 °C.

- Acceleranti di indurimento: permettono il raggiungimento come minimo il 120% della resistenza alla compressione dopo 1 giorno a 20 °C e minimo il 130% dopo 2 giorni a 5 °C.

Ritardanti
I ritardanti di presa e di indurimento hanno la funzione di ridurre il grado di idratazione del cemento nelle prime ore, soprattutto in climi caldi quando le alte temperature accelerano l'idratazione del cemento con perdita di lavorabilità la quale può ostacolare il trasporto del calcestruzzo in cantiere, le operazioni di getto e di finitura. I ritardanti sono costituiti prevalentemente da prodotti organici quali: gluconato, glucosio, zuccheri. Tali prodotti non modificano sostanzialmente le prestazioni del calcestruzzo in servizio.

Aeranti
Gli aeranti modificano la tensione superficiale dell'acqua e favoriscono la formazione artificialmente nel getto di calcestruzzo di bolle d'aria a seguito dell'agitazione dell'impasto in betoniera. La presenza di micropori nella matrice cementizia migliora la resistenza ai cicli di gelo e disgelo poiché la pressione idraulica che si viene a creare a causa della formazione di ghiaccio, conseguente all'aumento di volume dell'acqua di circa l'8%, viene scaricata in queste microbolle (raggio 50-250 μm). In genere però determinano una leggera caduta della resistenza a compressione e un aumento delle deformazioni viscose. (Mehta, 2006)

Viscosizzanti
I modificatori di viscosità o viscosizzanti si impiegano per evitare i fenomeni di segregazione e di bleeding soprattutto nei calcestruzzi autocompattanti, specialmente quando il contenuto dei componenti fini della miscela (cemento, filler) è al di sotto della soglia critica di 450 kg/m3. Gli additivi VMA sono basati su prodotti organici, uno dei quali è mostrato in Fig. 2.0.2 capace di trasformare un calcestruzzo fresco segregato (in quanto è presente acqua di bleeding sulla periferia e un accumulo di aggregati grossi al centro -effetto sombrero-) in un calcestruzzo autocompattante quasi autolivellante privo di segregazione.

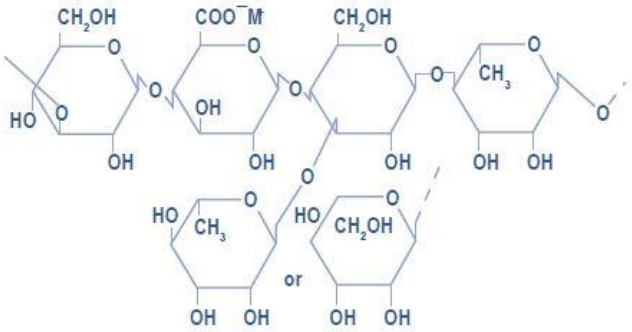


Fig. 2.0.4 – Composizione di un additivo VMA basato sulla composizione di un bio-polimero Welan.

Antiritiro
I riduttori di ritiro (SRA - shrinkage reducing admixtures) sono prodotti liquidi a base di sostanze organiche (generalmente a base di poliglicoli come l'etere propilenglicolico o il neopentilglicole) che agiscono sulla tensione superficiale dell'acqua presente nei micropori del calcestruzzo e fanno diminuire il ritiro igrometrico e quello plastico provocati dall'evaporazione dell'acqua del calcestruzzo nello stato rispettivamente indurito e fresco. Tali additivi riducono anche il ritiro autogeno che si manifesta, anche in assenza di evaporazione, nei calcestruzzi confezionati con rapporti a/c molto bassi (<0,40). Si deve tener conto che, sebbene questi additivi fanno diminuire il ritiro per essiccamento, essi possono influenzare

anche altre caratteristiche del calcestruzzo come la resistenza meccanica ed il modulo di elasticità.

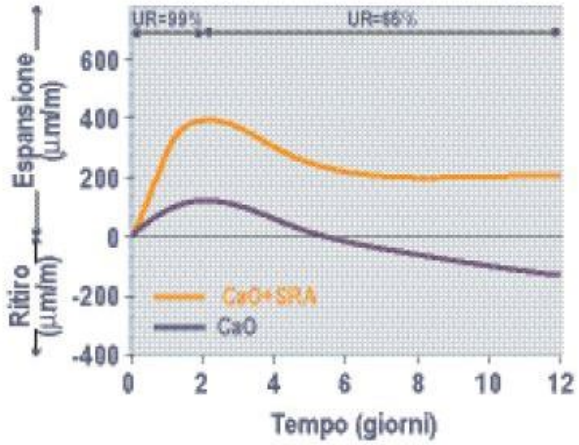


Fig. 2.0.5 – Curva di espansione-ritiro di un calcestruzzo a ritiro compensato con agente espansivo a base di ossido di calcio (CaO) con e senza SRA

In commercio e nei laboratori vengo realizzati e studiati anche altre tipologie di additivi, come ad esempio:

- Adesivi: utilizzati per le riprese di getto
- Impermeabilizzanti: riducono la porosità del calcestruzzo
- Espansivi: servono a contrastare il ritiro del getto. Contengono polvere di alluminio preparata. Con la formazione di bollicine di idrogeno si produce un effetto espansivo.
- Inibitori di corrosione: sono prodotti che vengono aggiunti all'impasto con l'obiettivo di passivare i ferri di armatura. I più diffusi sono quelli a base di nitrito di calcio.
- Idrofobizzanti: sono prodotti applicati sulla superficie del getto per rendere idrorepellente l'epidermide del calcestruzzo (ma anche di altri materiali da costruzione come la pietra e i mattoni a vista. Sono a base di alchil-alossi-silani, detti anche silani. Sono stati tuttavia studiati prodotti a base di silani da aggiungere direttamente nell'impasto per rendere il calcestruzzo idrofobizzato in tutta la sua massa e non solo in superficie.
- Antigelo: si comportano come gli acceleranti, poiché aumentando la velocità di idratazione del cemento determinano un innalzamento della temperatura del getto.
- Battericidi o fungicidi: sono prodotti per trattamente i superficiali che inibiscono la crescita di alghe e funghi, purché le superfici da trattare siano preliminarmente lavate con detergenti. Sono a base di benzoato sodico, fenoli polialogenati, sali di rame o arsenico.
- Coloranti: con funzione puramente estetica.

Tra gli additivi utilizzati come trattamenti superficiali:

- Disarmanti
- Stagionanti (curing agents).

Per quanto concerne il dosaggio dell'additivo, spetta al produttore di calcestruzzo verificare preliminarmente i dosaggi ottimali di additivo per conseguire le prestazioni reologiche e meccaniche richieste oltre che per valutare eventuali effetti indesiderati.
Infine, per quanto riguarda la conformità legislativa, gli additivi per la produzione del calcestruzzo devono possedere la marcatura CE ed essere conformi, in relazione alla particolare categoria di prodotto cui essi appartengono, ai requisiti imposti dai rispettivi prospetti della norma UNI EN 934 (parti 2, 3, 4, 5). Per gli altri additivi che non rientrano nelle classificazioni

della norma si dovrà verificarne l'idoneità all'impiego in funzione dell'applicazione e delle proprietà richieste per il calcestruzzo.

La malta cementizia, monocomponente, fluida, indicata per riprese di getto ad elevata funzione strutturale, anche in presenza di umidità e fino a temperature di -5°C. Rinominata MasterEmaco P 4000, è una speciale malta cementizia monocomponente, a granulometria finissima, che miscelato con acqua permette di ottenere una miscela di ottima lavorabilità, per realizzare riprese di getto. Non essendo a base resina, garantisce una migliore compatibilità con i supporti, una migliore durabilità ed una più semplice applicazione anche dal punto di vista della salute degli operatori.
MasterEmaco P 4000 è stato progettato per eseguire mediante colaggio applicazioni di riprese di getto tra calcestruzzo fresco ed indurito. Dalla scheda tecnica, le caratteristiche sono di questo prodotto sono:

- garantisce una salvaguardia della salute dell'utilizzatore maggiore rispetto ai prodotti a base di resina
- assicura alle malte confezionate il raggiungimento di ottime prestazioni di adesione
- sotto l'aspetto reodinamico ha eccellenti capacità di grouting e self-levelling in assenza totale di segregazione e bleeding
- assicura prestazioni e rapidità di intervento anche a temperature rigide

Le caratteristiche peculiari di MasterEmaco P 4000 sono:

- risponde ai limiti di accettazione indicati nella normativa UNI EN 1504 parte 6 ed è marcato CE;
- l'applicazione del prodotto è semplice e molto meno vincolata alle temperature ambientali, problema che spesso limita l'impiego delle tradizionali resine strutturali in particolare sotto i 10°C; è infatti possibile l'applicazione fino a -5°C;
- elevata compatibilità chimica e "monoliticità" con il supporto (quindi simili moduli elastici, simili coefficienti di dilatazione termica), problema che spesso limita l'impiego delle tradizionali resine strutturali e che comunque non garantisce l'ottenimento di un insieme supporto-ancorante di tipo monolitico;
- elevata durabilità, elevata adesione ed in generale elevate prestazioni meccaniche;
- semplice da usare, privo di odori fastidiosi tipici delle resine tradizionali;
- può essere applicato anche su supporti umidi problema che spesso limita l'impiego delle tradizionali resine strutturali;
- elevata resistenza alle alte temperature (ad esempio in caso di urto ed incendio) grazie alla natura dell'ancorante.

In ottemperanza al Regolamento Europeo (EU No 305/2011 e EU No. 574/2014) il prodotto risulta essere provvisto di marcatura CE secondo UNI EN 1504-6 e della relativa DoP (Dichiarazione di Performance).

Dati tecnici secondo UNI EN 1504-6		Prestazioni
Caratteristiche di adesione	primer-calcestruzzo (tipo C 0,40) UNI EN 1542 (trazione diretta)	A 28 gg > 3,0 MPa
Resistenza a compressione	UNI EN 12390/3	1 g > 15 MPa 28 gg > 45 MPa
Resistenza a trazione per flessione	UNI EN 196-1	1 g > 4 MPa 28 gg >8 MPa
Modulo elastico	UNI 6556	A 7 gg 20.000 (± 2.000) MPa
Resistenza allo sfilamento delle barre d'acciaio - spostamento relativo ad un carico di 75 kN (mm)	UNI EN 1881	<0.6

Fig. 2.0.6 – Dati tecnici secondo UNI EN 1504-6.

MasterEmaco P 4000 può essere impiegato quando la temperatura dell'ambiente è compresa tra -5 e 35°C. Qualora la temperatura, al momento dell'applicazione, sia compresa tra -5 e 5°C lo sviluppo delle resistenze meccaniche risulterà più lento. Si consiglia di utilizzare acqua di impasto con temperatura compresa tra 18°C÷ 25°C. Il prodotto deve essere applicato mediante pennello, rullo o a spruzzo sulla superficie precedentemente preparata (vedasi paragrafo precedente). La ripresa di getto dovrà avvenire necessariamente sulla malta MasterEmaco P 4000 non ancora indurita rispettando i seguenti tempi di ricopertura:

- 10°C entro 2 ore
- 20°C entro 60 minuti
- 30°C entro 45 minuti

Qualora la temperatura, al momento dell'applicazione, sia compresa tra 30° C e 35°C, si consiglia di utilizzare acqua d'impasto a bassa temperatura (5 ÷ 10°C) e di applicare il prodotto nelle ore meno calde della giornata.
Le superfici su cui andrà colato MasterEmaco P 4000 dovranno essere preparate mediante sabbiatura o scarifica e successivamente pulite con aria compressa. I sottofondi dovranno essere inumiditi ma privi di acqua stagnante. Si precisa inoltre che in presenza di temperature al di sotto dello zero, si dovrà verificare l'assenza di ghiaccio sulla superficie oggetto di ripresa di getto.
La preparazione della malta avviene tramite la miscelazione per 3-4 minuti, con frusta montata su trapano a bassa velocità, l'intero contenuto dei sacchi con il quantitativo minimo d'acqua previsto (pari al 18%) fino ad ottenere un impasto omogeneo e privo di grumi. Aggiungere poi eventualmente altra acqua (senza superare il quantitativo massimo previsto (pari al 21%).
Tra le avvertenze, si invita a non applicare su supporti in gesso, su supporti verniciati, su supporti friabili, su supporti misti senza adeguata preparazione preventiva.

2.1 Proprietà fisico-meccaniche

Per indagare le proprietà chimico-fisiche del calcestruzzo, si studiano le cause di degrado a cui una struttura in calcestruzzo può essere sottoposta sono molteplici e spesso concomitanti. Esse sono assai note e nella tabella 01 vengono così riassunte. Si trattano di processi fisici cosiddetti scaling, chimici e meccanici. Analizziamo quindi le cause principali di degrado del calcestruzzo.

Cause intrinseche del materiale	**Cause esterne dovute all'ambiente**
Composizione del calcestruzzo: • Rapporto a/c • Rapporto i/c • Qualità materie prime Calcestruzzo fresco: • Lavorabilità • Segregazione Posa in opera: • Compattazione • Stagionatura	Cause chimiche: • Ossigeno • Anidride carbonica (CO2) • Ossido di zolfo e di azoto • Solfati (SO42-) • Solfuri • Cloruri (Cl-) • Azione dell'acqua di mare • Alcali (Na2O, K2O) Cause fisiche: • Azione cicli gelo-disgelo

	• Essicazione-ritiro • Effetto delle alte temperature Cause Meccaniche: • Abrasione • Erosione • Cavitazione

Tabella 01 – Cause del degrado del calcestruzzo.

2.2 La Carbonatazione

Il meccanismo è legato alla graduale penetrazione nel tempo, attraverso porosità e microfratture del calcestruzzo, dell'anidride carbonica atmosferica (CO_2, gas). Il fenomeno è particolarmente accentuato in zone ad alto inquinamento atmosferico.
LA reazione che caratterizza questo fenomeno porta alla formazione di carbonato di calcio nel calcestruzzo che neutralizza la calce presente in esso e abbassa il pH da valori di 12.5 fino a 9.
La reazione di carbonatazione (fig. 2.2.1) inizia sulla superficie esterna e, con velocità decrescente, penetra all'interno come schematizzato in figura:

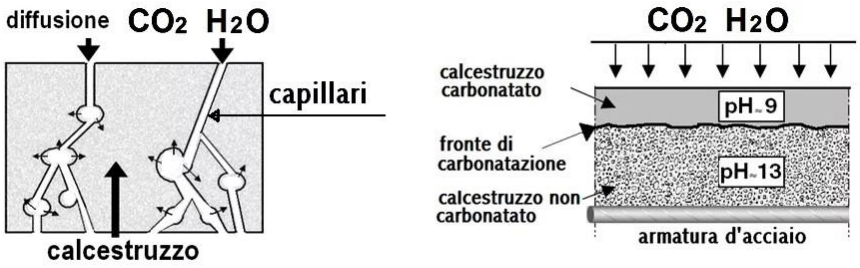


Fig. 2.2.1 – La reazione chimica della carbonatazione nel calcestruzzo.

La profondità di carbonatazione in un calcestruzzo segue una legge che è del tipo (radice quadra) K per t dove K è una costante intrinseca del calcestruzzo e t è il tempo. D'altra parte la reazione di carbonatazione si produce solo in presenza di umidità. Per questi due opposti motivi l'intervallo di umidità relativa più pericoloso per la carbonatazione può essere individuato tra il 50% e l'80%. Il valore di K non è costante nel tempo e cambia in funzione:

- Del tenore di umidità relativa (microclima)
- Delle caratteristiche del calcestruzzo che possono variare da zona a zona (ad esempio le riprese di getto)
- Degli strati esterni rispetto a quelli più interni.

La velocità di penetrazione K risulta quindi molto elevata in assenza di bagnamenti intermittenti della superficie del calcestruzzo (come la pioggia). Questo spiega perché, come fa osservare Shiessel, nelle zone schermate dalla pioggia la velocità di penetrazione della carbonatazione è molto più elevata che non nelle superfici dove l'acqua ristagna. Pertanto la velocità di carbonatazione all'eterno di un edificio risulta nettamente inferiore rispetto all'interno.
Per poter monitorare l'avanzamento del fronte di carbonatazione nel calcestruzzo, si attua il metodo sperimentale secondo cui si spruzza con un indicatore di pH (ad esempio fenolftaleina) una carota estratta da una struttura che colora di rosso le zone non carbonate (ricche quindi di calce) e lascia incolori quelle carbonate.

La carbonatazione per calcestruzzi privi di armatura non provoca particolari danni di resistenza meccanica e chimica ma ne aumenta notevolmente il ritiro e le superfici dei manufatti caratterizzati da una particolare reticolatura di fessure. Il fenomeno è correlato alla porosità della matrice e dal suo stato di saturazione; si ritiene che il massimo ritiro si verifichi con U.R. circa del 50% mentre in ambiente saturo o secco esso non avviene perché le porosità sono rispettivamente sature di acqua ovvero per assenza d'acqua.
La reazione è particolarmente accentuata per i cementi Portland e meno sentita per i pozzolanici, d'altoforno o additivati con ceneri volanti in quanto la calce d'idratazione viene consumata della reazione pozzolanica.

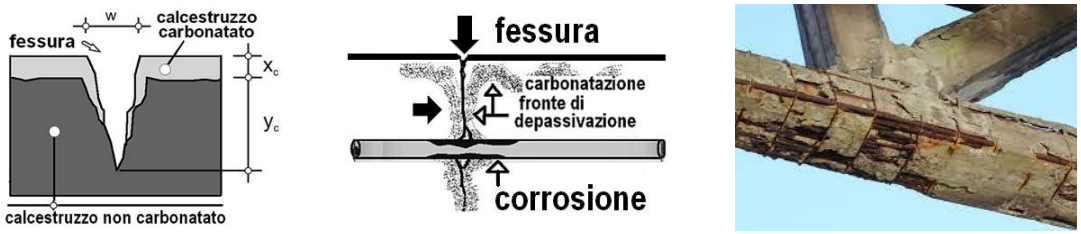


Fig. 2.2.2 – Effetto della carbonatazione nelle strutture in calcestruzzo.

2.3 Ritiro Plastico, igrometrico e Creep (o scorrimento viscoso)

Lo scorrimento viscoso noto anche con il nome di *fluage* o *creep* rappresenta la deformazione unitaria (equazione 2.1) di una pasta di cemento indurita sotto l'applicazione di un carico costante. Esso è di grande importanza pratica per il calcestruzzo in relazione alle deformazioni che subisce il materiale per le sollecitazioni permanenti in generale.
Si definisce velocità di creep la variazione nel tempo della deformazione unitaria, mentre il creep finale è la contrazione cui tende asintoticamente il materiale per un tempo infinito. Si definisce infine creep specifico la deformazione unitaria divisa per il carico applicato.
Il grafico in figura 2.3.1 mostra schematicamente la deformazione unitaria (ε_c) in funzione del tempo quando il materiale è indurito è sottoposto ad un carico di compressione costante. Subito dopo l'applicazione del carico (σ_1), il materiale subisce una deformazione elastica ε_1 pari a:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} \qquad (2.1)$$

con:
σ_1 = carico costante
E = modulo elastico.

Successivamente la pasta di cemento si contrae e l'entità del creep, dipende soprattutto da:

- il carico applicato;
- l'età della pasta al momento dell'applicazione del carico;
- la temperatura e l'umidità relativa

Eliminando il carico σ_1, si osserva un'immediata espansione (ε_2) corrispondente alla contrazione elastica (ε_1) e quindi un lento e parziale recupero della dimensione iniziale. La deformazione residua (ε'_c) prende il nome di creep (o fluage) non recuperabile o irreversibile.
La deformazione da scorrimento viscoso aumenta con il carico applicato (σ_1) e diminuisce con la resistenza meccanica della pasta (σ_c). Una prolungata e buona stagionatura dell'impasto cementizio, come anche un basso rapporto a/c della pasta, favoriscono la formazione di una

struttura più compatta e quindi in grado di offrire una maggiore resistenza alle sollecitazioni. (Collepardi, 1991)

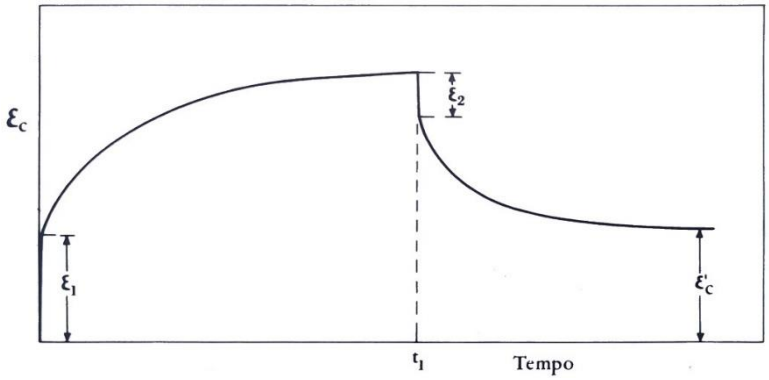


Fig. 2.3.1 – Deformazione viscosa sotto un carico applicato fino al tempo t_1.

Il ritiro plastico avviene quando il calcestruzzo è posto in un ambiente non saturo di umidità perché l'acqua contenuta nell'impasto viene richiamata all'esterno. La pasta di cemento ha un ritiro di 4000 x 10-6 ed esso dipende da:

- l'aumentare del dosaggio di cemento;
- aumentare il rapporto a/c;
- diminuzione del modulo elastico del calcestruzzo;
- diminuzione della resistenza del calcestruzzo.

Il ritiro ed il creep possono influenzare la durabilità del calcestruzzo. Valori sensibili di ritiro provocano fessurazioni nella struttura costituendo così vie d'accesso agli agenti aggressivi, mentre il creep, cui si sovrappone il ritiro, provoca variazioni di tensione.

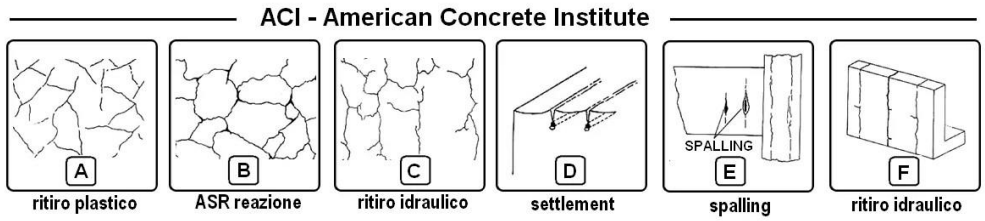


Fig. 2.3.2 – Effetti visivi del ritiro nelle strutture in calcestruzzo.



Fig. 2.3.3 – Effetto del ritiro nelle strutture in calcestruzzo.

2.4 Fatica e Microcracking

Molteplici possono essere le definizioni di fatica a seconda che si prenda in considerazione l'azione sulla struttura o la risposta che questa fornisce. Da un punto di vista microscopico valido anche per il calcestruzzo armato si può dire che la fatica è un processo di progressivo e

irreversibile cambiamento strutturale interno che avviene in un materiale soggetto a stress ripetuti. Secondo l'American Concrete Institute la definizione si potrebbe applicare ai carichi considerando il carico di fatica come caso particolare di un carico dinamico. Si può così definire low-cycle fatigue (ICF) l'intervallo compreso tra 1 e 100 cicli di carico e high-cycle fatigue (HCF) l'intervallo tra 1000 fino a 10 milioni di cicli di carico. I ponti ferroviari e autostradali subiscono durante la loro vita di servizio fino a 10 milioni di cicli di carico le strutture metropolitane possono essere soggette da 10 a 50 milioni di cicli di carico, mentre quelle offshore o che sostengono macchine industriali dinamiche possono subire da 50 a 500 milioni di cicli dovuti a onde, vento e vibrazioni durante i 30/50 anni in cui la loro vita di servizio e valutabile in super high-cycle fatigue (SHCF).
Per il meccanismo di fatica nel conglomerato diverse ipotesi prospettano l'inizio e la propagazione di micro collisioni interne. È stato riconosciuto da molti ricercatori che i cambiamenti più significativi delle proprietà del conglomerato avvengono intorno al 75% del livello di carico ultimo. Tali cambiamenti dovrebbero consistere nel micro cracking del conglomerato che tende a farne aumentare il volume in compressione col contemporaneo incremento del modulo di Poisson e con la variazione del modulo di elasticità E.
Dallo sviluppo di micro fessure è possibile trarre alcune conclusioni:

- Le microfratture dovute agli scollamenti dell'aderenza (debonding) esistono già prima che il conglomerato sia sottoposto a carico e questo a causa del ritiro dell'essiccamento o della carbonatazione.
- La rottura dell'aderenza tra leganti e aggregato aumenta in larghezza lunghezza e numero con la deformazione. Tale aumento risulta trascurabile per i carichi inferiori al 30% del carico ultimo (on a caso entro giusti valori viene usualmente accettata l'ipotesi di linearità nel diagramma Sigma-E).
- La rottura delle malte cresce rapidamente ramificandosi (branching e coalescenza delle fessure) attorno al 70 90% del carico ultimo.

Alcuni ricercatori hanno coniato il termine tensione di discontinuità per indicare che a livello di carico intorno a 75% del carico ultimo la tensione relativa risulta molto meno influenzata da altri fattori esterni quali la velocità di carico. Di conseguenza la tensione di discontinuità, ancor più della resistenza ultima, potrebbe venire usata per stabilire un criterio di rottura del conglomerato. (Slate and Hover 1984)

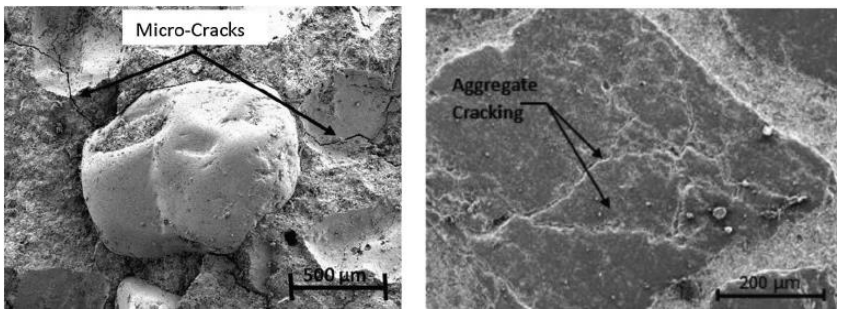


Fig. 2.4.1 – Analisi visiva al microscopio dell'effetto del microcracking.

Da quanto sopra esposto deriva che lo studio dell'origine e della propagazione di microfratture in un conglomerato impone un'attenta analisi per quanto riguarda i meccanismi di penetrazione degli agenti chimici aggressivi. Il reticolo delle discontinuità non riguarda sezioni o superfici, ma è volumetrico e pertanto può raggiungere le armature in ampie zone con evidenti maggiori rischi.

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

Alam, F., M. Elsherif, B. AlQattan, M. Ali, I. M. G. Ahmed, A. Salih, D. S. Antonysamy, A. K. Yetisen, S. Park, and H. Butt. 2021. "Prospects for Additive Manufacturing in Contact Lens Devices." *Adv. Eng. Mater.*, 23 (1): 2000941. https://doi.org/10.1002/adem.202000941.

Bandiera, M. 2012. "Sviluppo di un additivo (super)fluidificante per calcestruzzo da risorse rinnovabili." Università Ca' Foscari Venezia.

Bretini A., Moro S., Russo S. 2022. *"Adhesion analysis between Concrete layers generated by a 3D Printing."* Key Engineering Materials, 916, 115-122. https://doi.org/10.4028/p-7sjq14

Boshoff, W. P., and R. Combrinck. 2013. "Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete." *Cem. Concr. Res.*, 48: 34–39. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.02.003.

"Calcestruzzi spruzzati per rivestimenti di galleria, additivati con acceleranti di presa e rinforzati con fibre". 2023. https://aisberg.unibg.it/handle/10446/32462.

Chang, C.-F., and J.-W. Chen. 2006. "The experimental investigation of concrete carbonation depth." *Cem. Concr. Res.*, 36 (9): 1760–1767. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.025.

Collepardi, M. 1991. *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*. HOEPLI EDITORE.

Collepardi, M. 1998. "Admixtures used to enhance placing characteristics of concrete." *Cem. Concr. Compos.*, 20 (2): 103–112. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00071-7.

Combrinck, R., and W. P. Boshoff. 2013. "Typical plastic shrinkage cracking behaviour of concrete." *Mag. Concr. Res.*, 65 (8): 486–493. ICE Publishing. https://doi.org/10.1680/macr.12.00139.

He, P., X. Zhang, H. Chen, and Y. Zhang. 2021. "Waste-to-resource strategies for the use of circulating fluidized bed fly ash in construction materials: A mini review." *Powder Technol.*, 393: 773–785. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.08.035.

Hong, S.-H., J.-S. Choi, T.-F. Yuan, and Y.-S. Yoon. 2023. "A review on concrete creep characteristics and its evaluation on high-strength lightweight concrete." *J. Mater. Res. Technol.*, 22: 230–251. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.11.125.

Mehta P.K., Monteiro P.J.M. 2006. Concrete: microstructure, properties, and materials. McGraw-Hill, New York

Massazza, F. 1983. "Admixtures in Concrete." *Adv. Cem. Technol.*, S. N. Ghosh, ed., 569–648. Pergamon.

Neville, A. M. 1971. “Creep of concrete: plain, reinforced and prestressed.”

Nordby, G. M. 1958. “Fatigue of Concrete- A Review of Research*.” *J. Proc.*, 55 (8): 191–219. https://doi.org/10.14359/11349.

Papadakis, V. G., C. G. Vayenas, and M. N. Fardis. 1991. “Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation.” *Mater. J.*, 88 (4): 363–373. https://doi.org/10.14359/1863.

Plank, J., and M. Ilg. 2020. “The Role of Chemical Admixtures in the Formulation of Modern Advanced Concrete.” *3rd Int. Conf. Appl. Superabsorbent Polym. SAP New Admix. Smart Concr.*, W. P. Boshoff, R. Combrinck, V. Mechtcherine, and M. Wyrzykowski, eds., 143–157. Cham: Springer International Publishing.

Powers, T. C. 1958. “The physical structure and engineering properties of concrete” *Portland Cem. Assoc R Lab Bull*, (0).

Rashid, M. A., M. A. Mansur, and P. Paramasivam. 2002. “Correlations between Mechanical Properties of High-Strength Concrete.” *J. Mater. Civ. Eng.*, 14 (3): 230–238. American Society of Civil Engineers. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:3(230)

Ringot, E., and A. Bascoul. 2001. “About the analysis of microcracking in concrete.” *Cem. Concr. Compos.*, Special Theme Issue on Image Analysis, 23 (2): 261–266. https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00056-1.

Shah, S. P., and S. Chandra. 1968. “Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete.” *J. Proc.*, 65 (9): 770–780. https://doi.org/10.14359/7512.

Slate, F. O., and K. C. Hover. 1984. “Microcracking in concrete.” *Fract. Mech. Concr. Mater. Charact. Test.*, A. Carpinteri and A. R. Ingraffea, eds., 137–159. Dordrecht: Springer Netherlands.

Tunstall, L. E., M. T. Ley, and G. W. Scherer. 2021. “Air entraining admixtures: Mechanisms, evaluations, and interactions.” *Cem. Concr. Res.*, 150: 106557. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106557.

Yang L., S. Sepasgozar, S. Shirowzhan, A. Kashani, and D. Edwards. 2023. “Nozzle criteria for enhancing extrudability, buildability and interlayer bonding in 3D printing concrete” https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104671 - 2023

3. La Normativa

3.1 Normativa di riferimento sulla base degli obiettivi prefissati

I primi regolamenti sulle strutture in calcestruzzo armato (in Italia, Germania e Francia) nascono tra il 1904 ed il 1907 e rappresentano una presa di coscienza dell'importanza di un codice di riferimento quale termine di controllo del progetto. (Siviero, 1995) Tali regolamenti, nella loro progressione, testimoniano l'evoluzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali. In Italia, con Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 10 gennaio 1907, pubblicato sulla G.U. n. 28 del 2/2/1907, vennero approvate le prime norme tecniche per l'esecuzione di opere in cemento armato, da applicarsi però alle sole opere di competenza del Ministero dei Lavori Pubblici. Tali norme, redatte dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, rappresentarono per l'Italia la prima norma cogente riguardante la sicurezza delle costruzioni intesa come problematica di interesse sociale di rilevanza tale da dover essere regolamentata ex lege. (DM 28/1907). La norma poneva fine all'epoca ottocentesca durante la quale la sicurezza delle costruzioni si ipotizzava formalmente garantita dal rispetto di regole tecniche senza l'obbligo della verifica numerica, introducendo la necessità di verifica dei livelli tensionali dei componenti strutturali. La norma imponeva infatti che i progetti dovessero essere obbligatoriamente accompagnati dai calcoli statici che dovevano dimostrare il rispetto di tensioni ammissibili.
Il controllo della qualità del prodotto è una tematica fondativa nel mondo dell'ingegneria. Non è un caso che, nella realizzazione dei provini, siano state seguite tutte le normative relative ai calcestruzzi, alla loro qualità nella miscela fino all'esecuzione dei test. Tale controllo però risulta difficile da realizzare quando si ha come tempistiche i 28 giorni fissati come maturazione del calcestruzzo. Mentre la norma italiana e quelle europee FIP-CEB Model Code, Eurocodice 2, prevedono unicamente tali prove, già dagli anni '70 le normative canadesi e americane contemplano l'introduzione di procedure standardizzate per l'esecuzione di prove accelerate al fine di determinare la resistenza del calcestruzzo. Alla base c'è una lunga attività di ricerca particolarmente intenso negli anni '60, le cui origini si fanno risalire negli anni '20. (Mezzina, 2005)
Dagli inizi del '900 fino alla seconda metà si sono susseguite una serie di decreti legge e aggiustamenti a livello normativo che hanno portato sempre più ad un miglior controllo della qualità e realizzazione del calcestruzzo. Ai fini della tesi di ricerca, possiamo riassumere le tappe fondamentali secondo questa linea temporale:

- D.M.LL.PP. - Opere in c.a.: applicato alle sole opere di competenza del Ministero dei Lavori Pubblici
- D.P.C.M. 15/05/1925 - Opere in c.a.: applicazione della norma tecnica per il c.a. a tutte le amministrazioni dello Stato.
- R.D.L. n.1981 del 4/9/1927 - Opere in c.a.: applicazione della norma tecnica per il c.a. anche all'ambito privato
- R.D.L. 2229/1939 - Opere in c.a.
- Legge 1086/1971 - Opere in c.a. e acciaio
- D.M. 20/11/1987 - Opere in muratura
- D.M. 14/09/2005 (NTC 2005) - Opere in c.a., acciaio, muratura, legno, etc.

Una delle critiche più incisive riguarda il fatto che in 28 giorni l'opera edilizia può anche essere realizzata ed ultimata e si innescherebbe un circolo vizioso in cui tutte le figure incaricate della

realizzazione dell'opera evitino di effettuare lavori di consolidamento o peggio demolizione. (Siviero, 1995) La risposta a queste problematiche sono state le NTC2008 ed il loro aggiornamento dieci anni più tardi: le NTC2018. Le NTC 2018 (Nuove norme sismiche per il calcolo strutturale), approvate con DM del 17 Gennaio 2018, rappresentano il testo aggiornato delle norme tecniche per le costruzioni (NTC2018), di cui alla legge 5 novembre 1971, n. 1086, alla legge 2 febbraio 1974, n. 64, al decreto del Presidente della Repubblica 6 giugno 2001, n. 380, ed al decreto legge 28 maggio 2004, n. 136, convertito, con modificazioni, dalla legge 27 luglio 2004, n. 186. Le presenti norme sostituiscono quelle approvate con il decreto ministeriale 14 gennaio 2008.
Infine, va evidenziato come i diagrammi sforzi-deformazioni per il calcestruzzo con 28 giorni di maturazione non hanno significato di univocità, difatti molte sono le cause che ne determinano una variazione con elevati coefficienti di dispersione. Il primo esempio sono le variazioni che si registrano nel grafico in fig.3.1.1 in cui si evidenzia come al crescere della resistenza si riduce anche la deformazione ultima a seconda del calcestruzzo.
(Siviero, 1995)

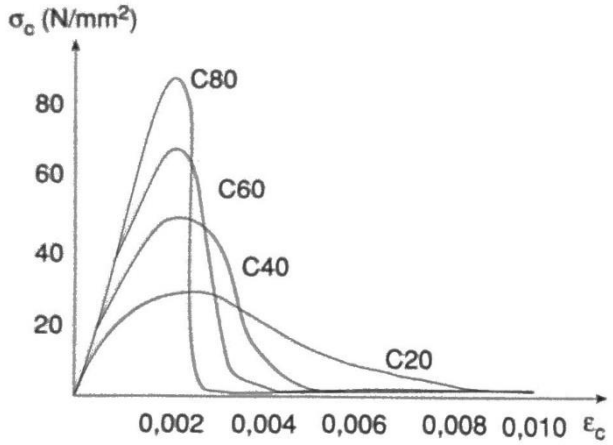


Fig. 3.1.1 – Variazioone del diagramma tensioni-deformazioni a seconda del tipo di calcestruzzo. Si nota che al crescere della resistenza si riduce la deformazione ultima.

Nella fig.3.1.2 si evidenzia il secondo esempio di dispersioni. Esse le abbiamo nel modulo elastico dove a calcestruzzi di classi differenti abbiamo valori del modulo elastico che cresce con la resistenza.

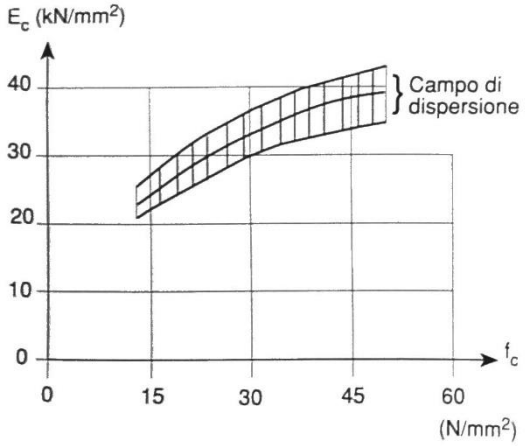


Fig. 3.1.2 –Dispersione del modulo elastico E. Dai diagrammi riferiti a calcestruzzi appartenenti a classi diverse, si evince che il valore del modulo elastico cresce con la resistenza

Oltre alle condizioni di maturazione del calcestruzzo non vanno trascurate le modalità di esecuzione delle prove. Tra i vari fattore che influiscono sul risultato ci sono:

- La velocità di applicazione del carico (fig.3.1.3)
- Se la prova è fatta in controllo di deformazione o di tensione (fig.3.1.4)
- La forma del provino. A seconda del lato dei provini cubici i risultati ottenuti saranno diversi (fig.3.1.5).

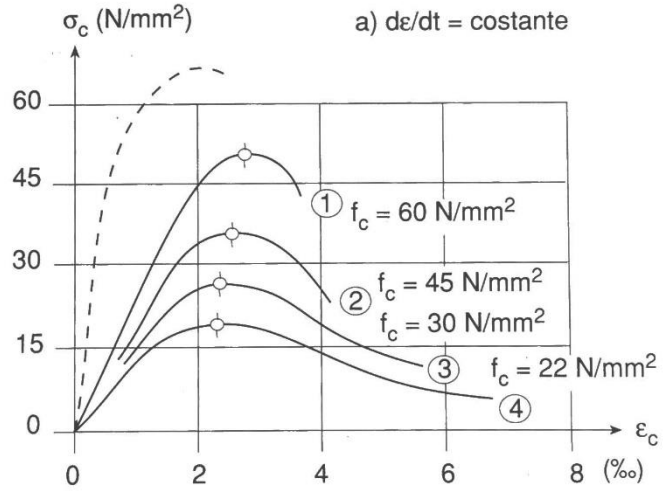


Fig. 3.1.3 –Influenza delle modalità di prova. Diagramma ottenuto a velocità di deformazione costante per calcestruzzi di classi diverse.

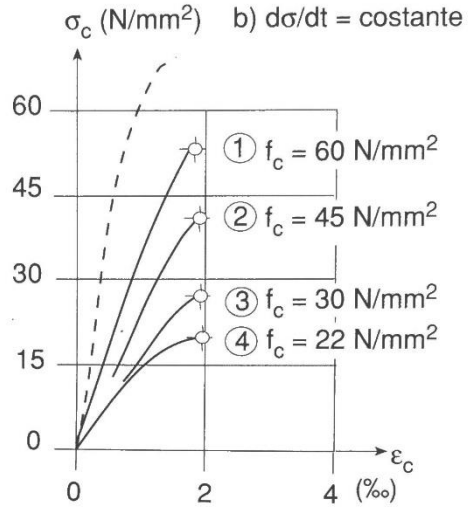


Fig. 3.1.4 –Influenza delle modalità di prova. Diagramma a velocità di tensione costante ottenuto dalle usuali prove.

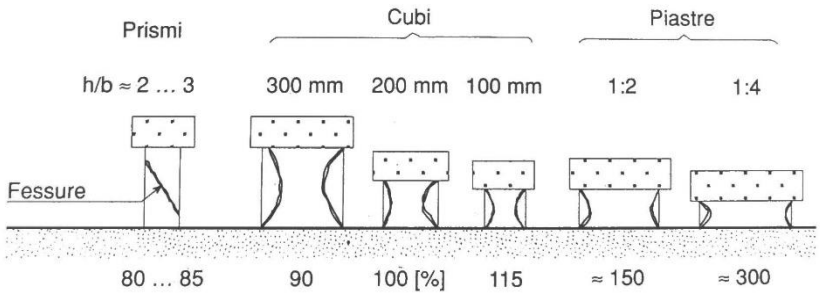


Fig. 3.1.5 –Parametri dimensionali dei provini come fattore condizionante la resistenza meccanica del calcestruzzo.

Va infine sottolineato che nell'effettuare le prove, la sollecitazione a cui l'elemento è sottoposto per la definizione della resistenza, è sostanzialmente monoassiale (salvo ovviamente gli effetti indotti dall'attrito tra piastra e provino), mentre nella realtà gli elementi strutturali sono più spesso sollecitati da strati tensionali pluriassiali che danno origine a non trascurabili aumenti di resistenza rispetto alla condizione monoassiale. (Siviero, 1995)

3.2 Normativa relativa al calcestruzzo

Compressione

Normativa di riferimento: UNI EN 12390-3 2003 e UNI EN 12390-4 2002 specifiche di prova

La presente normativa specifica un metodo per la determinazione della resistenza alla compressione dei provini in calcestruzzo indurito. La prova distruttiva consiste nel caricare il provino fino alla rottura in una macchina per prova di compressione conforme alla EN 12390-4 e si registra il carico massimo sopportato dal provino e si calcola la resistenza alla compressione del calcestruzzo. (Collepardi, 1991)
Una volta realizzati i provini e rettificati tutti gli angoli e le superfici, il provino viene posizionato sulla superficie della macchina accuratamente pulita. Il provino viene posizionato centralmente alla piastra con il carico che viene applicato nella direzione della stampa. Per evitare che il calcestruzzo stampato tocchi direttamente la piastra d'acciaio è stato applicato sulla superficie superiore uno strato di neoprene delle dimensioni 10x10x0,4 cm
La prova è realizzata tramite una velocità di carico costante pari a 0.5 Mpa/s e si ritiene conclusa quando il provino è portato al collasso totale.
La prova si ritiene soddisfacente quando tutte e quattro le facce esposte sono fessurate in modo pressoché uguale, generalmente con minor danno alle facce in contatto con i piatti.

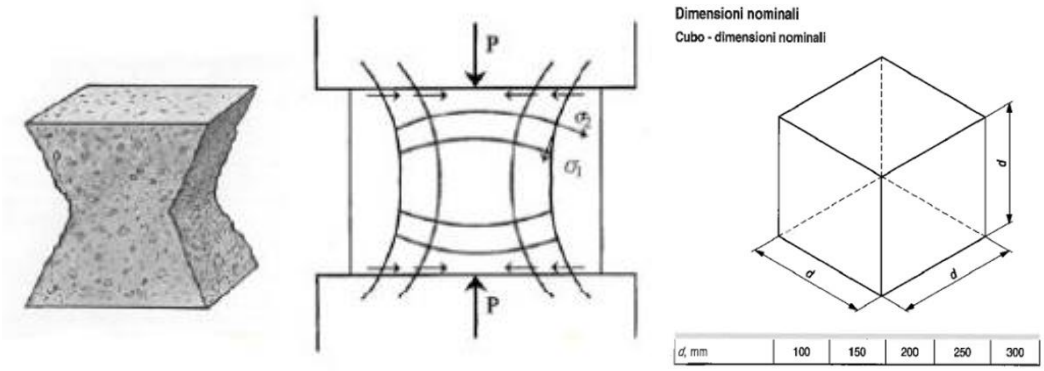


Fig. 3.2.1 – Prova a compressione e dimensioni nominali dei provini cubici.

Le rotture insoddisfacenti possono essere provocate da un'insufficiente attenzione ai procedimenti di prova, in particolare al posizionamento del provino e ad un difetto della macchina di prova. La resistenza a compressione è data dall'equazione 3.1:

$$f_c = \frac{F}{A_c} \qquad (3.1)$$

con:
f_c = resistenza alla compressione in Mpa o N/mm^2;
F = carico massimo a rottura in N;

A_c =area della sezione trasversale del provino su cui agisce la forza di compressione, calcolata dalla dimensione nominale del provino (vedere EN 12390-1) o da misurazioni del provino (in mm^2) come da appendice B

La resistenza alla compressione deve essere espressa al più prossimo 0,5 Mpa (o N/mm^2)
Le rotture dei provini possono divise in due macrocategorie:

- Rotture soddisfacenti: in cui si evidenziano fessure su tutti e quattro i lati esposti, oppure se si verifica un collasso a clessidra o a piramide

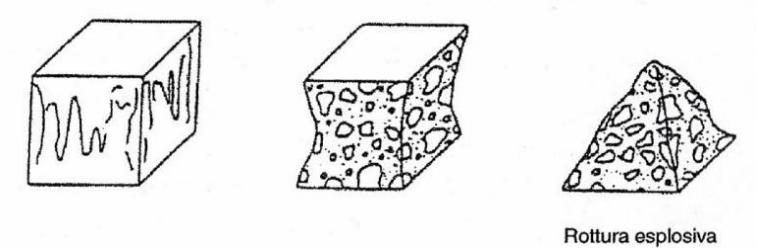


Fig. 3.2.2 – Schemi di rotture soddisfacenti a compressione come da normativa UNI EN 12390-3

- Rotture non soddisfacenti: in cui abbiamo una parziale fessurazione di alcune facce, un collasso di solo alcune facce o collassi di spigoli o mezzo provino.

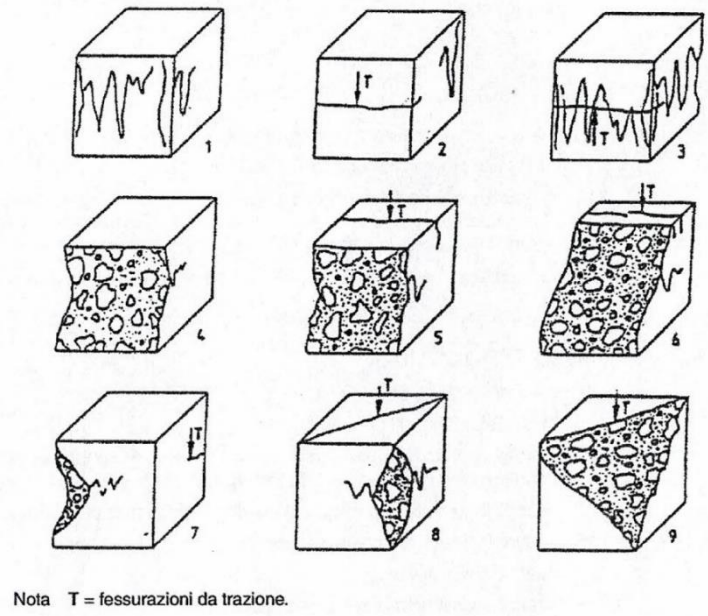


Fig. 3.2.3 – Schemi di rotture non soddisfacenti a compressione come da normativa UNI EN 12390-3

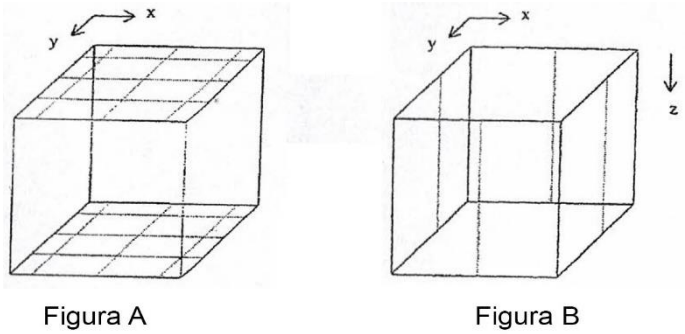


Figura A Figura B

Figura 3.2.4-A: Linee tratteggiate che indicano le posizioni di misurazione delle facce di carico dei cubi
Figura 3.2.4-B: Linee tratteggiate che indicano le posizioni di misurazione delle facce non caricate dei cubi

Flessione su tre punti

Normativa di riferimento: UNI EN 12390-5 2003

È noto che le prescrizioni normative per il calcolo della resistenza delle strutture in calcestruzzo prevedono di trascurare la resistenza a trazione del conglomerato per la sua esiguità rispetto a quella compressione, la sua aleatorietà e anche per la inevitabile compresenza di stati micro-fessurativi dovuti a varie cause. (Collepardi, 1991)
Di fatto però, questo è un parametro estremamente importante per la formazione delle fessure e sono assai note le conseguenze della fessurazione per l'aumento della deformabilità e la riduzione della durabilità, senza dimenticare poi il fatto estetico.
Le fessure hanno origini diverse e dal punto di vista strutturale possono singolarmente identificarsi come segue:

- Fessure di trazione (perpendicolari alla direzione dello sforzo);
- Fessure da compressione (parallele alla direzione dello sforzo);
- Fessure da taglio e torsione (diagonali);
- Fessure da ritiro prima della presa e da ritiro idraulico dopo la presa
- Fessure da ritiro termico
- Fessure da espansioni o da stati coattivi vari (deformazioni impresse)

Il fenomeno fessurativo va controllato sia nella fase di progetto sia nella fase di costruzione. Per questo è necessario conoscere la resistenza a trazione del calcestruzzo.
In mancanza di dati sperimentali la normativa suggerisce l'impiego di una formula empirica per determinare il valore medio della resistenza a trazione f_{ct} in funzione del valore caratteristico della resistenza a compressione f_{ck}:

$$R_{ck} = \frac{580[KN]}{10 \cdot 10[cm^2]} = 58 \frac{N}{mm^2} \quad (3.2)$$

$$f_{ck} = 0{,}83 \cdot R_{ck} = 48{,}14 \frac{N}{mm^2} \quad (3.3)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 = 56{,}14 \frac{N}{mm^2} \quad (3.4)$$

$$E = 22.0000 \cdot (f_{cm}/10)^{0{,}3} = 36.915{,}13 \frac{N}{mm^2} \quad (3.5)$$

$$\leq \text{C50/60} f_{ctm} = 0{,}3 f_{ck}^{(2/3)} = 3{,}97 \frac{N}{mm^2} \quad (3.6)$$

$$> \text{C50/60} f_{ctm} = 2{,}12 \cdot ln\left[1 + \frac{f_{cm}}{10}\right] = 4{,}00 \frac{N}{mm^2} \quad (3.7)$$

Usualmente la resistenza a trazione varia tra 8% e 12% di quella a compressione e in media vale il 10%.
Per quanto riguarda le prove sperimentali per la determinazione della resistenza a trazione, come noto si possono utilizzare la prova diretta ovvero due prove indirete. (Siviero, 1995)
Per quanto concerne la preparazione dei provini ed il loro posizionamento bisogna considerare che preventivamente bisogna mantenere pulite tutte le parti della macchina, il provino correttamente centrato e con il suo asse longitudinale ad angolo retto rispetto agli assi longitudinali dei rulli superiori e inferiori. Infine, assicurarsi che la direzione di riferimento del carico risulti perpendicolare alla direzione di getto del provino. Il risultato della prova può essere influenzato dalla direzione di carico rispetto alla direzione di getto.
La velocità di carico deve essere costante e compresa tra 0,04 Mpa/s (N7mm^2 s) e 0,06 Mpa/s (N7mm^2 s). applicare il carico senza colpi e incremento in modo continuo alla prefissata velocità costante +/- 1%, fino a che non può essere supportato un carico maggiore.

La resistenza a flessione su tre punti è calcolata dalla seguente formula:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} \quad (3.8)$$

con:
f_{cf} = resistenza a flessione in Mpa o N/mm^2;
F = carico massimo in N;
l = distanza tra i rulli di appoggio in mm;
d_1 d_2 = sono le dimensioni laterali del provino in mm.

La resistenza a flessione deve essere espressa al più prossimo 0,1 Mpa (o N/mm^2)

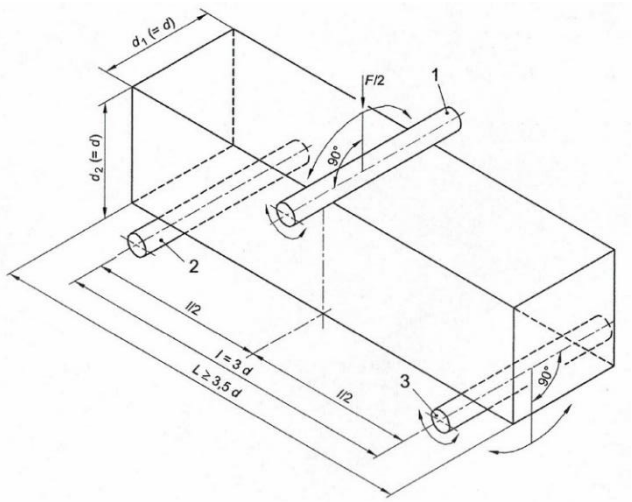


Figura 3.2.5: Schema della flessione a tre punti con carico centrato dove: 1) Rullo di carico (in grado di ruotare ed inclinarsi); 2) Rullo di appoggio; 3) Rullo di appoggio (in grado di ruotare ed inclinarsi)

La resistenza a flessione su quattro punti è calcolata dalla seguente formula:

$$f_{cf} = \frac{F \cdot l}{d_1 \cdot d_2^2} \quad (3.9)$$

con:
f_{cf} = resistenza a flessione in Mpa o N/mm^2;
F = carico massimo in N;
l = distanza tra i rulli di appoggio in mm;
d_1 d_2 = dimensioni laterali del provino in mm.

La resistenza a flessione deve essere espressa al più prossimo 0,1 Mpa (o N/mm^2)

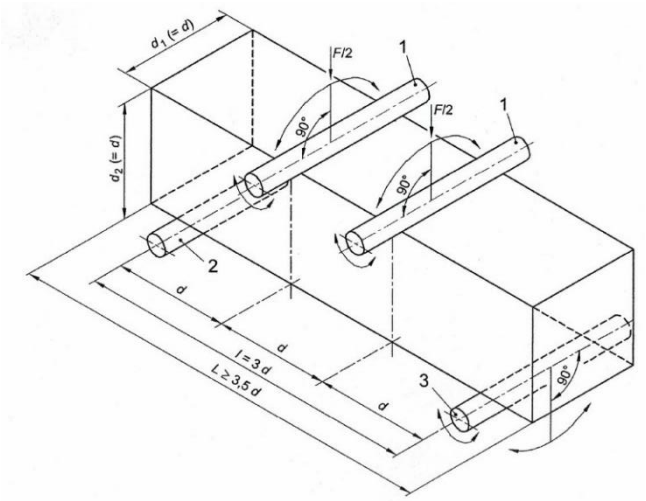


Figura 3.2.6: Schema della flessione a tre punti con carico centrato dove: 1) Rullo di carico (in grado di ruotare ed inclinarsi); 2) Rullo di appoggio; 3) Rullo di appoggio (in grado di ruotare ed inclinarsi)

Triplette su Muratura

Normativa di riferimento: UNI EN 1052-3

Data la caratteristica intrinseca di questa ricerca volta all'innovazione, per indagare più a fondo le qualità tecniche della miscela, si è voluto approfondire l'adesione tra i layer proponendo dei provini che, una volta sollecitati, potessero dare la possibilità di indagare la resistenza all'attrito del materiale.
Riferito esclusivamente al calcestruzzo, in bibliografia non ci sono fonti ma in aiuto viene la normativa riferita alla muratura. Nello specifico i test delle triplette. Originariamente questo tipo di test viene utilizzato nei laboratori per caratterizzare meccanicamente la malta che si frappone tra due o tre conci murari d'argilla. (De Nardi, 2018) Ecco che, nel nostro caso le triplette sono costituite da sei strati di malta cementizia realizzati con una singola tornata di stampa 3D, con un intervallo temporale tra secondo e terzo layer e, in ultima, con un intervallo temporale tra secondo e terzo layer con l'aggiunta di malta cementizia additivata.
La tipologia di test è la medesima della muratura, cambia solamente il materiale e le sue componenti. Di seguito la normativa di riferimento EN 1052-3.

La prima operazione consiste nel supportare gli elementi di estremità di ogni provino nell'apparecchiatura di prova in conformità con le seguenti figure 2 e 3.
A tale scopo, utilizzare pezzi d'acciaio con uno spessore minimo di 12mm, con una copertura appropriata se necessario pe garantire un buon attrito. Il diametro dei cuscinetti a rulli deve essere di 12mm con una lunghezza minima t_u. Applicare il carico attraverso una cerniera sferica posta al centro della piastra di acciaio centrale superiore.
Sottoporre a prova almeno tre provini per ogniuno dei tre carichi di precompressione. Per elementi le cui resistenze a compressione sono maggiori si 10 N/mm^2, utilizzare carichi di precompressione che diano circa 0,2 N/mm^2, 0,6 N/mm^2 e 1,0 N/mm^2. Il carico di precompressione deve essere mantenuto entro +/- 2% del valore iniziale. La precompressione deve essere applicata in conformità alla figura 3.

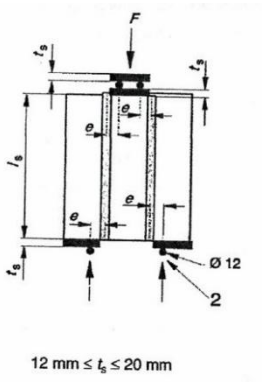


Figura A

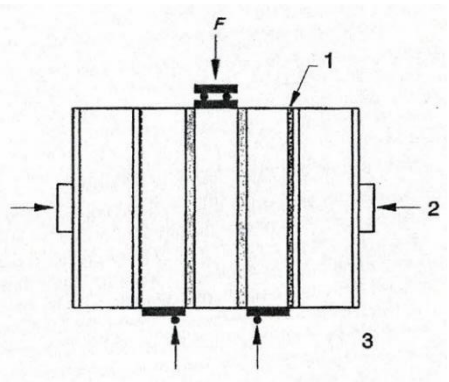


Figura B

Figura 3.2.7-A: Carico del provino per prova a taglio dove: 1) Taglio di sega; 2) Rullo, fisso o in posizione positiva
Figura 3.2.7-B: Carico di compressione dove: 1) Cappa di cartone di pasta di paglia/cartone tenero/gesso; 2) Precompressione; 3) Trave di carico

Ai fini dei test bisogna registrare quanto segue:

- l'età degli elementi di calcestruzzo non autoclavato;
- l'area della sezione trasversale A_i dei provini parallela alla forza di taglio con accuratezza dell'1%;
- il carico massimo $F_{i,max}$;
- il carico di precompressione F_{pi};
- il tipo di rottura.

Se la rottura è dovuta a:

- rottura da taglio nell'elemento parallelo al giunto orizzontale (vedere figura A.3) o;
- schiacciamento o spaccatura degli elementi (vedere figura A.4);
- ulteriori provini possono essere sottoposti a prova fino a raggiungere tre rotture da taglio dei tipi illustrati nella figura A.1 o nella figura A.2 per ogni livello di precompressione raggiunto o in alternativa;
- il risultato può essere utilizzato come soglia inferiore della resistenza a taglio per ogni livello di precompressione.

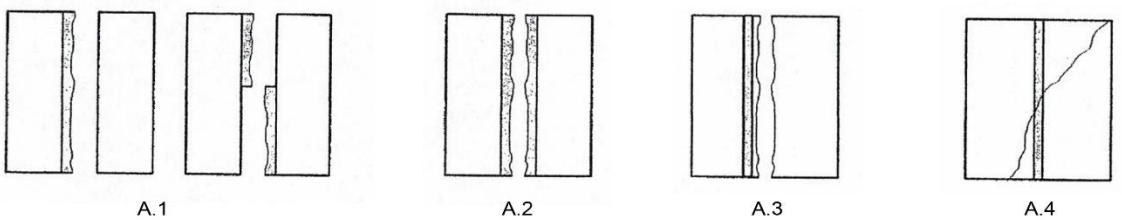


Figura 3.3.8: Le quattro casistiche di schemi di rotture a taglio

I risultati della soglia inferiore non dovrebbero essere utilizzati nella valutazione dei risultati di cui in 10. Se utile, può essere necessaria una precompressione alternativa in modo da raggiungere rotture sufficienti.

Per ogni provino calcolare la resistenza a taglio e lo sforzo di precompressione al più vicino 0,01 N/mm^2 utilizzando le seguenti equazioni:

$$f_{voi} = \frac{F_{i,max}}{2A_i} \quad [\text{N/mm}^2] \qquad (3.10)$$

Da quanto esposto si comprende come le norme vadano lette con riferimento alla conoscenza del reale comportamento dei materiali, non è quindi l'adempimento formale che conta quanto i limiti di attendibilità delle prove che si effettuano, i cui dati sono gli unici che vanno utilizzati per rappresentare la realtà delle strutture, mentre spesso il modello viene erroneamente utilizzato ben oltre i suoi limiti di validità.

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

Collepardi, M. 1991. *Scienza e tecnologia del calcestruzzo*. HOEPLI EDITORE.

De Nardi C., A. Cecchi e L. Ferrara. 2018. "Assessing the influence of self-healing capacity of lime-based mortars on brick-mortar interface strength in masonry units" MATEC Web Conf., 199 02015. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819902015

Mezzina M., 2005 "Costruire con il cemento armato" – UTET Libreria, Torino

Siviero E., R. Cantoni, M. Forin. 1995. Durabilità delle opere in calcestruzzo. Degrado del calcestruzzo, corrosione delle armature, prevenzione, misura della durabilità, sperimentazione e controlli. Volume 7 di Edilizia / Angeli. FrancoAngeli. ISBN 8820491400, 9788820491406

Riferimenti normativi

DM 28/1907: D.M. 10 Gennaio 1907 – Ministero dei Lavori Pubblici "studio delle normo e del controllo scientifico sui materiali da costruzione"

D.M. 20/11/1987: D.M. 20 Novembre 1987 - Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento. GU Serie Generale n.285 del 05-12-1987 - Suppl. Ordinario n. 103

D.P.C.M. 15/05/1925: Prescrizioni per l'accettazione degli agglomerati idraulici e l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato. G.U. Regno d'Italia 12/06/1925, n. 135

EN 1052-3:2002/A1:2007: Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength

Legge 1086/1971: L. 5 Novembre 1971, n. 1086 - Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica. GU n.321 del 21-12-1971

R.D.L. 1981/1927 - Nuove norme per l'accettazione degli agglomeranti idraulici e l'esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice ed armato. G.U. Regno d'Italia 11/11/1927, n. 261

R.D.L. 2229/1939: Regio Decreto 16/11/1939 n. 2229 (S.O. 18/4/1940 n. 92) Norme per la esecuzione delle opere in conglomerato cementizio semplice od armato

UNI EN 197-1:2011 Composizione, specificazioni e criteri di conformità per cementi comuni.

UNI EN 934-2:2012 Additivi per calcestruzzo, malta e malta per iniezione - Parte 2: Additivi per calcestruzzo - Definizioni, requisiti, conformità, marcatura ed etichettatura

UNI EN 12390-3 2003 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione

UNI EN 12390-4 2002 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 4: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova

UNI EN 12390-5 2003: Prove sul calcestruzzo indurito: Resistenza alla flessione

NTC 2005: D.M. 14 Settembre 2005 - Norme tecniche per le costruzioni. GU 23 settembre 2005, n. 222, S.O.

NTC 2018: D.M. 17 Gennaio 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8

4. Sperimentazione

Nella caratterizzazione meccanica del calcestruzzo stampato con tecnologia 3D si sono studiati mirati test distruttivi da realizzare in laboratorio i quali si riassumono nei test normati nel capitolo precedente: compressione, flessione su tre e quattro punti e triplette. (Kocherla, 2021) Mentre le prime tre tipologie di test sono strettamente correlate col materiale oggetto di ricerca, il test a triplette si utilizza per testare provini di muratura. Data la peculiarità della realizzazione dei provini, il test a tripletta è quello che darà la possibilità di indagare l'attrito tra gli strati di calcestruzzo. L'obiettivo della sperimentazione è ricavare dati puntuali sullo scorrimento tra layer perciò i provini si dividono in tre categorie: stampa continua, intervallo temporale di un'ora tra layer e intervallo temporale tra gli strati con l'aggiunta di malta per la ripresa di getto additivata con P4000.

4.1 Setup delle prove e design

Compressione

Normativa di riferimento: UNI EN 12390-4:2019

Provini: Numero provini di dimensioni 10x10x10cm da testare:

- Stampa continua: 2
- Stampa con intervallo: 2
- Stampa con intervallo + P4000: 2

Schema tipo per applicazione degli strain-gauge e design della prova: il test segue la normativa in cui abbiamo provini cubici di dimensioni 10x10x10 stampati 3D con asse di carico parallelo all'asse di compressione. (Panda, 2017)

Sensori: Gli strain-gauge (di lunghezza pari a 60mm) sono posizionati:

- per valutare gli spostamenti nel quadrante xy sono stati applicati due verticali incollati rispettivamente tra il secondo e terzo layer (realizzati sempre con stampa continua) e tra l'ottavo ed il nono layer (realizzati con le tre casistiche precedentemente descritte);
- uno trasversale lungo il quadrante yz

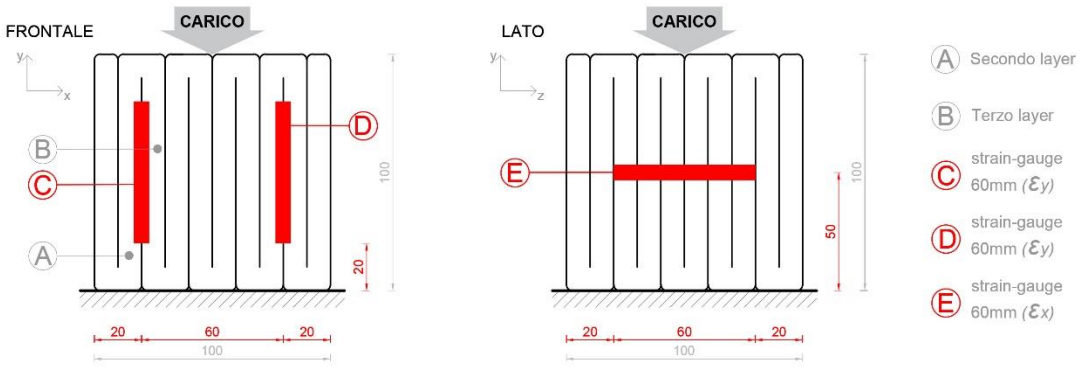


Fig. 4.1.1 – cubi 10x10x10cm realizzati con Stampa Continua

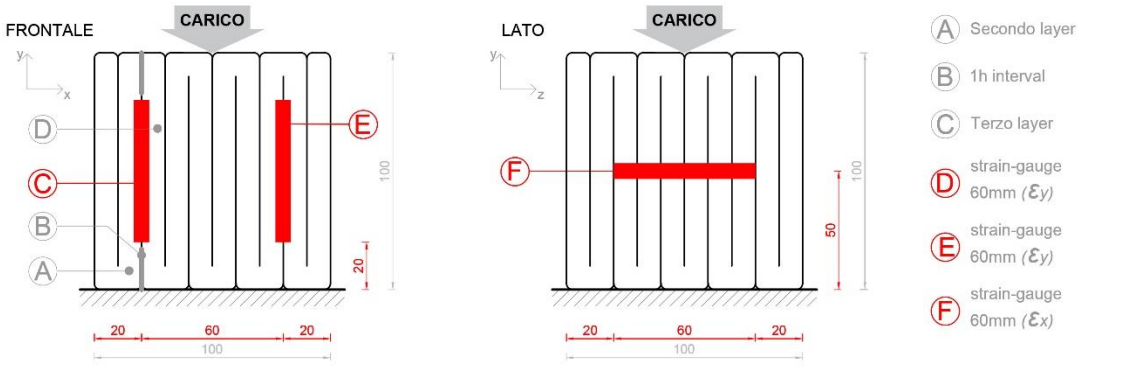


Fig. 4.1.2 – cubi 10x10x10cm realizzati con Stampa Continua e Intervallo temporale tra secondo e terzo layer

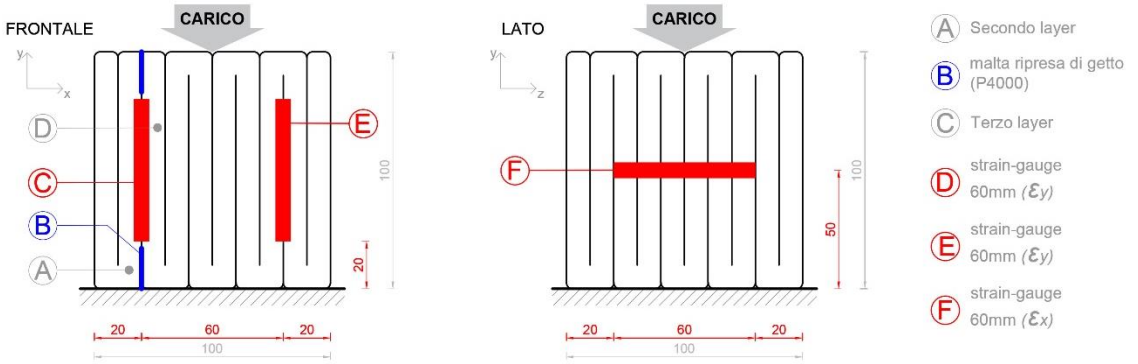


Fig. 4.1.3 – cubi 10x10x10cm realizzati con Stampa Continua e strato di malta additivata per la ripresa di getto nell'intervallo temporale tra secondo e terzo layer

Flessione su tre punti

Normativa di riferimento: UNI EN 12390-5:2019

Provini: Numero provini di dimensioni 4x4x9 cm da testare:

- Stampa continua: 3
- Stampa con intervallo: 3
- Stampa con intervallo + P4000: 3

Schema tipo per applicazione degli strain-gauge: il test segue la normativa in cui abbiamo provini di dimensioni 4x4x9 cm stampati 3D con asse di carico ortogonale al carico. (Siviero, 1995)

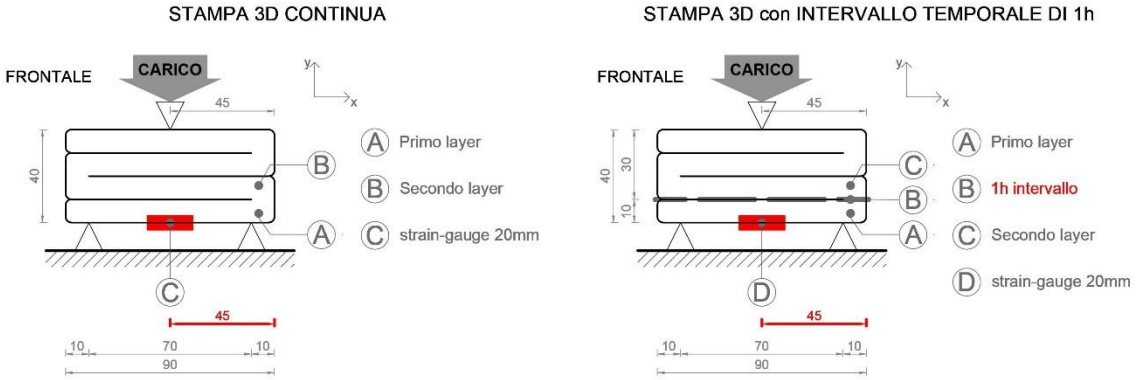


Fig. 4.1.4 – Parallelepipedi retti 4x4x9 cm realizzati con Stampa Continua e con intervallo temporale di un'ora

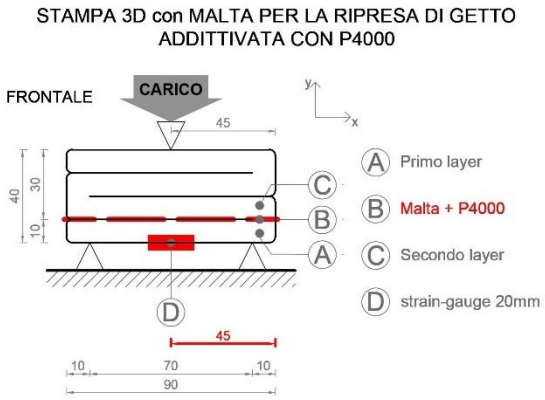


Fig. 4.1.5 – Parallelepipedi retti 4x4x9 cm realizzati con Stampa Continua e strato di malta additivata per la ripresa di getto nell'intervallo temporale tra primo e secondo layer

Sensori: Gli strain-gauge (di lunghezza pari a 20 mm) sono posizionati sulla superficie inferiore perché liscia e adatta all'incollaggio degli strain-gauges. La superficie superiore è inadatta perché irregolare e collimerebbe con la posizione del carico rendendo l'uso del sensore inadatto.

Normativa di riferimento: UNI EN 12390-5:2019
Provini: Numero provini di dimensioni 4x4x17 cm da testare:

- Stampa continua: 3
- Stampa con intervallo: 3
- Stampa con intervallo + p4000: 3

Schema tipo per applicazione degli strain-gauge: il test segue la normativa in cui abbiamo provini di dimensioni 4x4x17 cm stampati 3D con asse di carico ortogonale al carico. (Siviero, 1995)

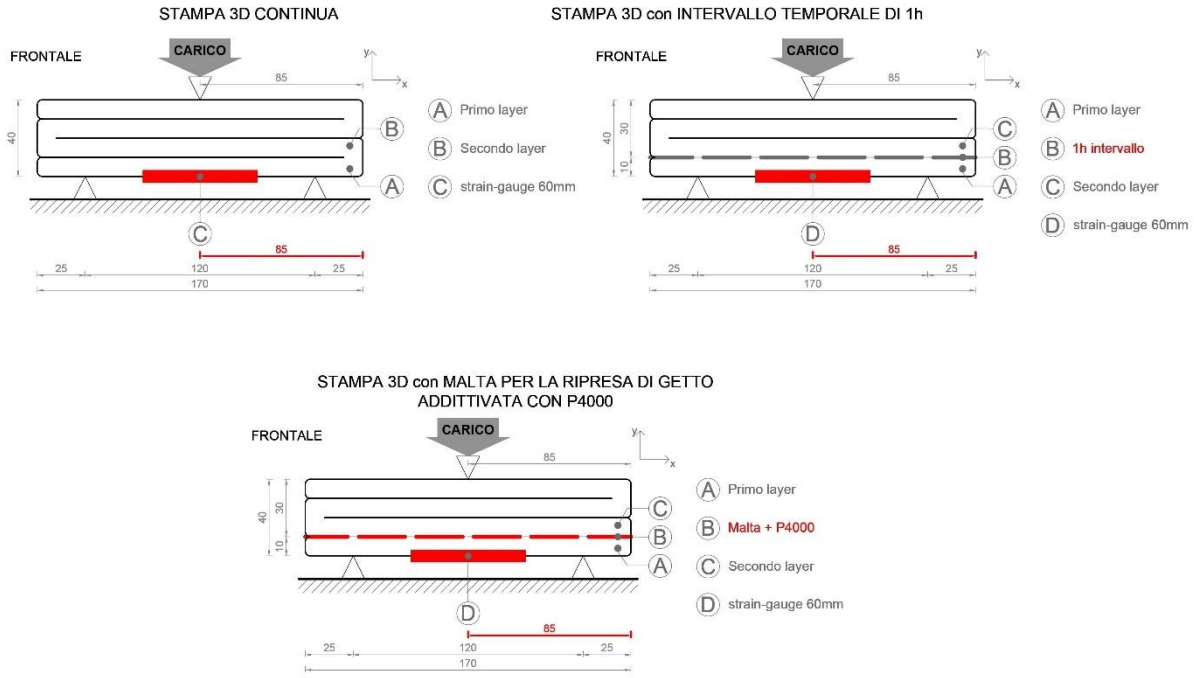


Fig. 4.1.6 – Parallelepipedi retti 4x4x17 cm realizzati nelle tre modalità

Sensori: Gli strain-gauges (di lunghezza pari a 60 mm) sono posizionati come descritto precedentemente in quanto la superficie inferiore è inadatta.

Prova a flessione su 4 punti

Normativa di riferimento: UNI EN 12390-5:2019

Provini: Numero provini di dimensioni 4x4x21 cm da testare:

- Stampa continua: 2
- Stampa con intervallo: 2
- Stampa con intervallo + p4000: 2

Schema tipo per applicazione degli strain-gauge: il test segue la normativa in cui abbiamo provini di dimensioni 4x4x21 cm stampati 3D con asse di carico ortogonale al carico. (Siviero, 1995)

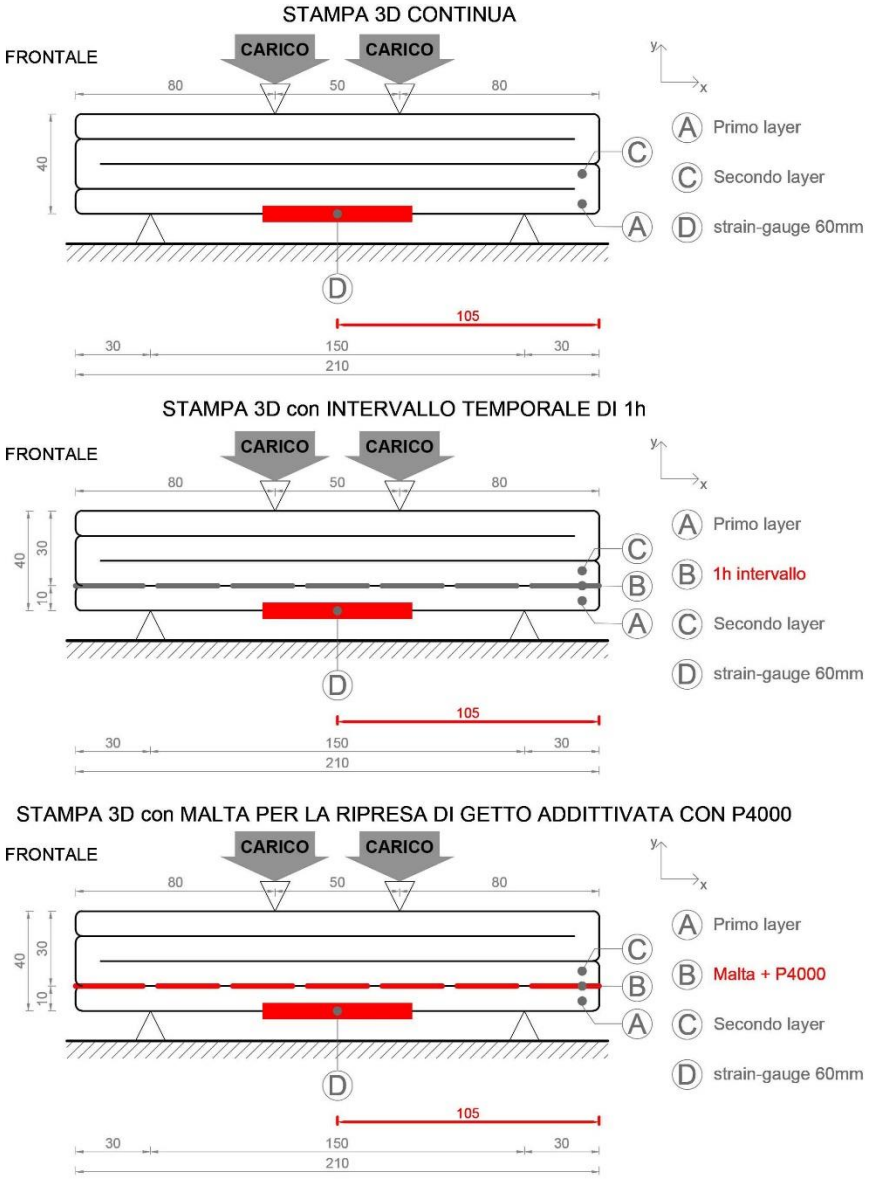


Fig. 4.1.7 – Parallelepipedi retti 4x4x21 cm realizzati nelle tre modalità

Sensori: Gli strain-gauge (di lunghezza pari a 60 mm) sono posizionati come descritto precedentemente in quanto la superficie inferiore è inadatta.

Triplette

Normativa di riferimento: EN 1052-3:2002/A1:2007

Provini: Numero provini di dimensioni 15x6x4 cm da testare:

- Stampa continua: 9 (ridimensionati ad un'altezza di 12cm)
- Stampa con intervallo: 9 (ridimensionati ad un'altezza di 12cm)
- Stampa con intervallo + p4000: 9 (ridimensionati ad un'altezza di 12cm)

Schema tipo per applicazione degli estensimetri a filo:

Triplette 15x6x4 realizzate con stampa continua:

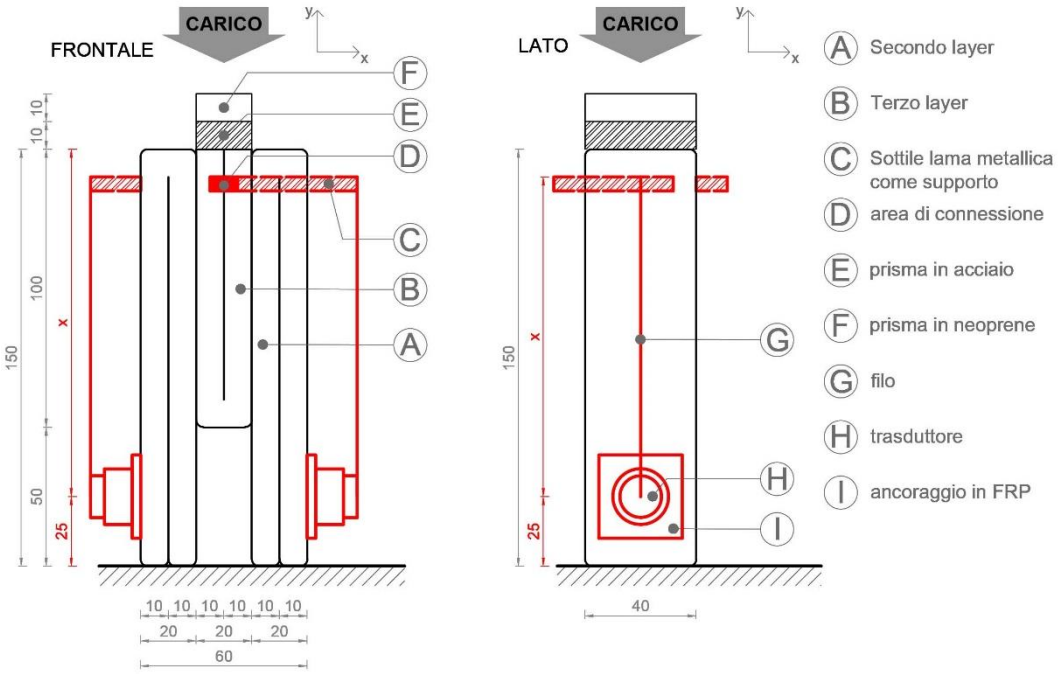


Fig. 4.1.8 – Triplette 15x6x4 cm realizzate con Stampa Continua

Triplette 15x6x4 realizzate con intervallo temporale tra secondo e terzo layer:

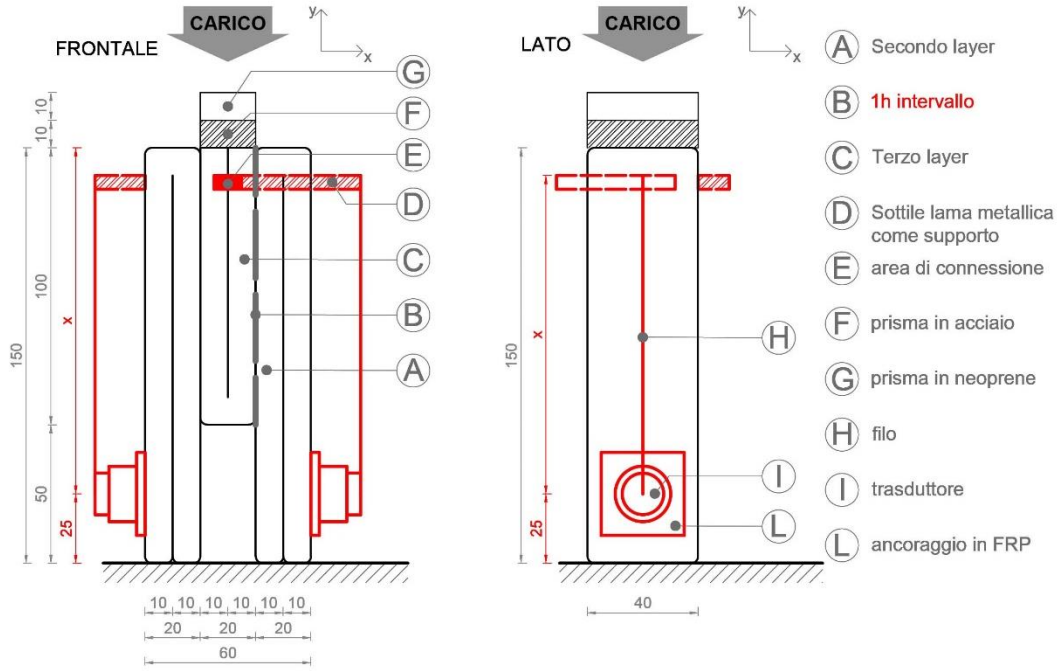


Fig. 4.1.9 – Triplette 15x6x4 cm realizzate con Stampa Continua e intervallo temporale

Triplette 15x6x4 realizzate con intervallo temporale e aggiunta di malta additivata con P4000 per la ripresa di getto tra secondo e terzo layer:

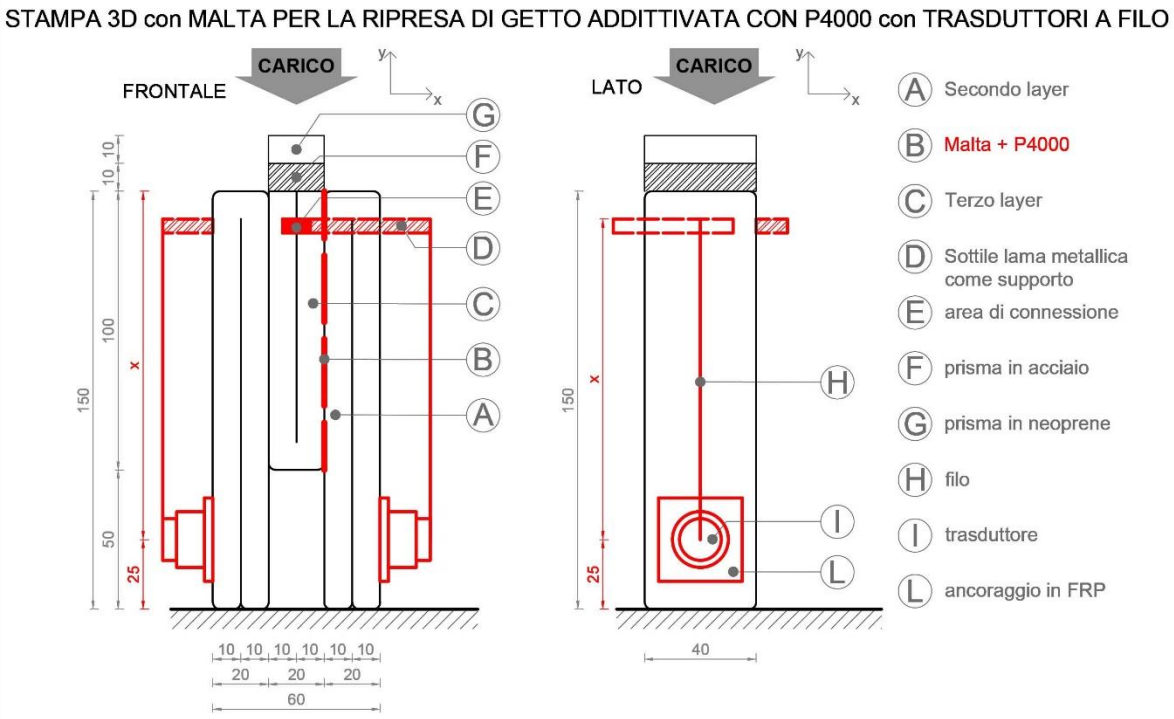


Fig. 4.1.9 – Triplette 15x6x4 cm realizzate con Stampa Continua e malta additivata con P4000

Sensori: In queste serie di test a triplette non è stato possibile applicare strain-gauges in quanto le superfici non erano conformi all'incollaggio degli stessi. Si è scartata anche la possibilità di posizionarli durante la stampa in quanto essendo una fase sperimentale non si aveva la sicurezza della buona riuscita della raccolta dati. Quindi, con le triplette si è voluto utilizzare una soluzione più consona al tipo di materiale applicando estensimetri a filo. Gli estensimetri sono stati incollati alla base dei provini su superfici lisce e piane (tramite rettifica), mentre il filo è stato agganciato ad una lama metallica che a sua volta è stata incollata su una superficie appositamente rettificata sui due layer centrali. Con questa soluzione si possono estrapolare i dati relativi allo spostamento delle coppie laterali di layer rispetto alla forza esercitata. (De Nardi, 2018)

Nella seguente tabella vengono riassunti i tipi di test, il tipo di stampa ed il numero totale di provini realizzati.

	TIPO DI STAMPA			
TIPO DI TEST	CONTINUA	INTERVALLO	ADDITIVO	N. TOTALE PROVINI
Compressione 10x10x10	2	2	2	6
Flessione 4x4x9	3	3	3	9
Flessione 4x4x17	3	3	3	9
Flessione 4x4x21	3	3	3	9
Triplette 6x15x4	7	7	7	21

Per una migliore organizzazione delle prove, i provini stampati, tagliati e rettificati, sono stati nominati come segue. Il codice (o nome) di ogni provino ne identifica:

- la prova a cui sono sottoposti: K per la compressione, F per la flessione, T per le triplette;
- un numero in progressione crescente per tipo di prova (K1, K2, K3, …)

Nella seguente tabella sono elencati tutti i provini che sono stati realizzati per questa campagna di ricerca suddivisi per tipologia di test, tipo di stampa e dimensione:

	Nome	Tipo di test	Tipo di stampa 3D	Dimensioni provino
	K1	COMPRESSIONE	CONTINUA	10 x 10 x 10 cm
	K2	COMPRESSIONE	CONTINUA	10 x 10 x 10 cm
	K3	COMPRESSIONE	INTERVALLO	10 x 10 x 10 cm
	K4	COMPRESSIONE	INTERVALLO	10 x 10 x 10 cm
	K5	COMPRESSIONE	+ P4000	10 x 10 x 10 cm
	K6	COMPRESSIONE	+ P4000	10 x 10 x 10 cm
	F1	FLESSIONE A TRE PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 9 cm

	F2	FLESSIONE A TRE PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 9 cm
	F3	FLESSIONE A TRE PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 9 cm
	F4	FLESSIONE A TRE PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 9 cm
	F5	FLESSIONE A TRE PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 9 cm
	F6	FLESSIONE A TRE PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 9 cm
	F7	FLESSIONE A TRE PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 9 cm
	F8	FLESSIONE A TRE PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 9 cm
	F9	FLESSIONE A TRE PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 9 cm
	F10	FLESSIONE A TRE PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 17 cm
	F11	FLESSIONE A TRE PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 17 cm

	F12	FLESSIONE A TRE PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 17 cm
	F13	FLESSIONE A TRE PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 17 cm
	F14	FLESSIONE A TRE PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 17 cm
	F15	FLESSIONE A TRE PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 17 cm
	F16	FLESSIONE A TRE PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 17 cm
	F17	FLESSIONE A TRE PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 17 cm
	F18	FLESSIONE A QUATTRO PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 21 cm
	F19	FLESSIONE A QUATTRO PUNTI	CONTINUA	4 x 4 x 21 cm
	F20	FLESSIONE A QUATTRO PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 21 cm
	F21	FLESSIONE A QUATTRO PUNTI	INTERVALLO	4 x 4 x 21 cm
	F22	FLESSIONE A QUATTRO PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 21 cm
	F23	FLESSIONE A QUATTRO PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 21 cm

	F24	FLESSIONE A QUATTRO PUNTI	+ P4000	4 x 4 x 21 cm
	T1	TRIPLETTA	CONTINUA	4 x 6 x 15 cm
	T2	TRIPLETTA	CONTINUA	4 x 6 x 15 cm
	T3	TRIPLETTA	CONTINUA	4 x 6 x 15 cm
	T4	TRIPLETTA	CONTINUA	4 x 6 x 15 cm
	T5	TRIPLETTA	CONTINUA	4 x 6 x 15 cm
	T6	TRIPLETTA	CONTINUA	4 x 6 x 15 cm
	T7	TRIPLETTA	CONTINUA	4 x 6 x 15 cm
	T8	TRIPLETTA	INTERVALLO	4 x 6 x 15 cm
	T9	TRIPLETTA	INTERVALLO	4 x 6 x 15 cm
	T10	TRIPLETTA	INTERVALLO	4 x 6 x 15 cm
	T11	TRIPLETTA	INTERVALLO	4 x 6 x 15 cm

	T12	TRIPLETTA	INTERVALLO	4 x 6 x 15 cm
	T13	TRIPLETTA	INTERVALLO	4 x 6 x 15 cm
	T14	TRIPLETTA	INTERVALLO	4 x 6 x 15 cm
	T15	TRIPLETTA	+ P4000	4 x 6 x 15 cm
	T16	TRIPLETTA	+ P4000	4 x 6 x 15 cm
	T17	TRIPLETTA	+ P4000	4 x 6 x 15 cm
	T18	TRIPLETTA	+ P4000	4 x 6 x 15 cm
	T19	TRIPLETTA	+ P4000	4 x 6 x 15 cm
	T20	TRIPLETTA	+ P4000	4 x 6 x 15 cm

Tab. 4.1 – Elenco completo dei provini realizzati durante la ricerca

4.1.1. Test a Compressione

I test a compressione sono stati realizzati seguendo le indicazioni della normativa EN UNI 12390-3. Come indicato nel design delle prove, ai singoli provini sono stati applicati strain-gauges su due delle quattro facce libere dei cubi. I test sono stati eseguiti in controllo di forza (100 N/s) e i dati estrapolati sono stati riassunti, per ogni singolo provino, in tre schede contenenti:

- Scheda 1: presenta il diagramma di forza-spostamento: la curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

- Scheda 2: presenta il diagramma di forza-deformazione di tutti i sensori: la curva ha come asse delle ascisse la deformazione degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) calcolata dai dati raccolti dagli strain-gauges. Come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN). Il grafico è diviso in due quadranti per indagare le sollecitazioni degli strain-gauges sollecitati a compressione e trazione.
- Scheda 3: presenta il diagramma di forza-deformazione (media): la curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

Ai diagrammi seguono anche le foto raccolte prima del test e dopo il test che evidenziano i collassi dei provini. Di seguito sono esposti tutti i provini testati: K1 e K2 con stampa continua, K3 e K4 con intervallo temporale, K5 e K6 con l'aggiunta della malta additivata.

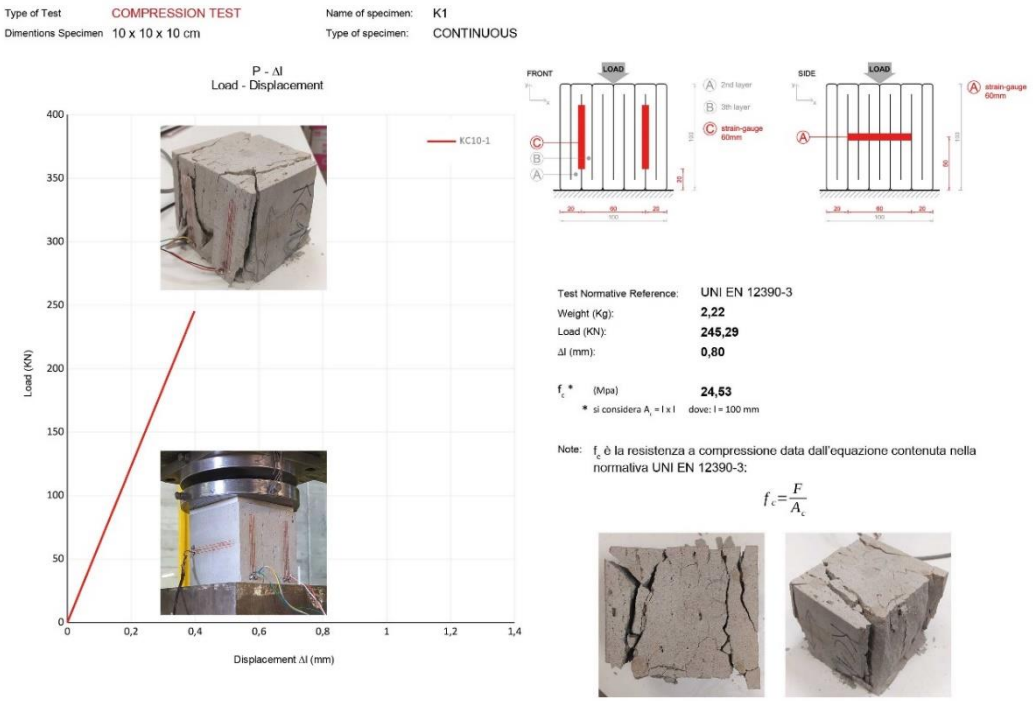


Fig. 4.1.1.1 – Provino K1 – Scheda 1

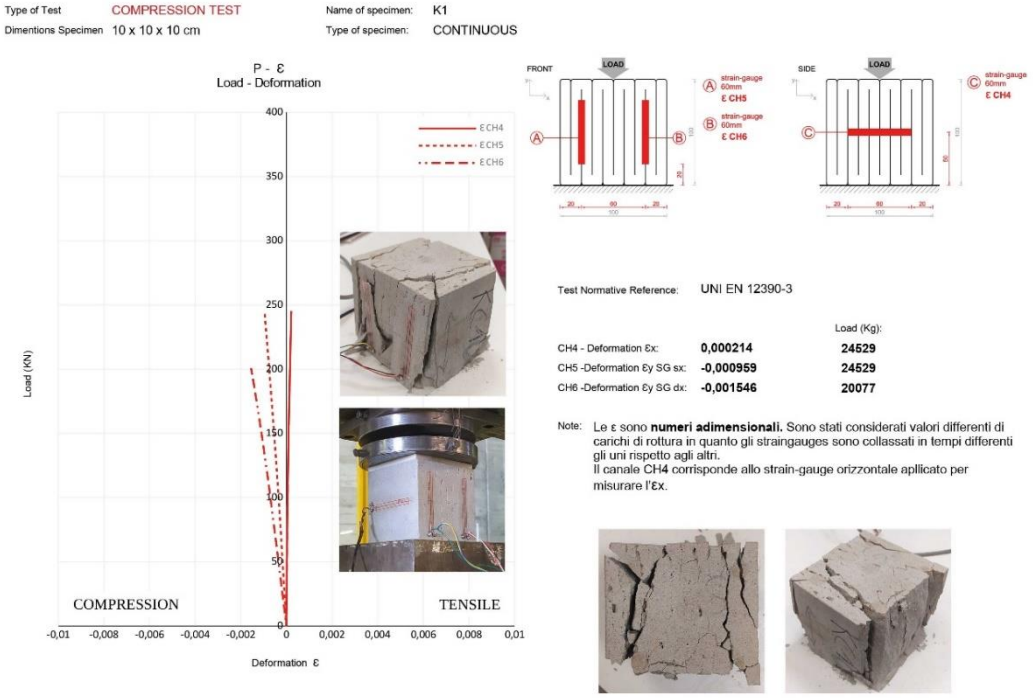


Fig. 4.1.1.2 – Provino K1 – Scheda 2

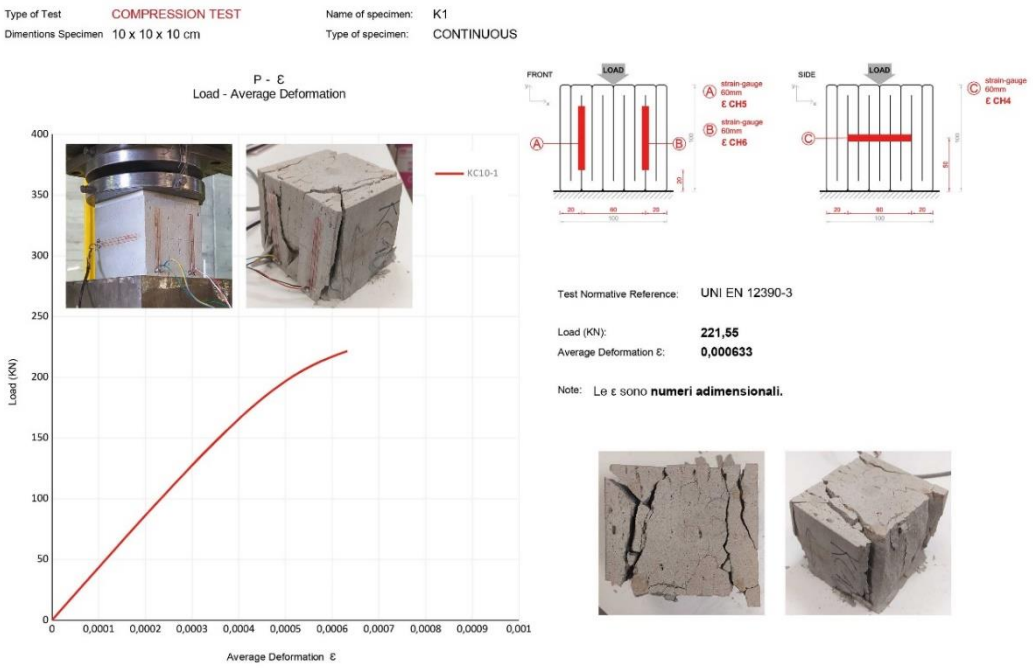


Fig. 4.1.1.3 – Provino K1 – Scheda 3

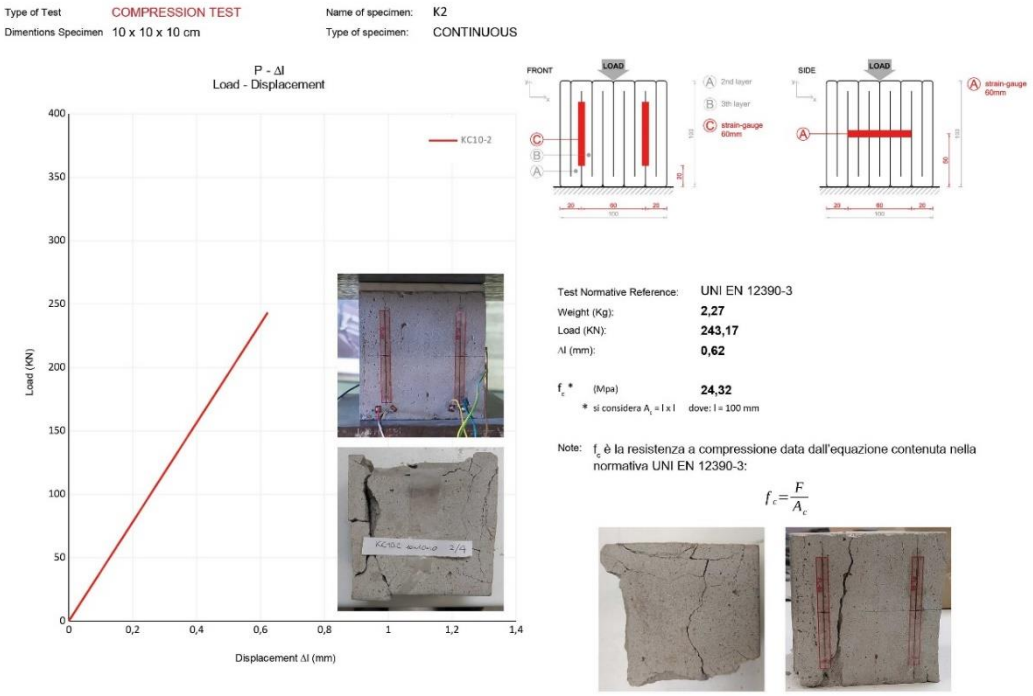


Fig. 4.1.1.4 – Provino K2 – Scheda 1

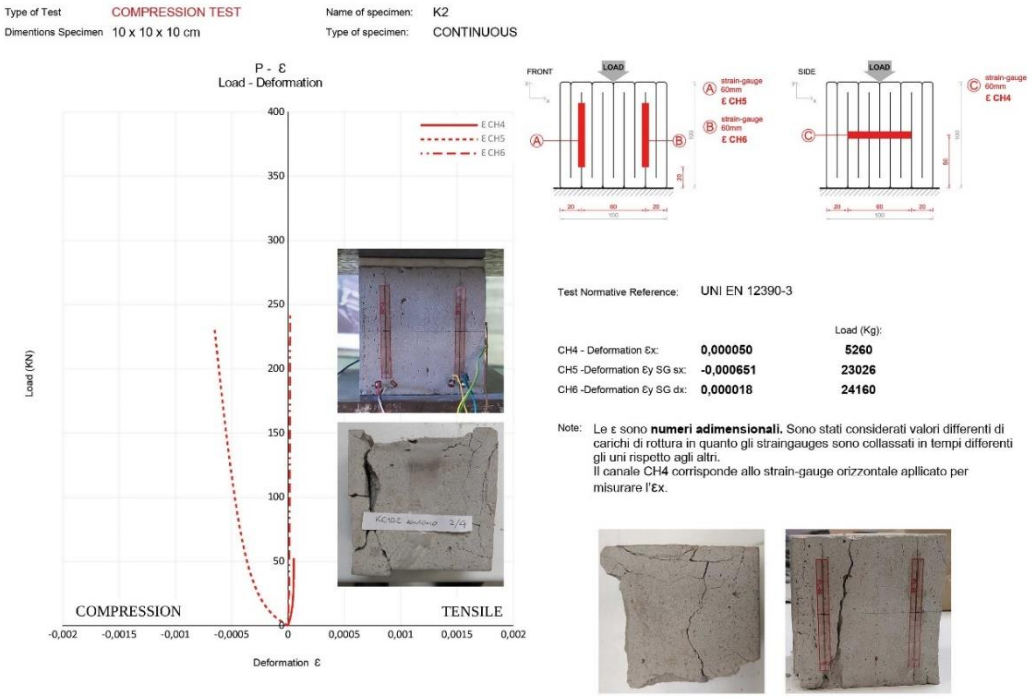


Fig. 4.1.1.5 – Provino K2 – Scheda 2



Fig. 4.1.1.6 – Provino K2 – Scheda 3

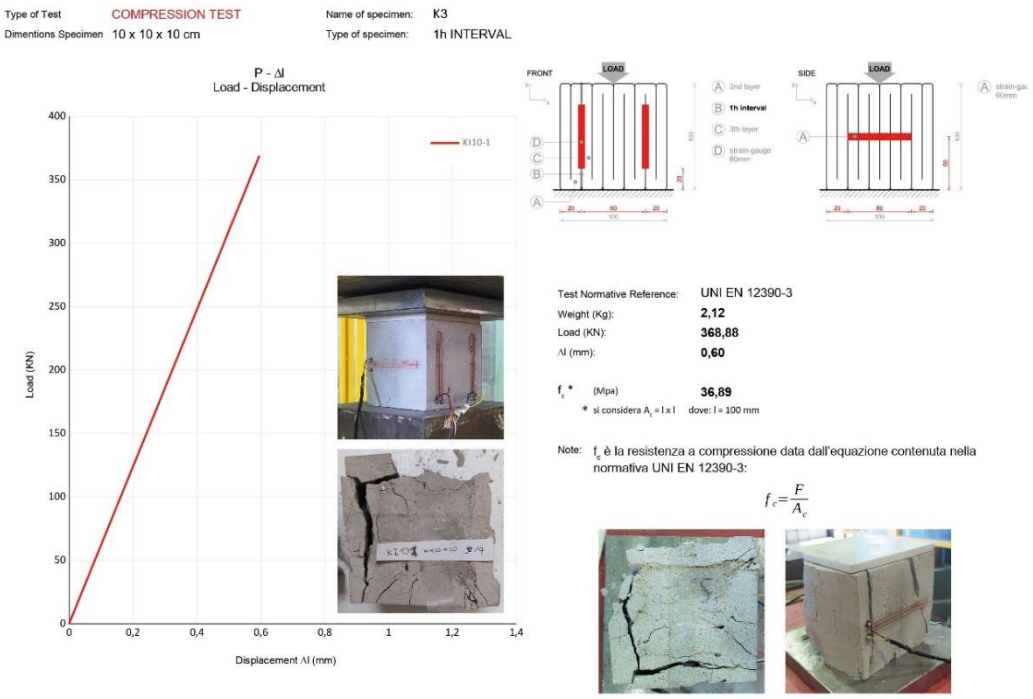


Fig. 4.1.1.7 – Provino K3 – Scheda 1

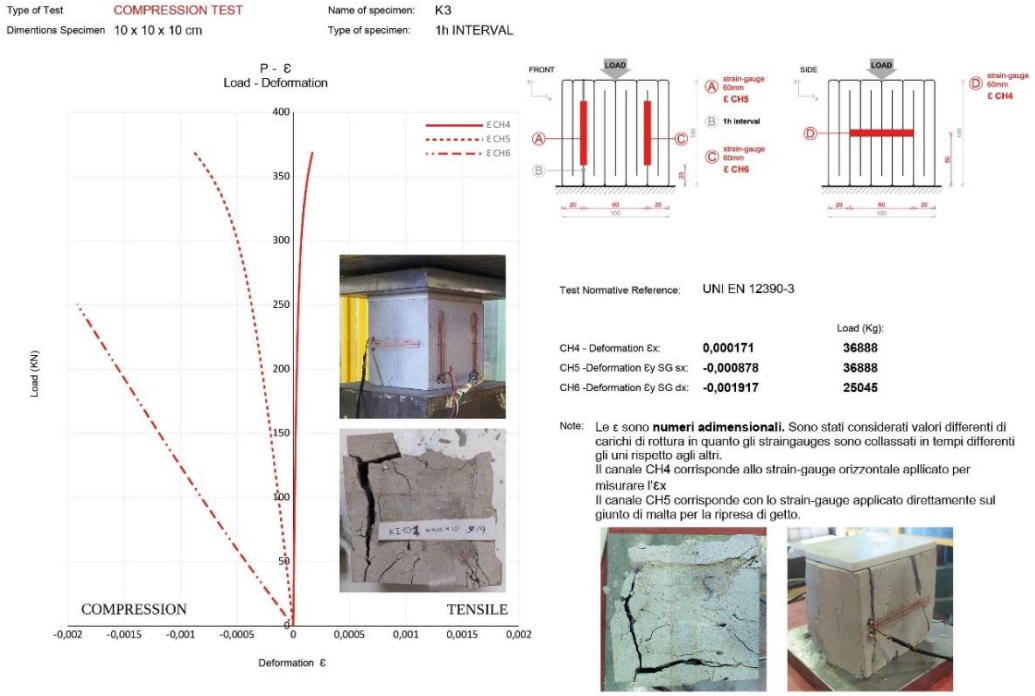


Fig. 4.1.1.8 – Provino K3 – Scheda 2

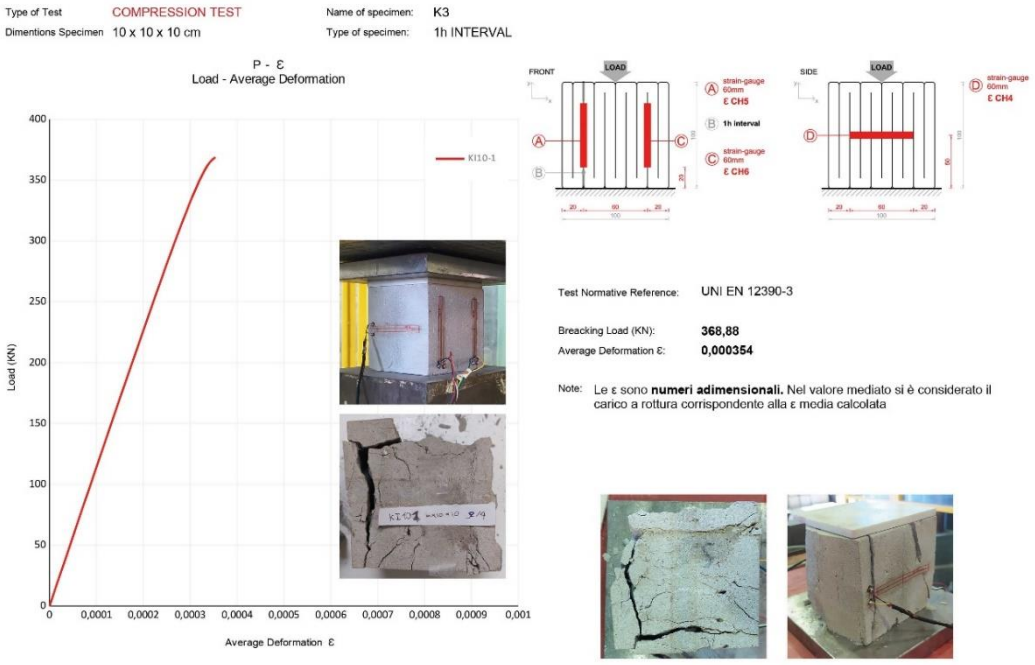


Fig. 4.1.1.9 – Provino K3 – Scheda 3

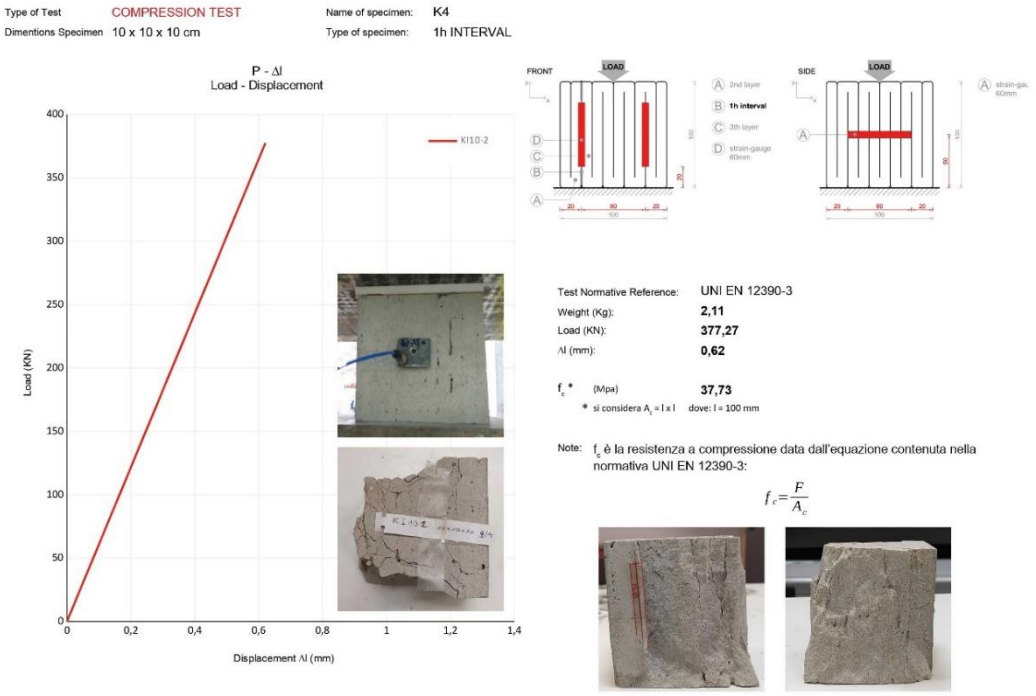


Fig. 4.1.1.10 – Provino K4 – Scheda 1

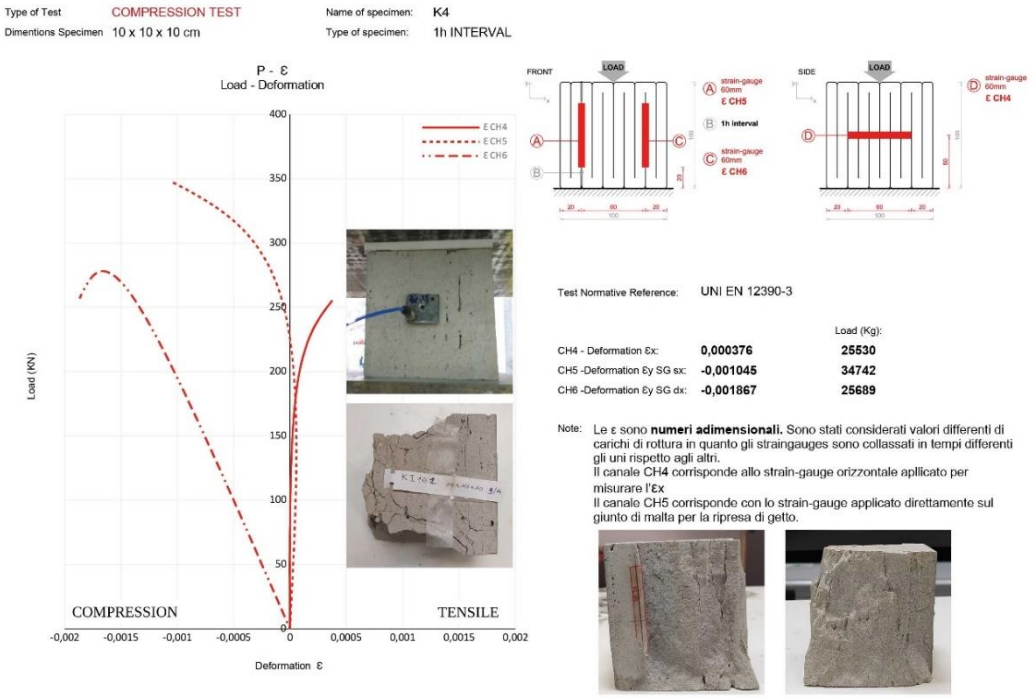


Fig. 4.1.1.11 – Provino K4 – Scheda 2

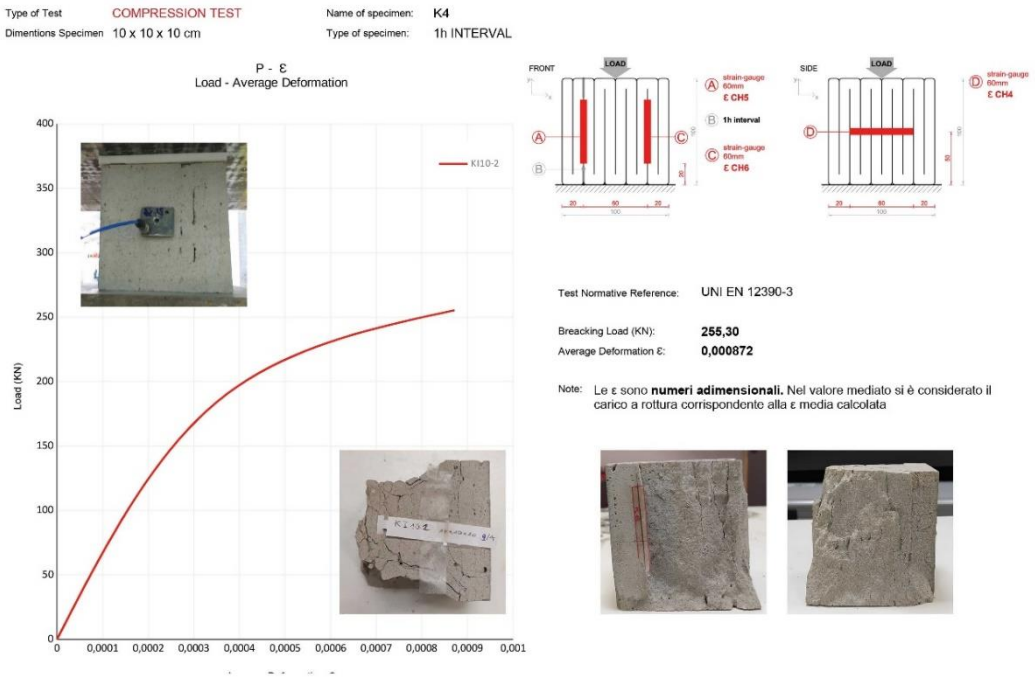


Fig. 4.1.1.12 – Provino K4 – Scheda 3

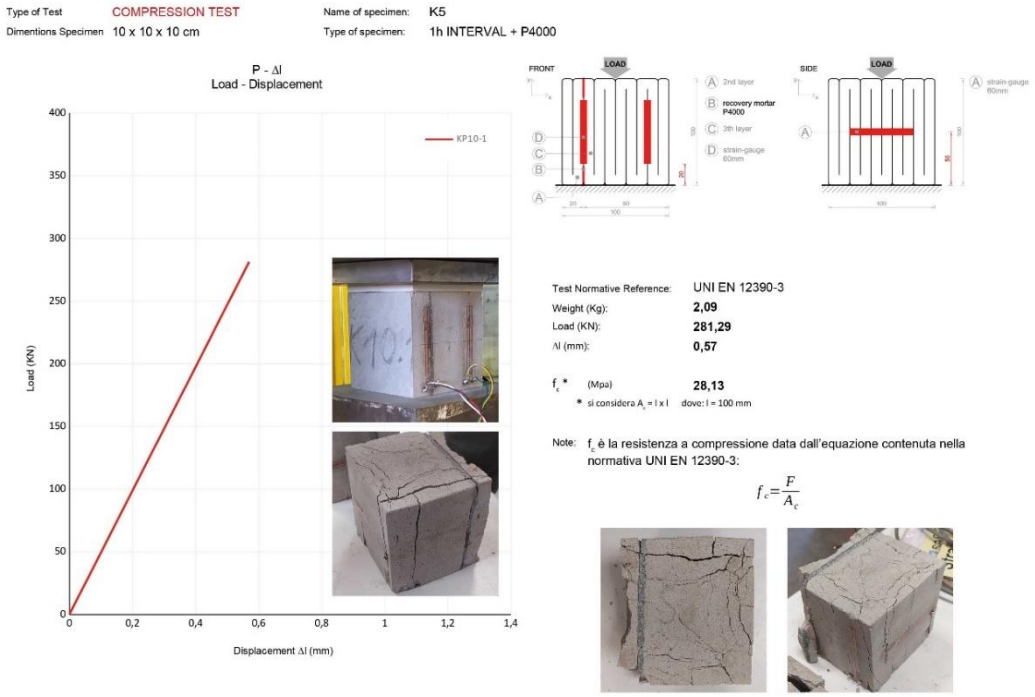


Fig. 4.1.1.13 – Provino K5 – Scheda 1

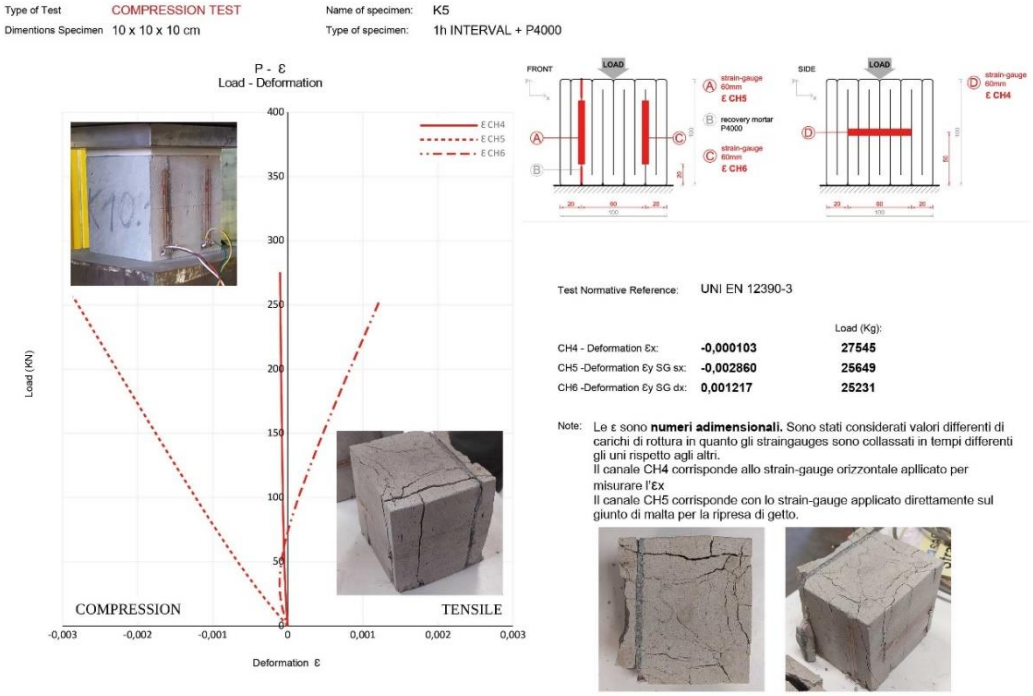


Fig. 4.1.1.14 – Provino K5 – Scheda 2

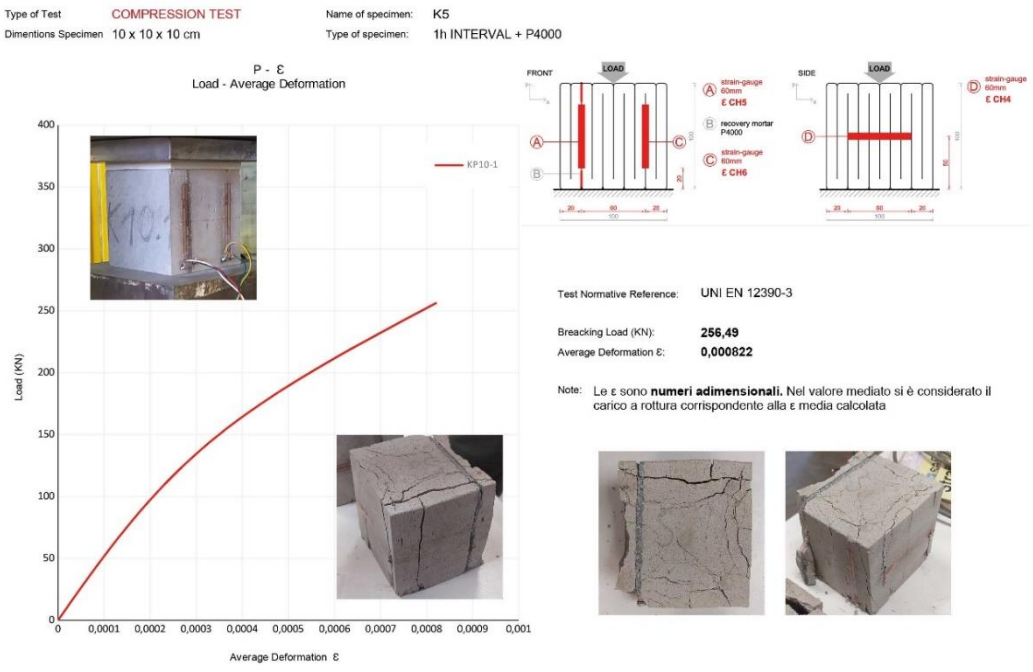


Fig. 4.1.1.15 – Provino K5 – Scheda 3

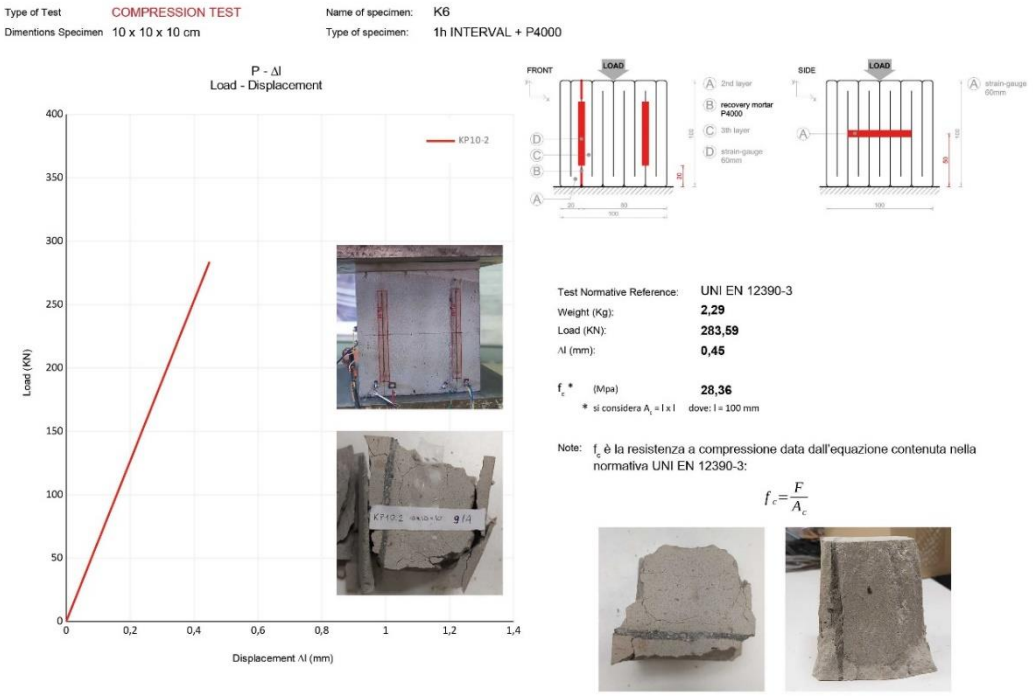


Fig. 4.1.1.16 – Provino K6 – Scheda 1

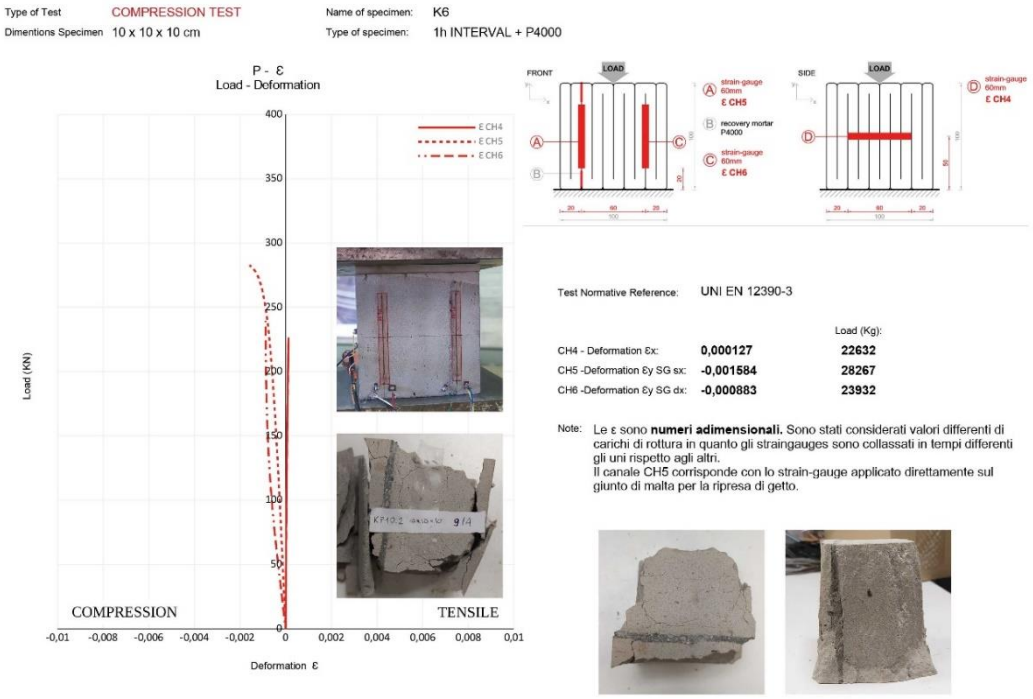


Fig. 4.1.1.17 – Provino K6 – Scheda 2



Fig. 4.1.1.18 – Provino K6 – Scheda 3

I dati rappresentati nelle precedenti schede sono riassunti nei seguenti due grafici in cui:

- Fig.4.1.1.19: riassume i diagrammi di forza-spostamento di tutti i provini testati. In ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e nelle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).
- Fig.4.1.1.19: riassume i diagrammi di forza-deformazione media di tutti i provini testati. In ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e nelle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

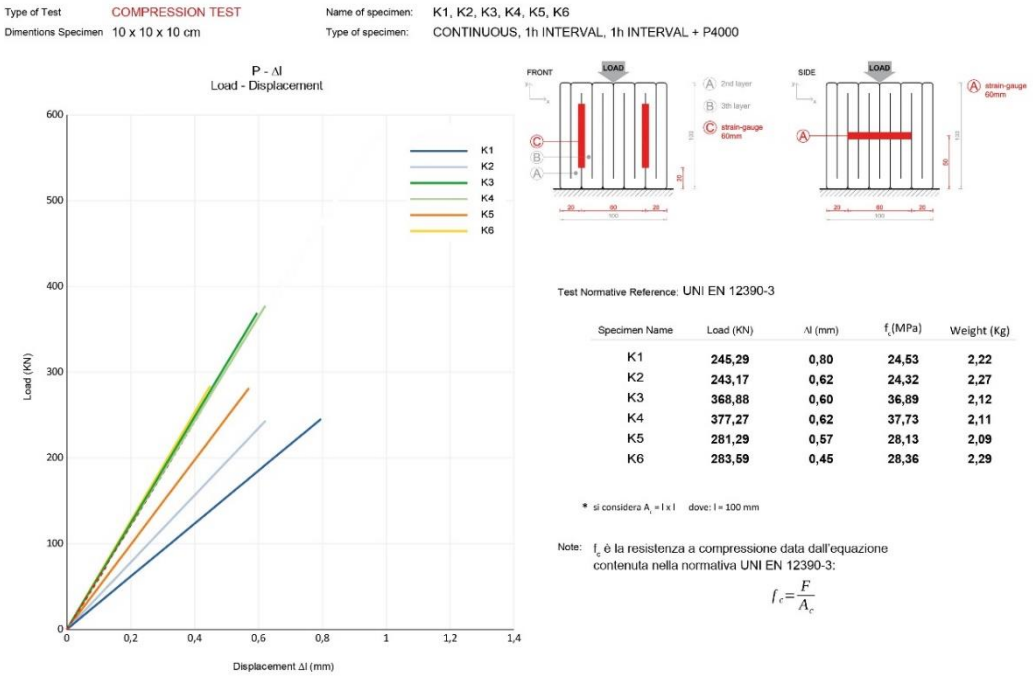


Fig. 4.1.1.19 – Grafico Carico-Spostamento dei test a compressione su provini cubici 10x10x10 cm

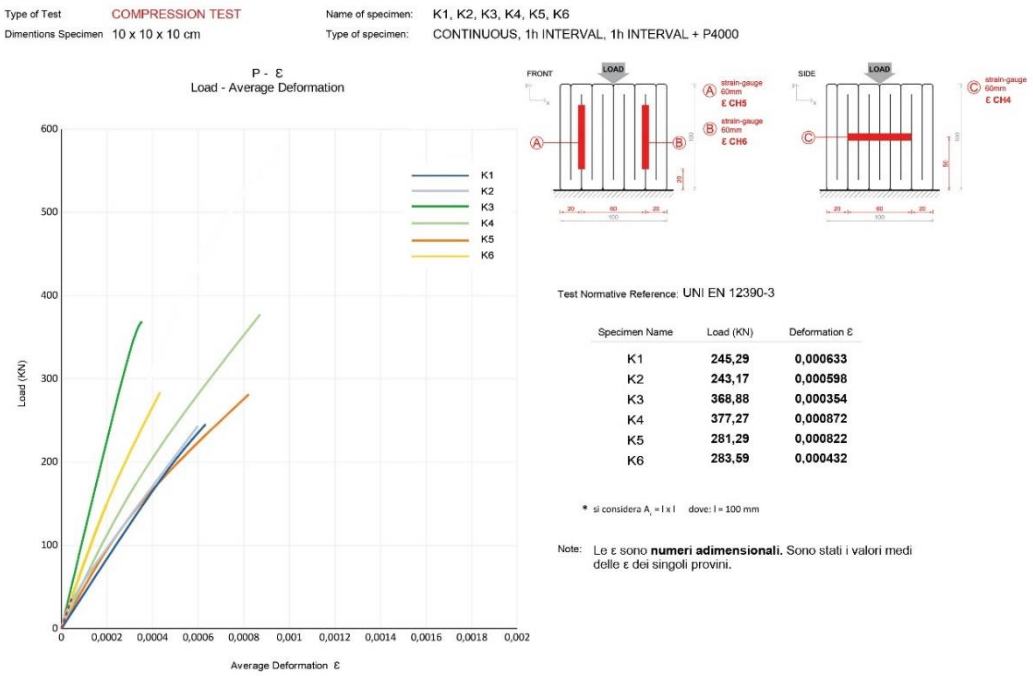


Fig. 4.1.1.20 – Grafico Forza-Deformazione media dei test a compressione su provini cubici 10x10x10 cm

I valori ottenuti sono bassi ma si possono dire soddisfacenti se riferiti all'orientamento del carico a cui sono sottoposti. Tutti e sei i campioni hanno la direzione del carico parallela alla direzione dei layer. (Biranchi, 2017) Questi dati e la modalità di collasso dei provini sono in linea con quanto indicato dalla normativa.
I meccanismi di collasso registrati nelle prove di compressione sono soddisfacenti se comparati con studi più recenti (Yu et al. 2021). Va sottolineato che le fessure in tutti e sei i cubi seguono l'andamento della stampa. Nello specifico possiamo riassumere:
Analizzando la resistenza alla compressione, il provino K1 è collassato ad un valore inferiore del 33% rispetto al provino K3 e del 13% inferiore al provino K5. i provini. Nei test a compressione, l'energia di frattura più alta calcolata è del provino K3 il quale ha un valore superiore dello 26% all'energia di frattura del provino K1. Questa differenza è data dalla maggiore rigidità e dalla minore porosità del provino K3. La differenza invece è minima tra l'energia di frattura del provino con stampa continua e del provino con malta per la ripresa di getto. Nello specifico: $G_{f\,K1}$ è maggiore della $G_{f\,K5}$ del 9%. Comparando i valori ricavati da studi recenti (Yu et al. 2021) con quelli ottenuti da questo studio, i risultati sono inferiori del 50% in quanto la direzione del carico è parallela alla direzione di stampa, la porosità e le dimensioni sono diverse.

4.1.2. Test a Flessione su tre punti

I test a flessione su tre punti sono stati realizzati seguendo le indicazioni della normativa EN UNI 12390-5 e come ampiante descritto nel paragrafo precedente, i provini si suddividono in due categorie: quelli lunghi 9 cm e 17 cm. Come indicato nel design delle prove, ai singoli provini sono stati applicati strain-gauges sula base del provino e i test sono stati eseguiti in controllo di forza (50 N/s) (Liu, 2023). I dati estrapolati sono stati riassunti per ogni singolo provino, in due schede contenenti:

- scheda 1: rappresenta il diagramma di forza-spostamento dove la curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda 2: rappresenta il diagramma di forza-deformazione: la curva ha come asse delle ascisse la deformazione dello strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) calcolata dai dati raccolti dagli strain-gauges e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

Ai diagrammi seguono anche le foto raccolte prima del test e dopo il test che evidenziano i collassi dei provini.
Di seguito sono esposti tutti i provini testati: dal F1 al F3 e dal F10 al F12 con stampa continua, dal F4 al F6 e dal F 13 al F15 con intervallo temporale e dal F7 al F9 e F16, F17 con l'aggiunta della malta additivata.

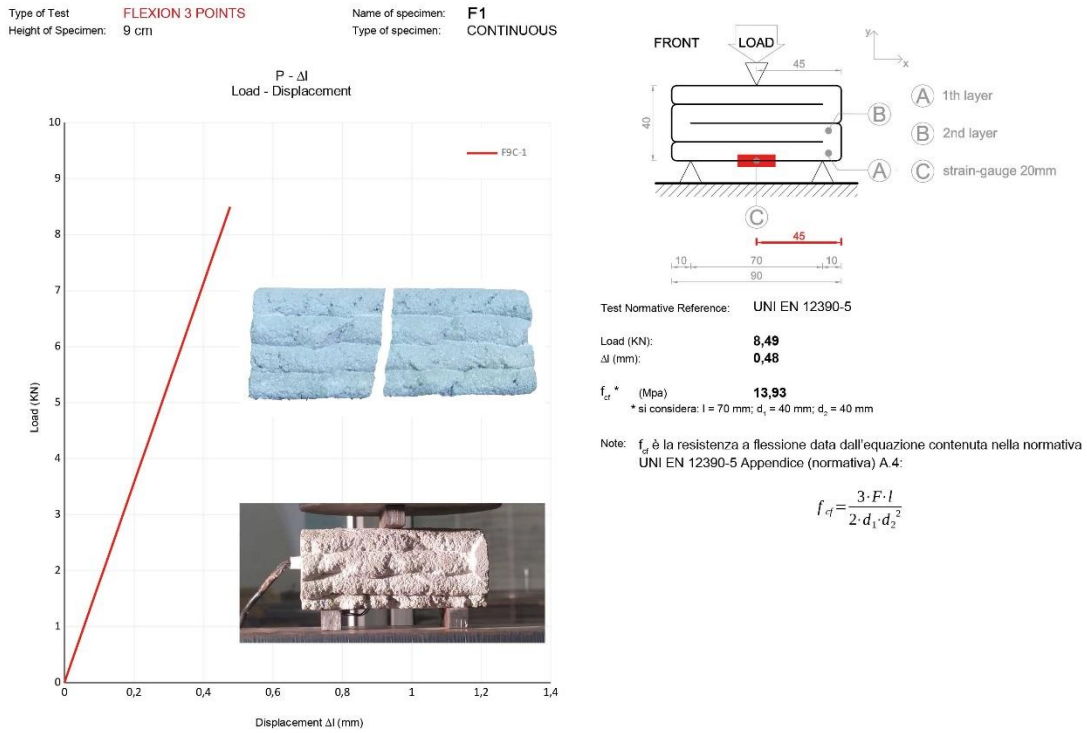


Fig. 4.1.2.1 – Provino F1 – Scheda 1

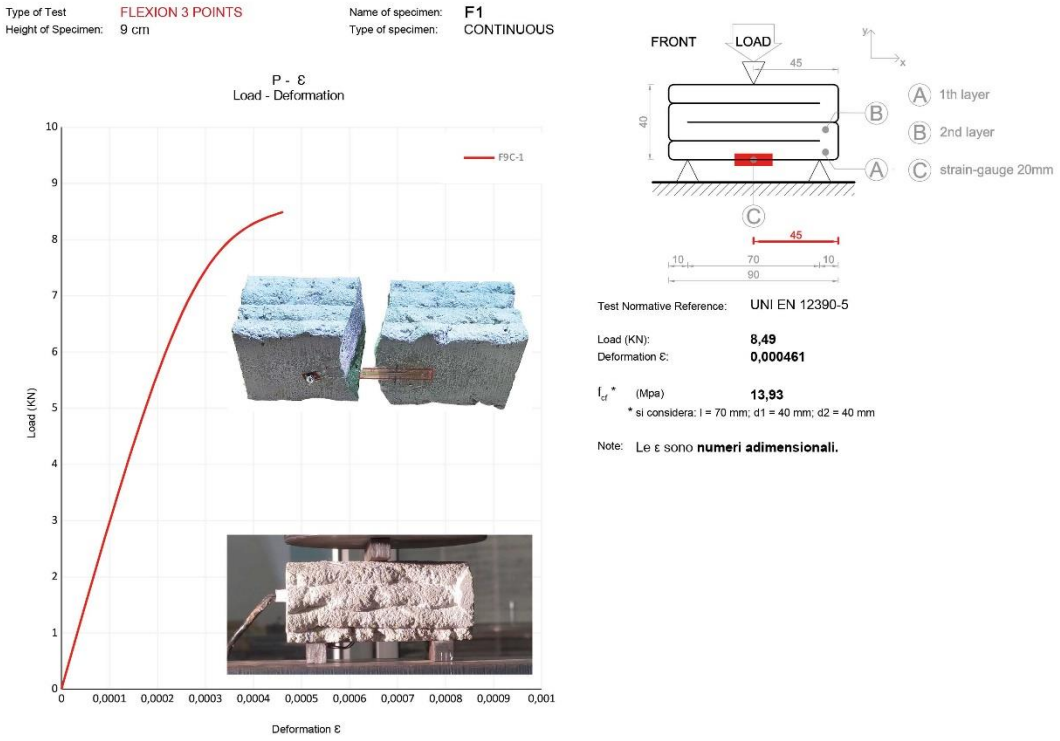


Fig. 4.1.2.2 – Provino F1 – Scheda 2

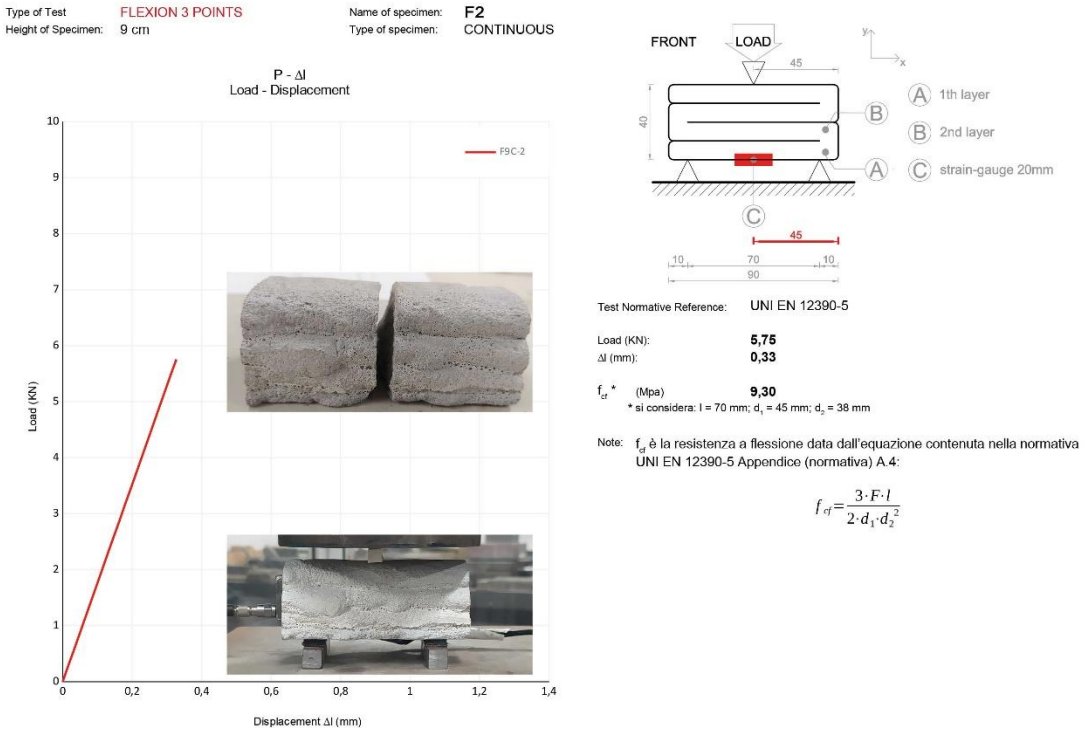


Fig. 4.1.2.3 – Provino F2 – Scheda 1

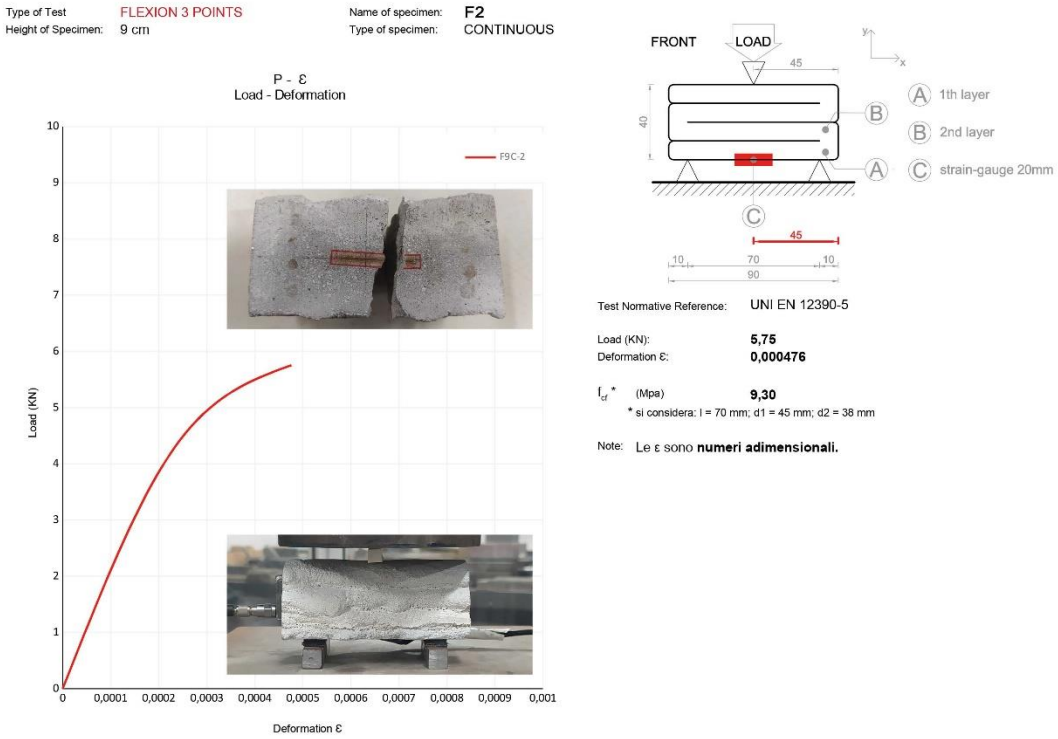


Fig. 4.1.2.4 – Provino F2 – Scheda 2

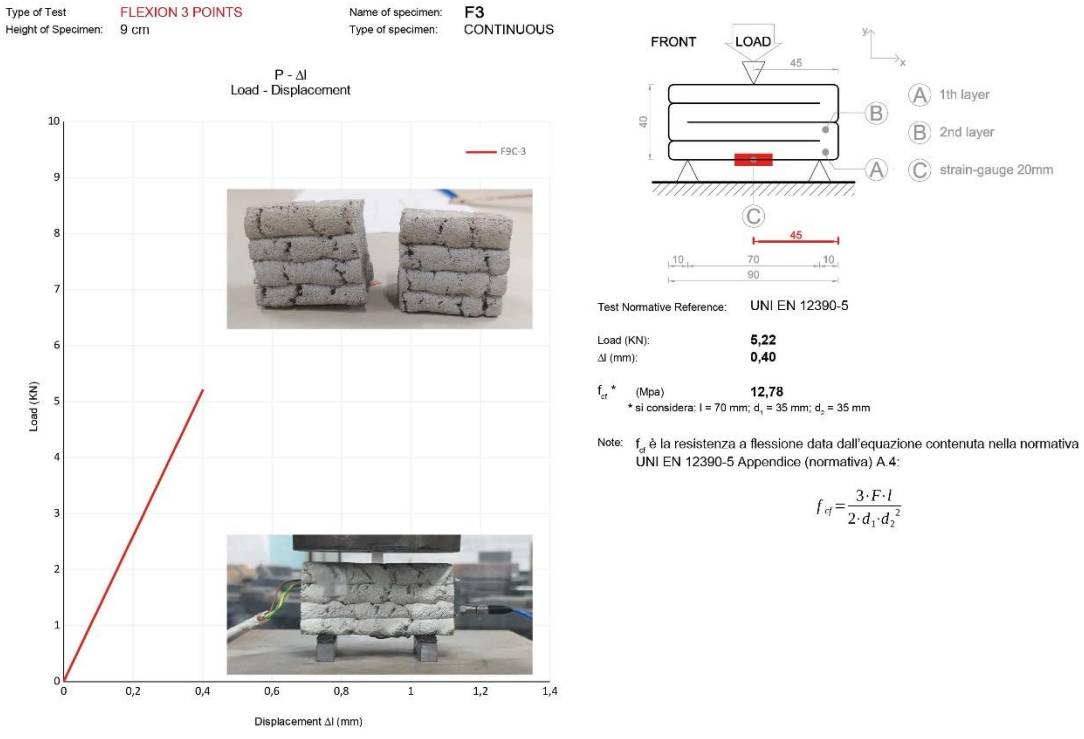


Fig. 4.1.2.5 – Provino F3 – Scheda 1

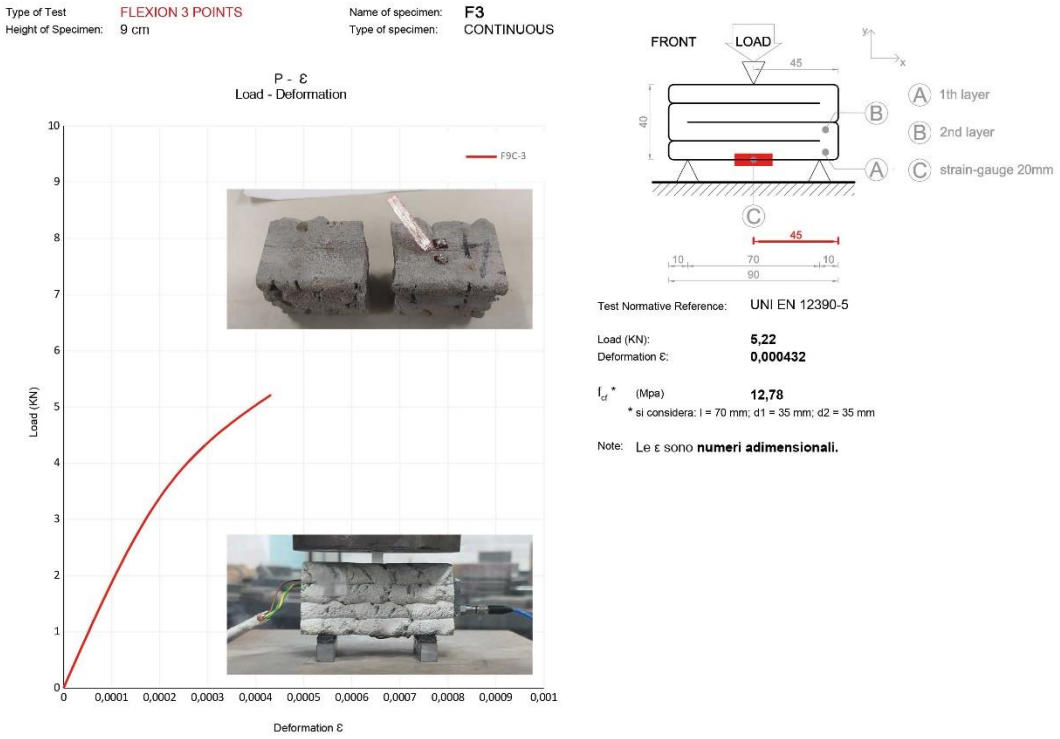


Fig. 4.1.2.6 – Provino F3 – Scheda 2

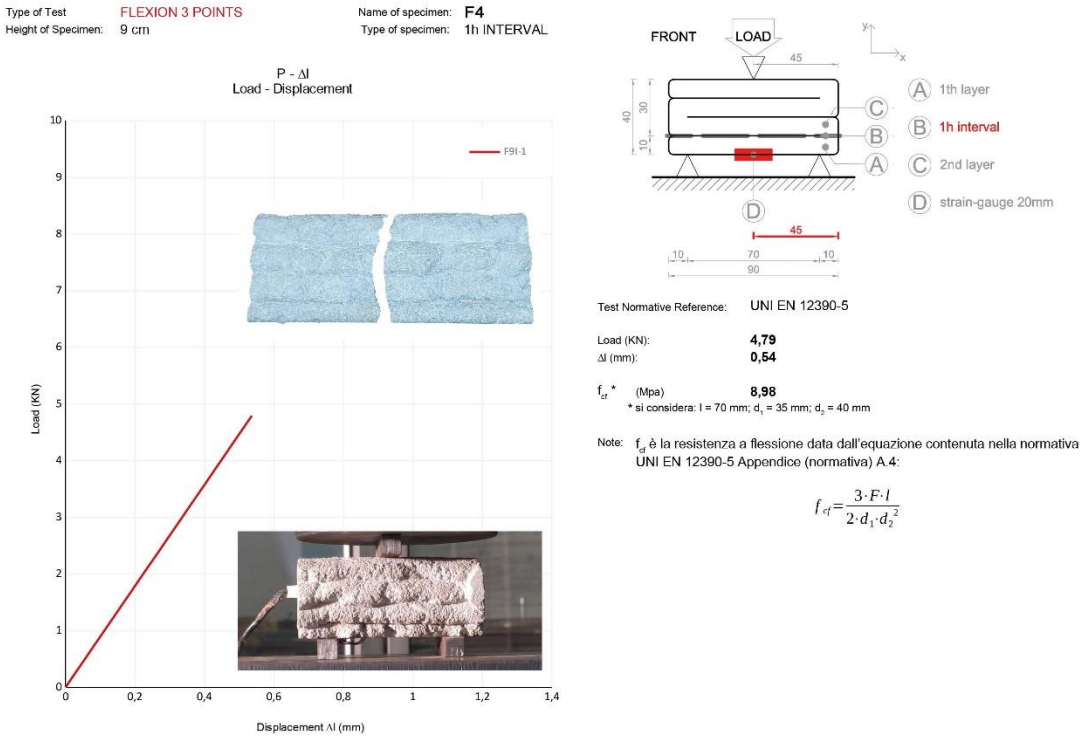


Fig. 4.1.2.7 – Provino F4 – Scheda 1

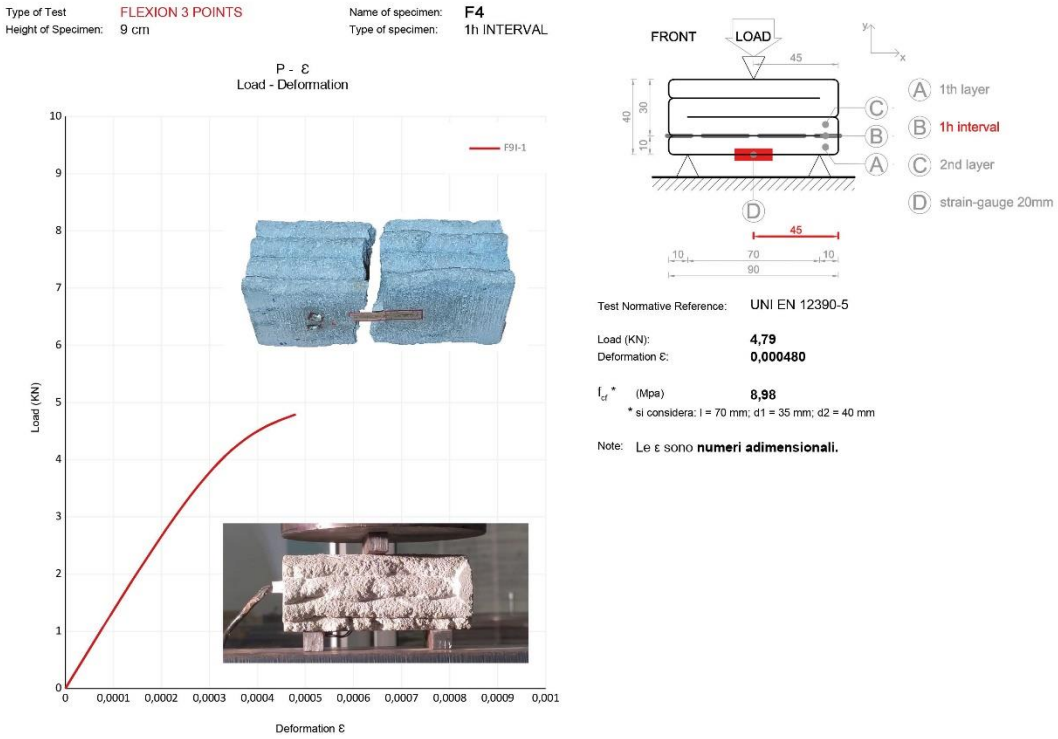


Fig. 4.1.2.8 – Provino F4 – Scheda 2

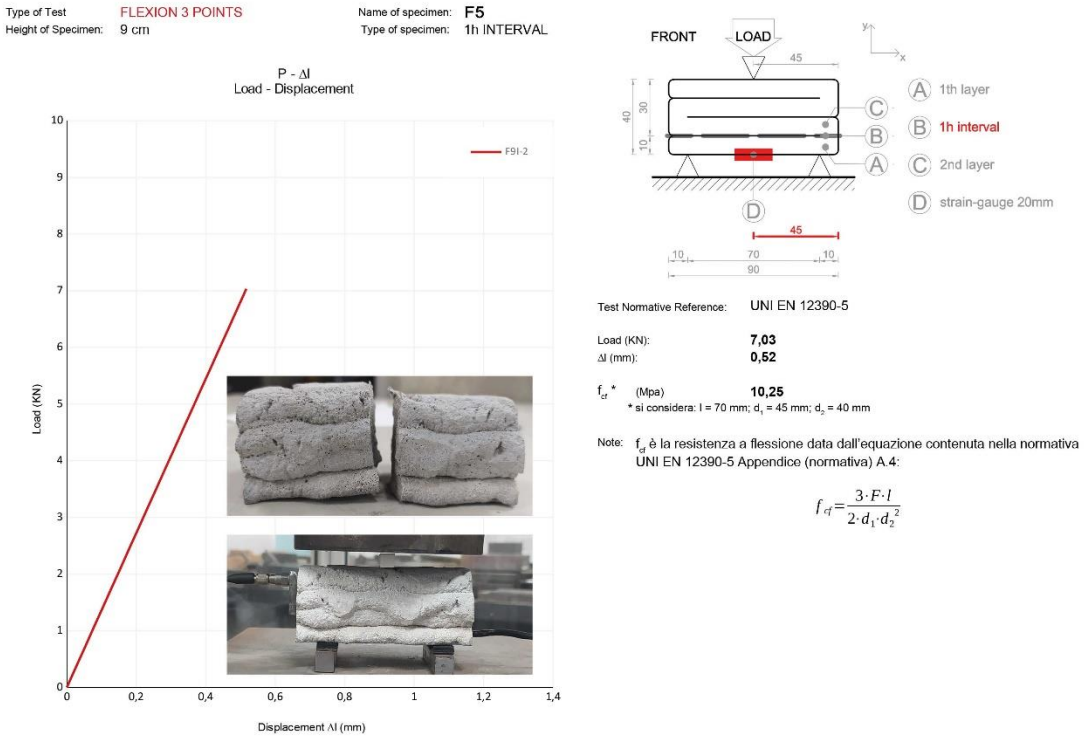


Fig. 4.1.2.9 – Provino F5 – Scheda 1

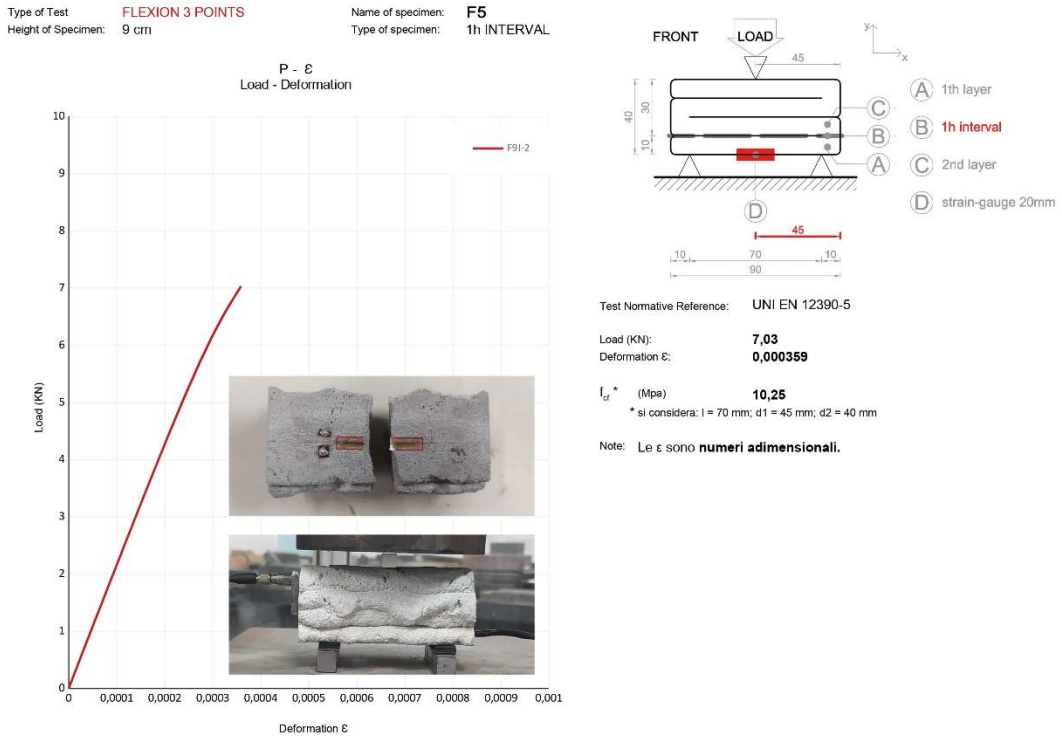


Fig. 4.1.2.10 – Provino F5 – Scheda 2

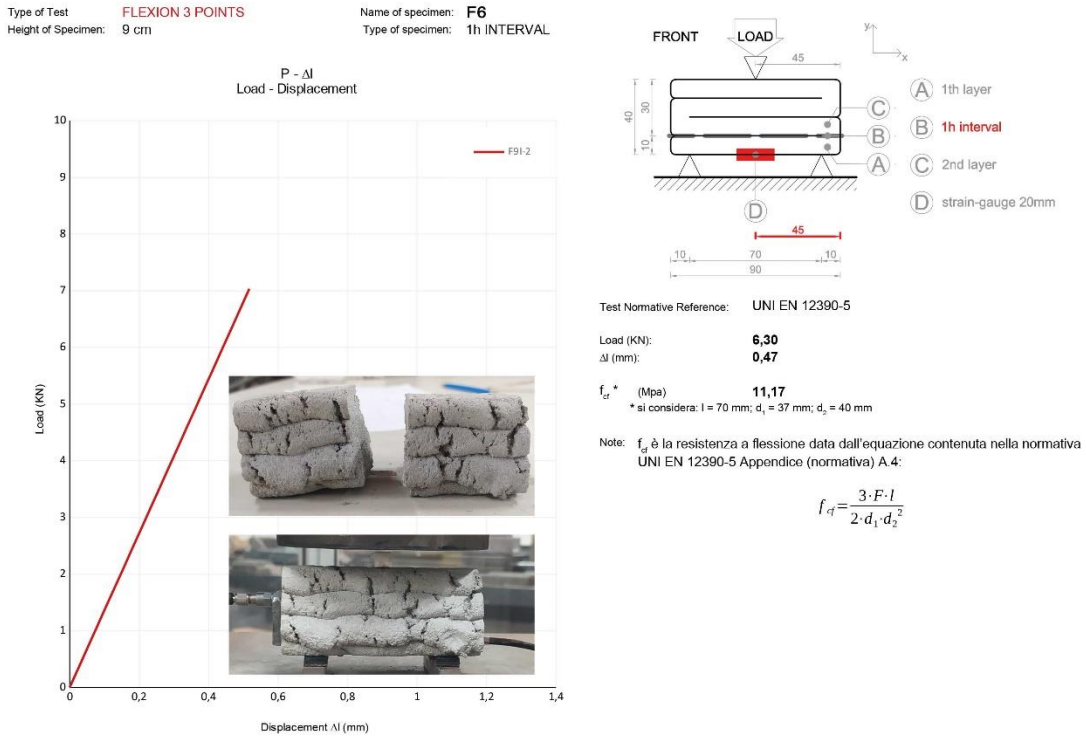


Fig. 4.1.2.11 – Provino F6 – Scheda 1



Fig. 4.1.2.12 – Provino F6 – Scheda 2

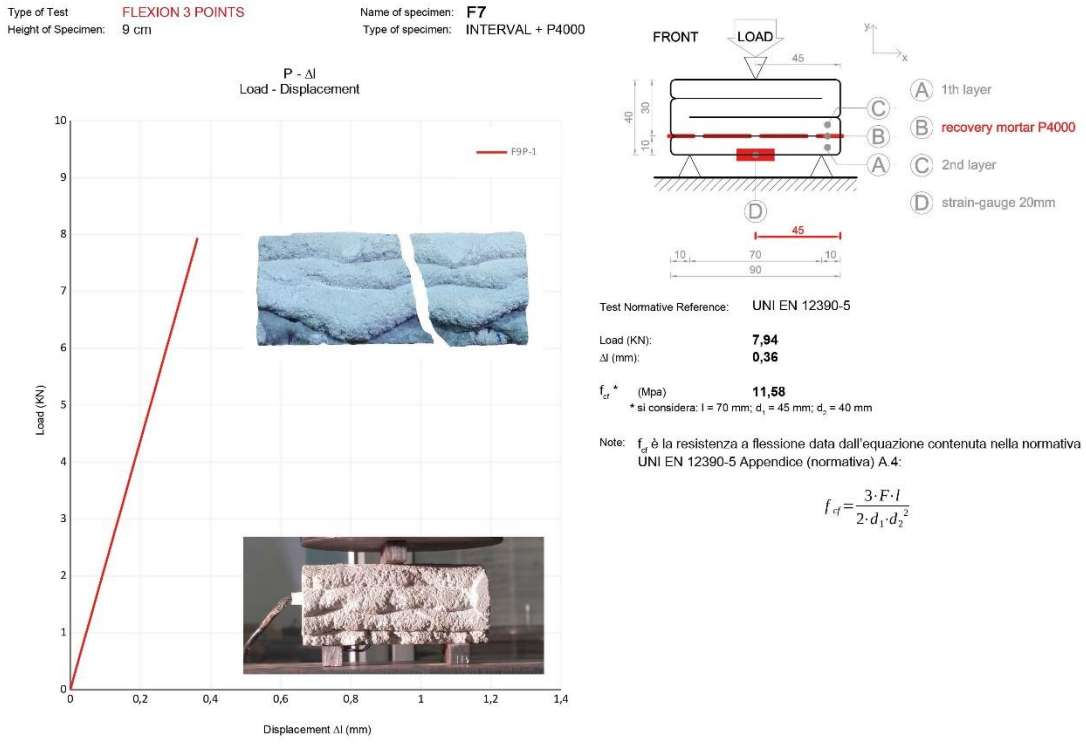


Fig. 4.1.2.13 – Provino F7 – Scheda 1

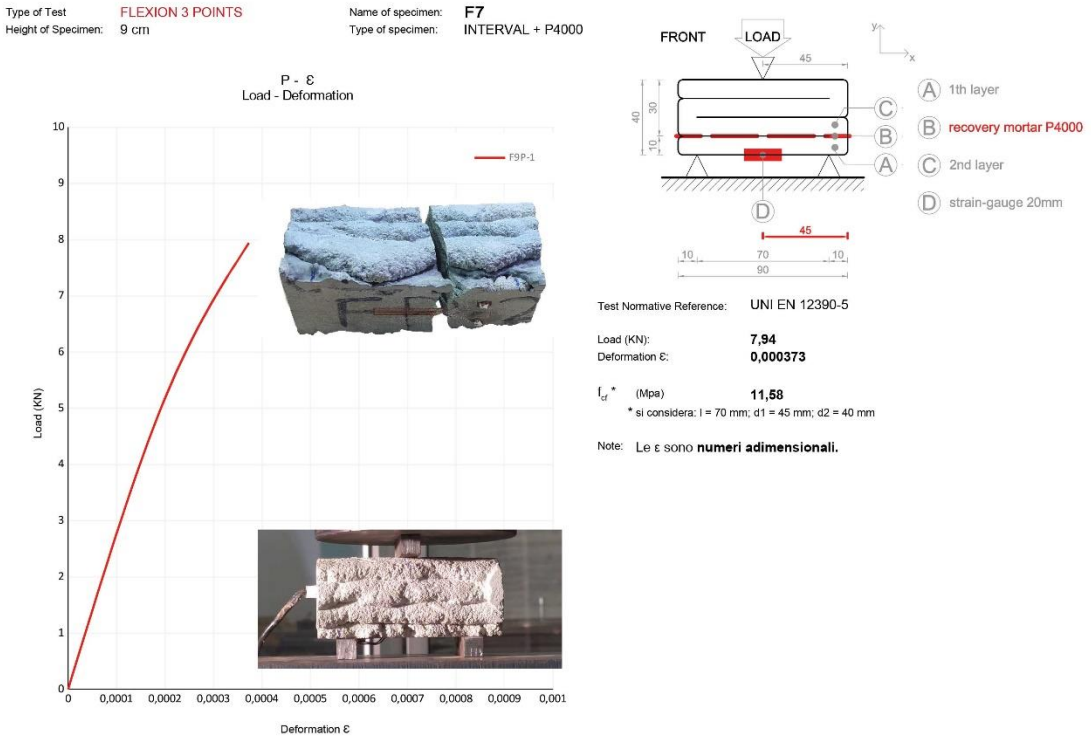


Fig. 4.1.2.14 – Provino F7 – Scheda 2

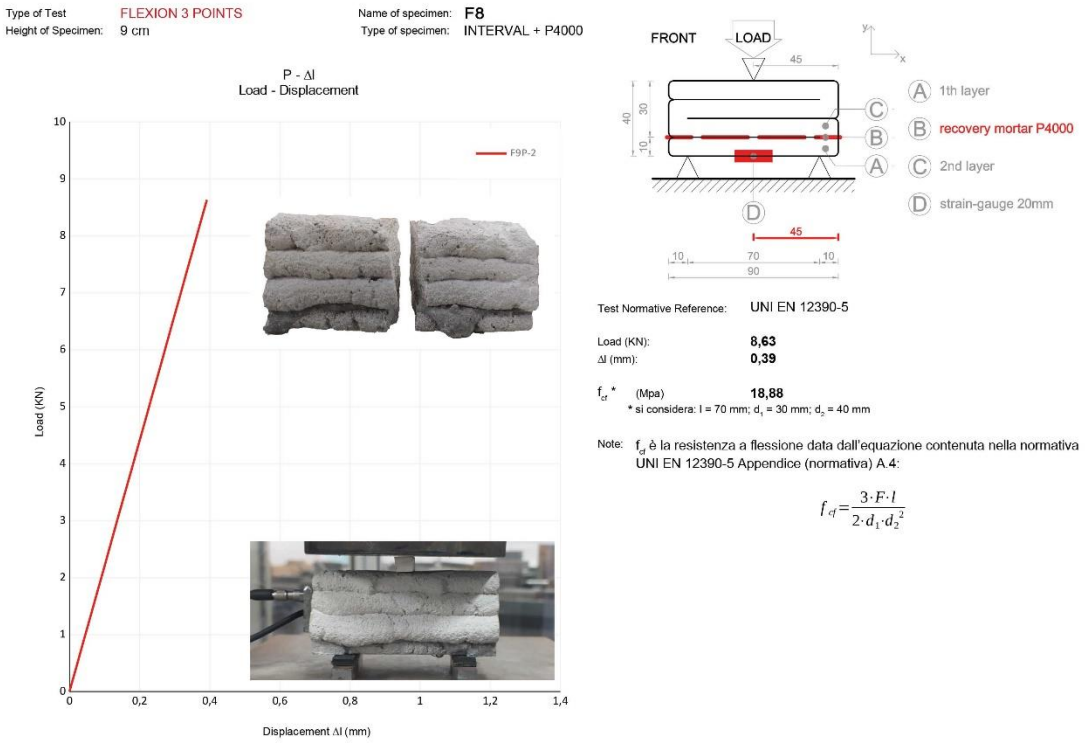


Fig. 4.1.2.15 – Provino F8 – Scheda 1

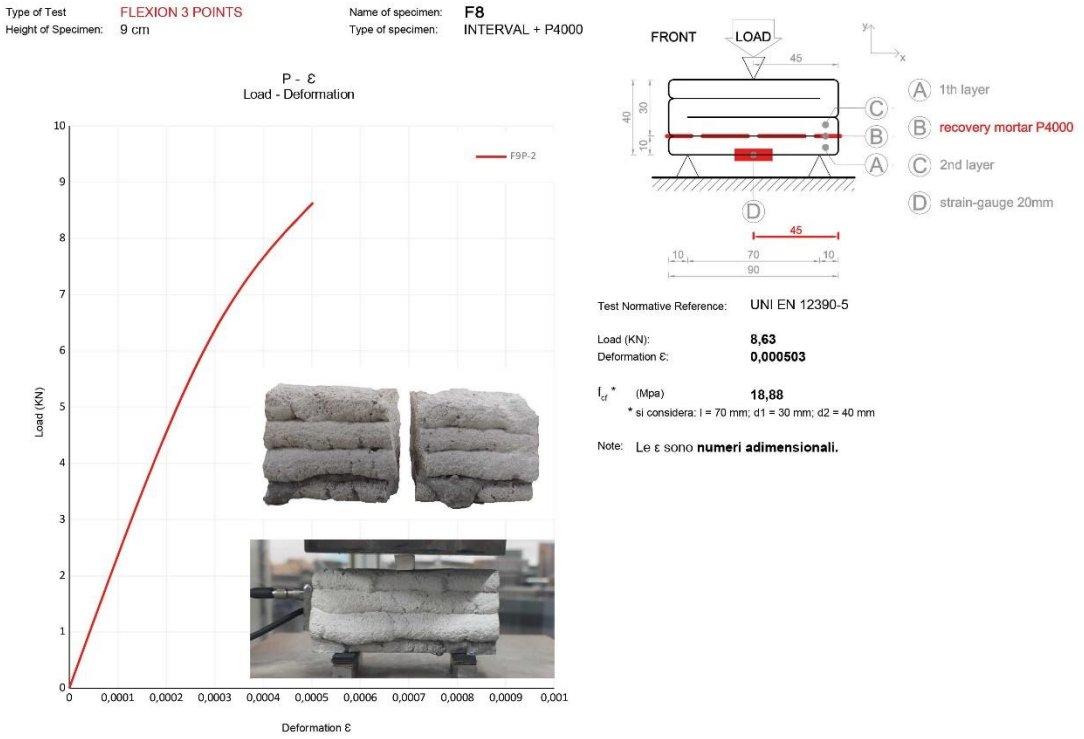


Fig. 4.1.2.16 – Provino F8 – Scheda 2

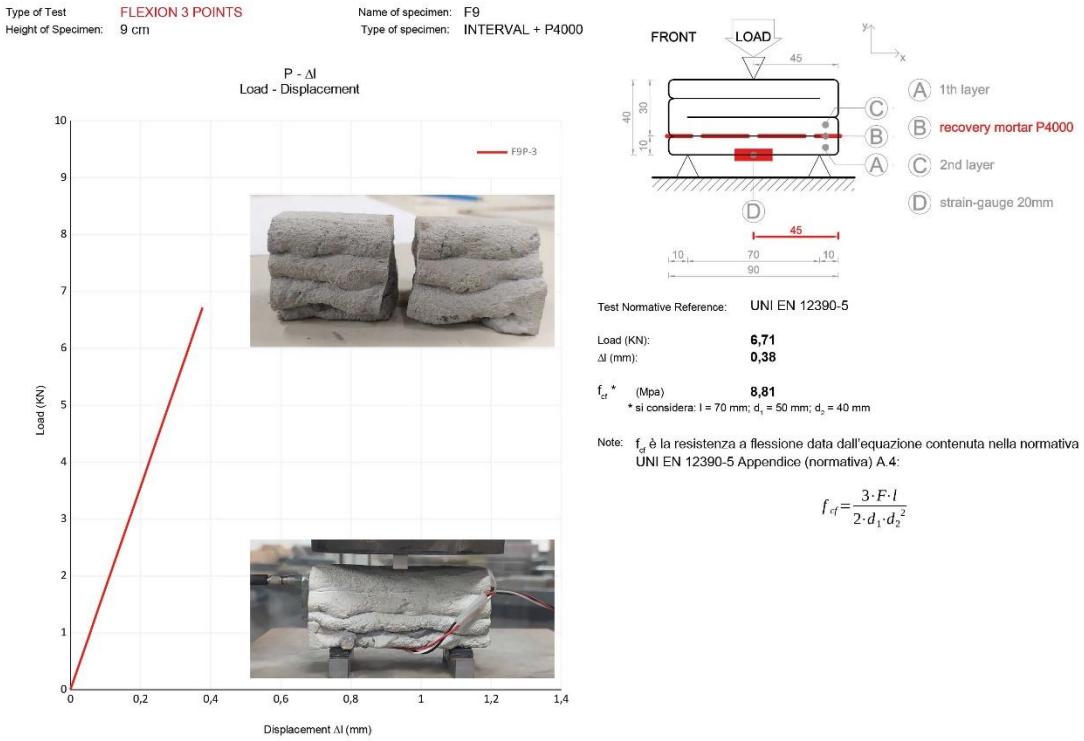


Fig. 4.1.2.17 – Provino F9 – Scheda 1

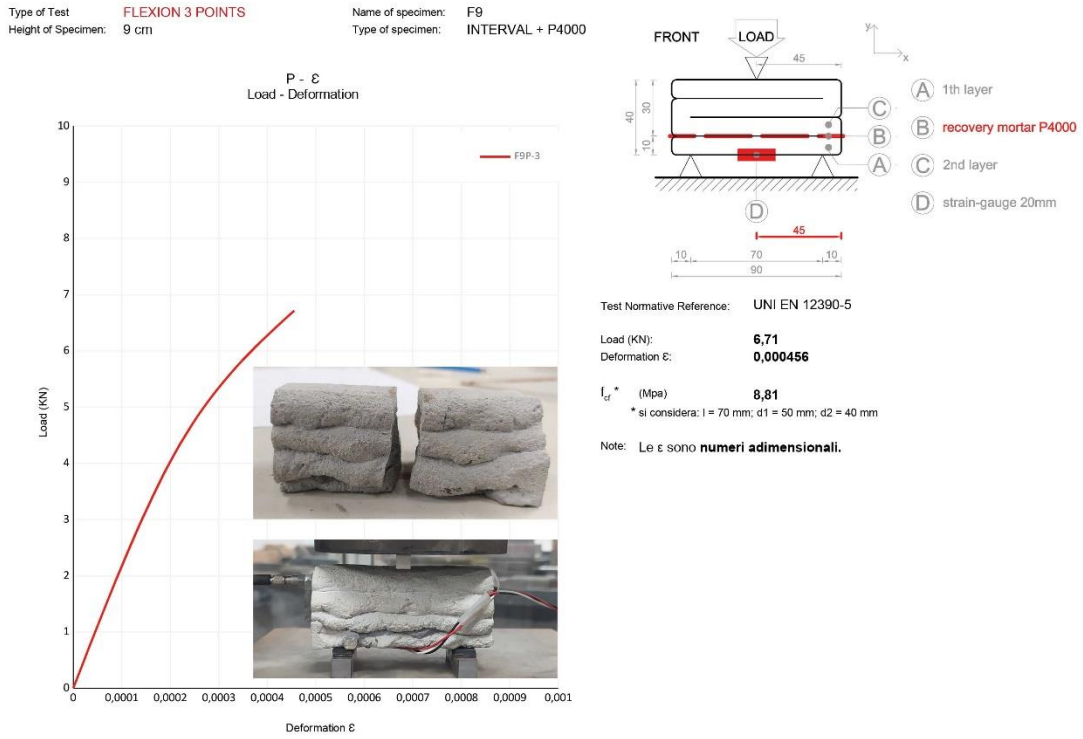


Fig. 4.1.2.18 – Provino F9 – Scheda 2

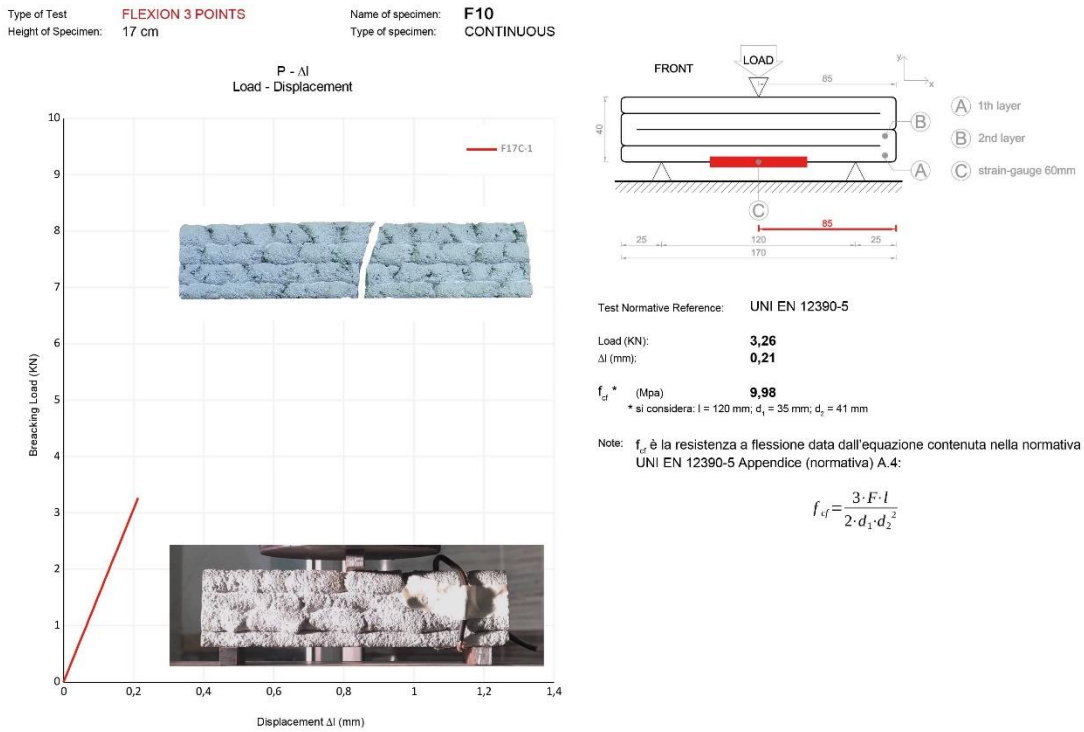


Fig. 4.1.2.19 – Provino F10 – Scheda 1

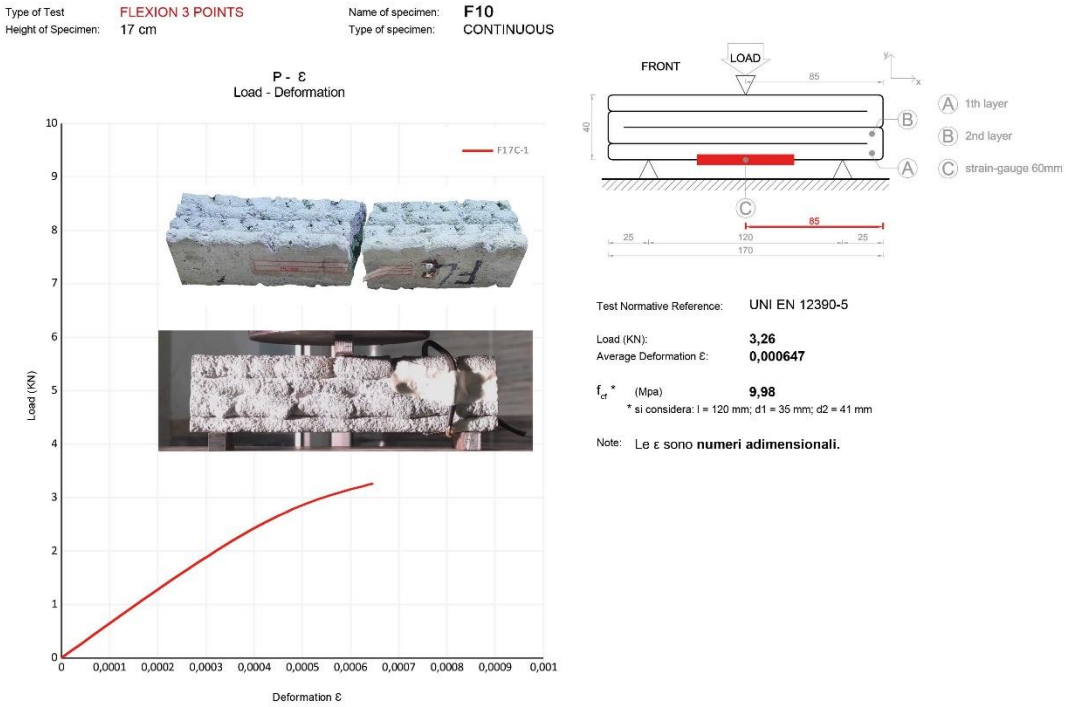


Fig. 4.1.2.20 – Provino F10 – Scheda 2

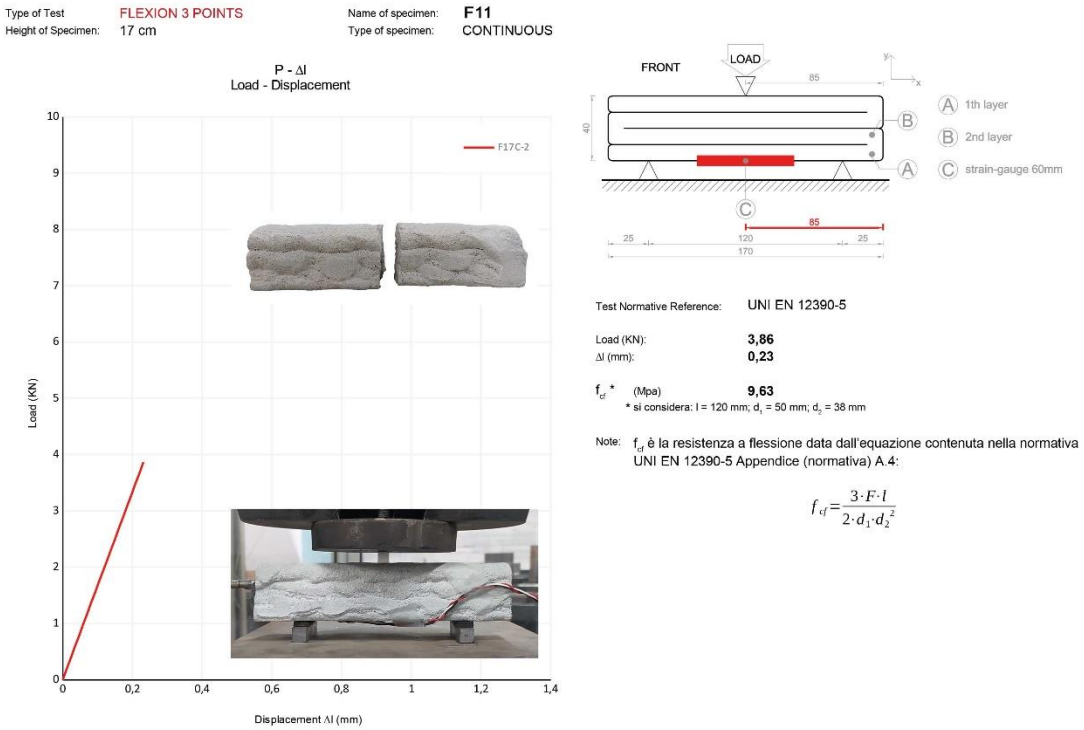


Fig. 4.1.2.21 – Provino F11 – Scheda 1

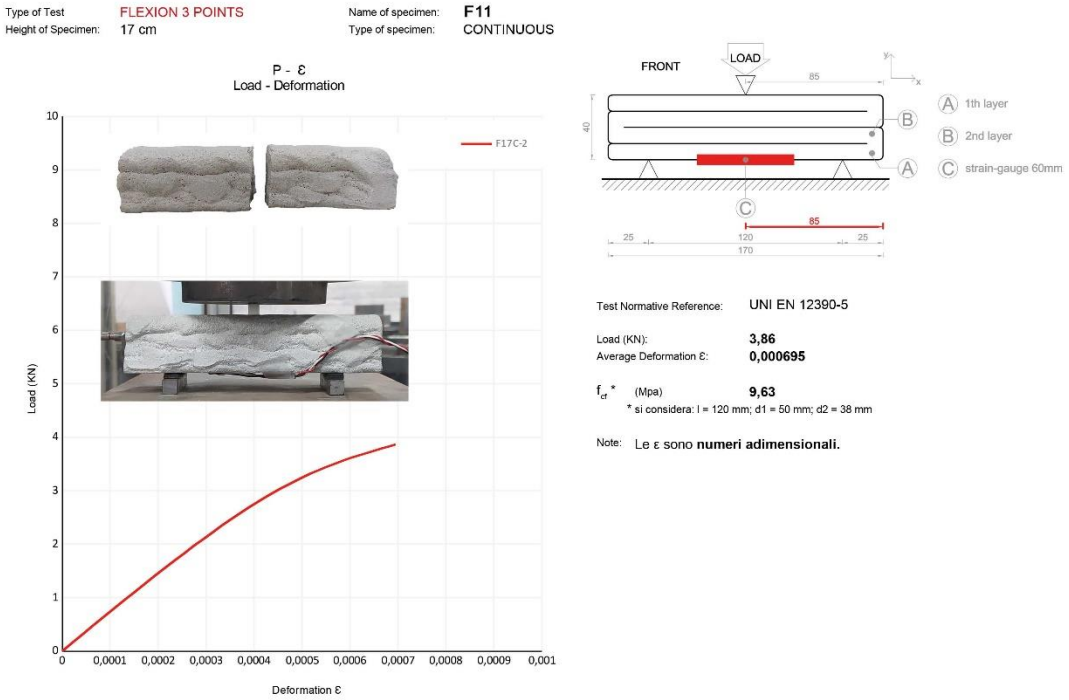


Fig. 4.1.2.22 – Provino F11 – Scheda 2

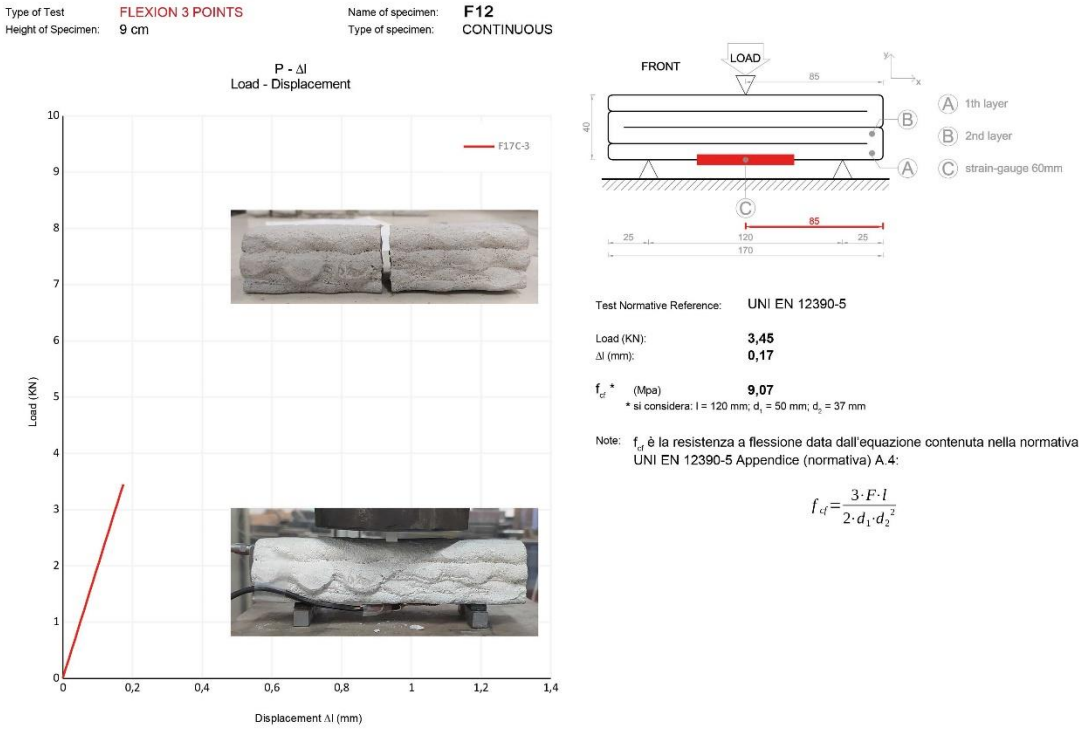


Fig. 4.1.2.23 – Provino F12 – Scheda 1



Fig. 4.1.2.24 – Provino F12 – Scheda 2

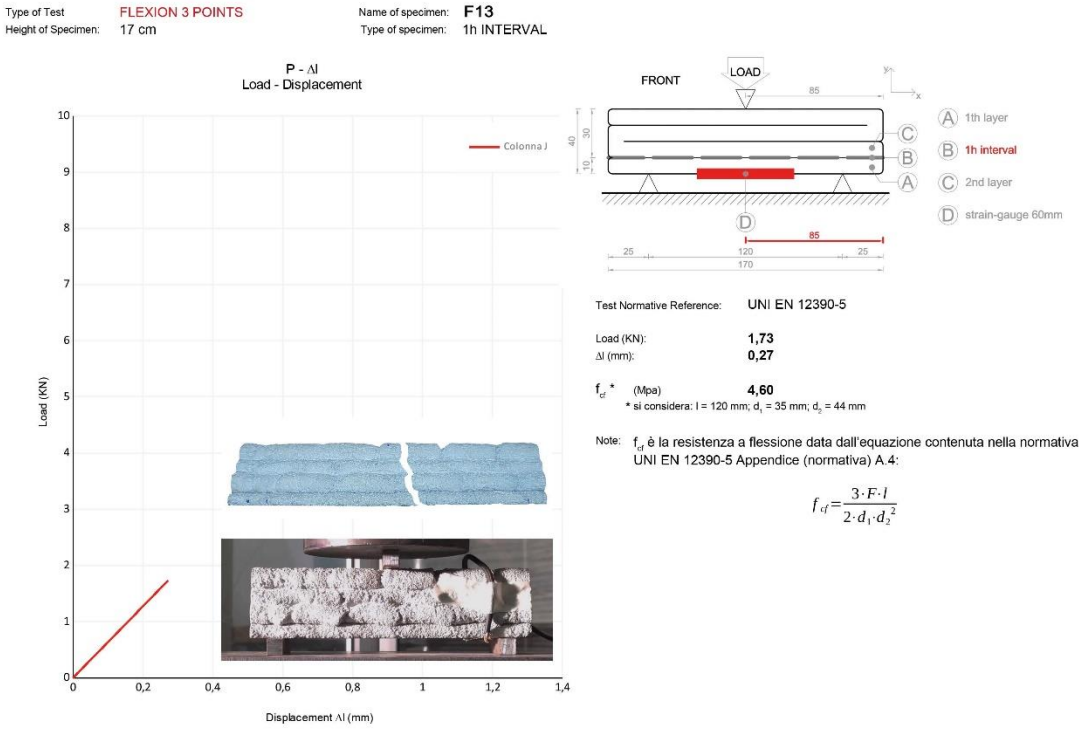


Fig. 4.1.2.25 – Provino F13 – Scheda 1

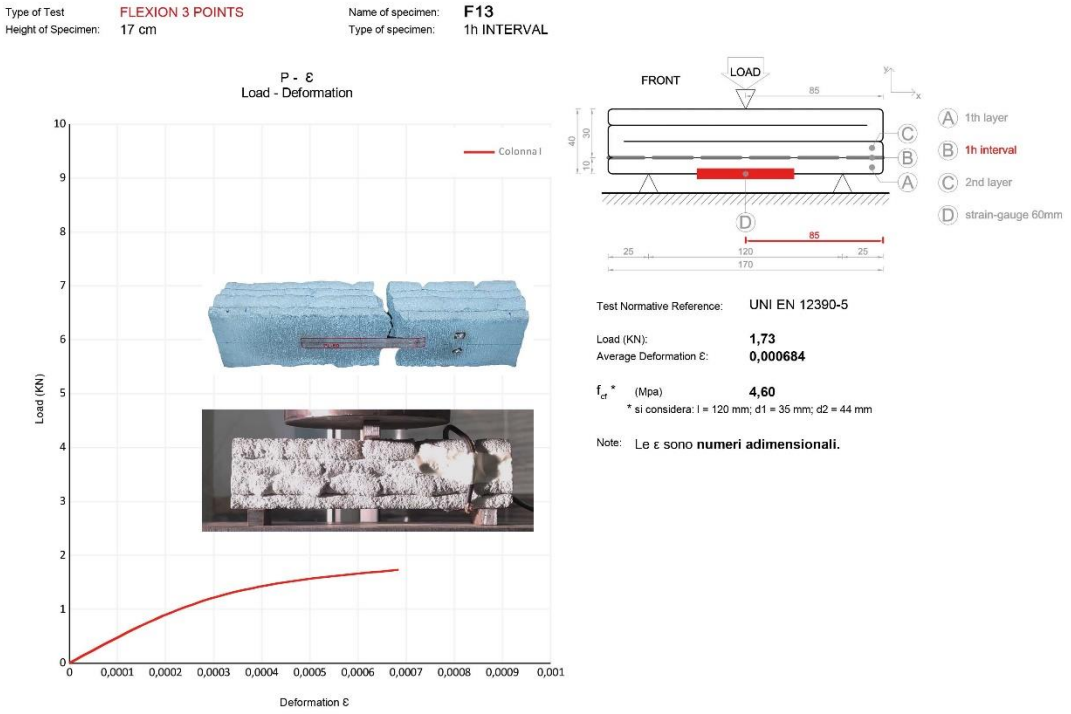


Fig. 4.1.2.26 – Provino F13 – Scheda 2

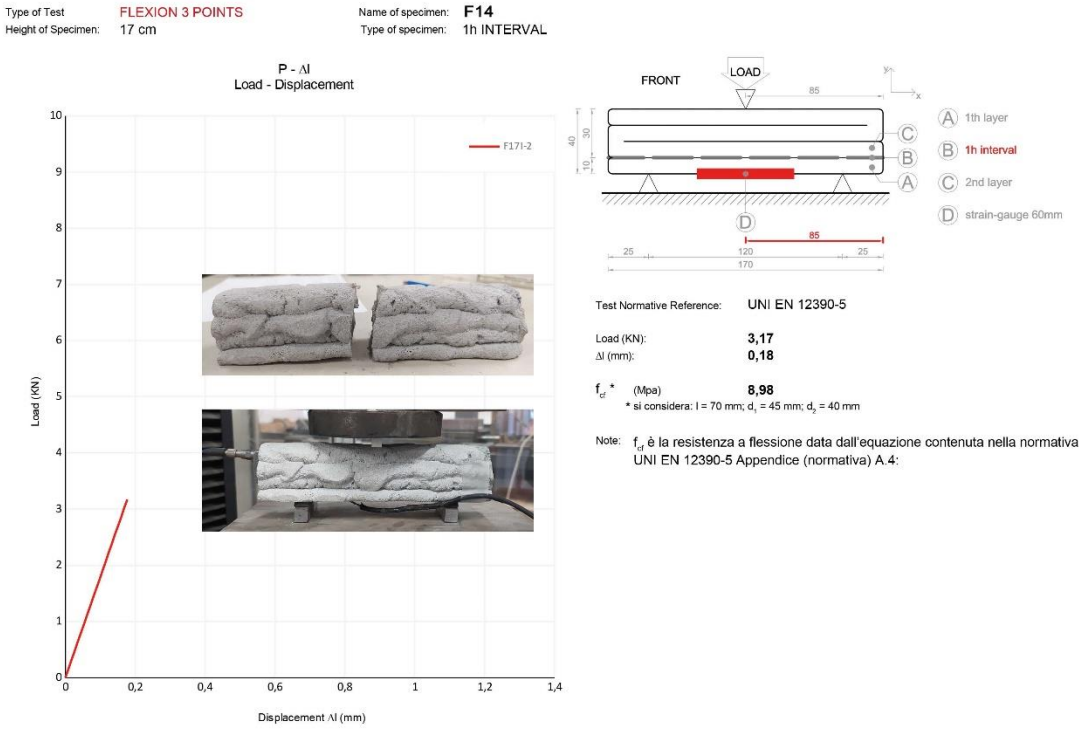


Fig. 4.1.2.27 – Provino F14 – Scheda 1

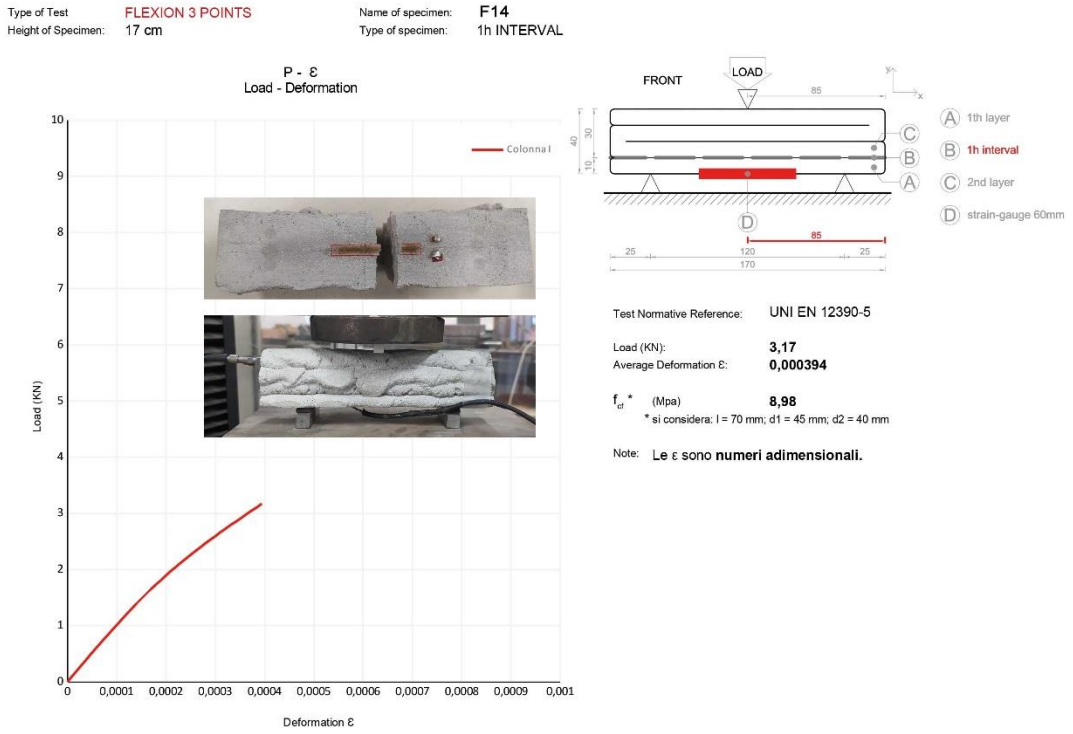


Fig. 4.1.2.28 – Provino F14 – Scheda 2

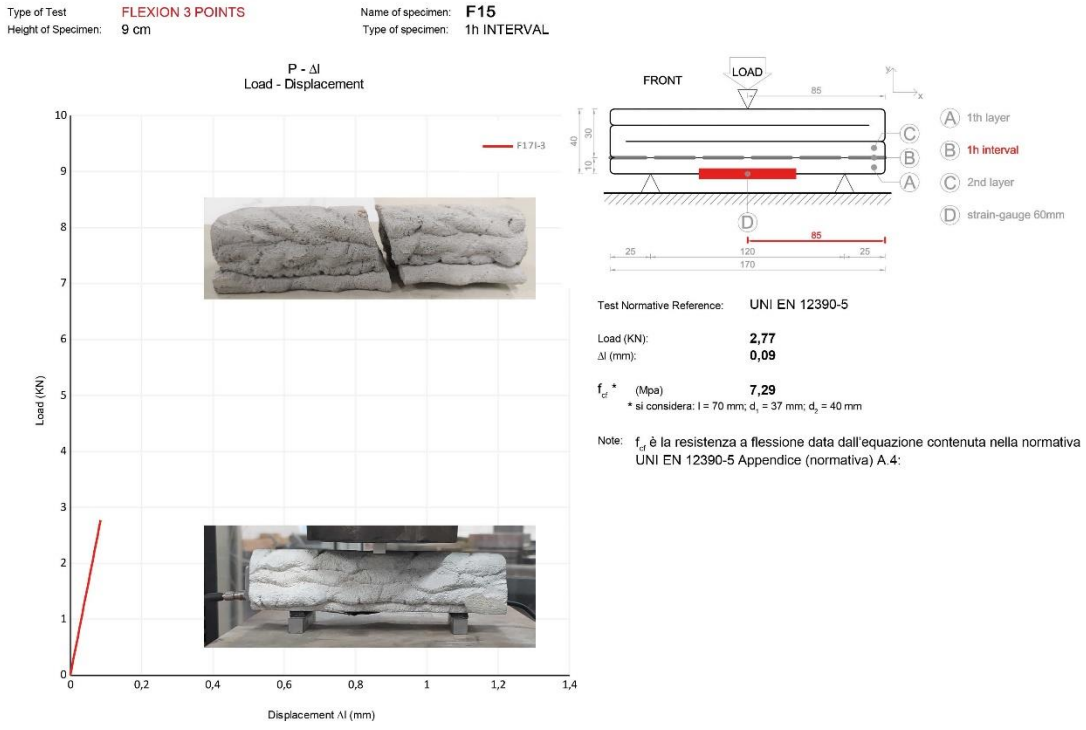


Fig. 4.1.2.29 – Provino F15 – Scheda 1



Fig. 4.1.2.30 – Provino F15 – Scheda 2

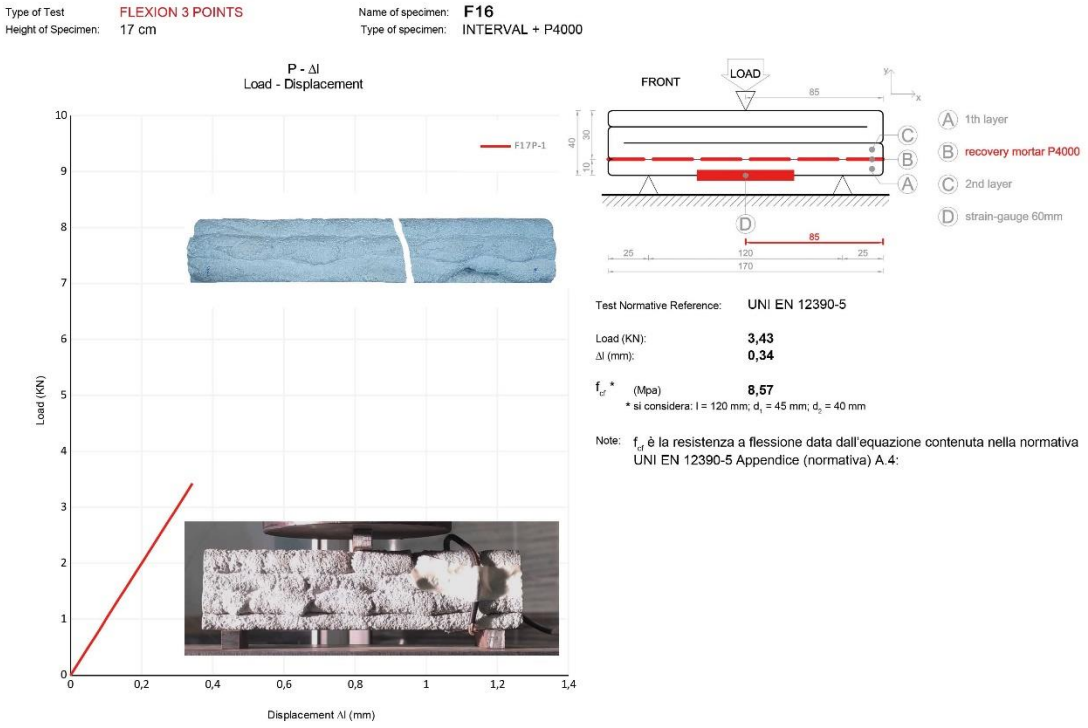


Fig. 4.1.2.31 – Provino F16 – Scheda 1

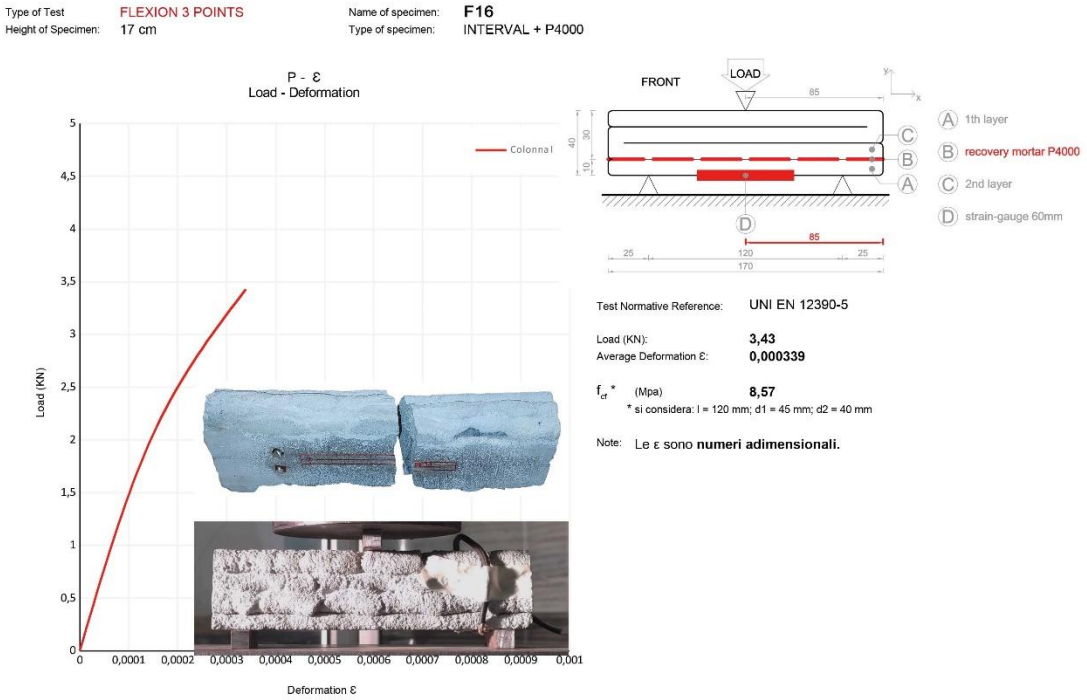


Fig. 4.1.2.32 – Provino F16 – Scheda 2

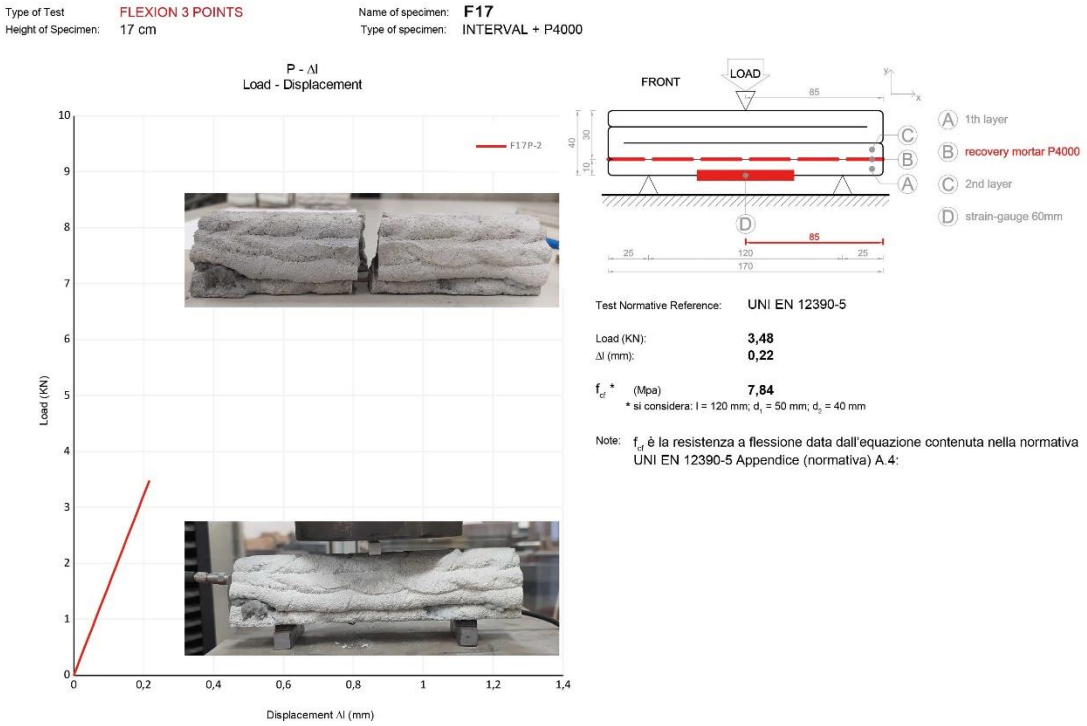


Fig. 4.1.2.33 – Provino F17 – Scheda 1

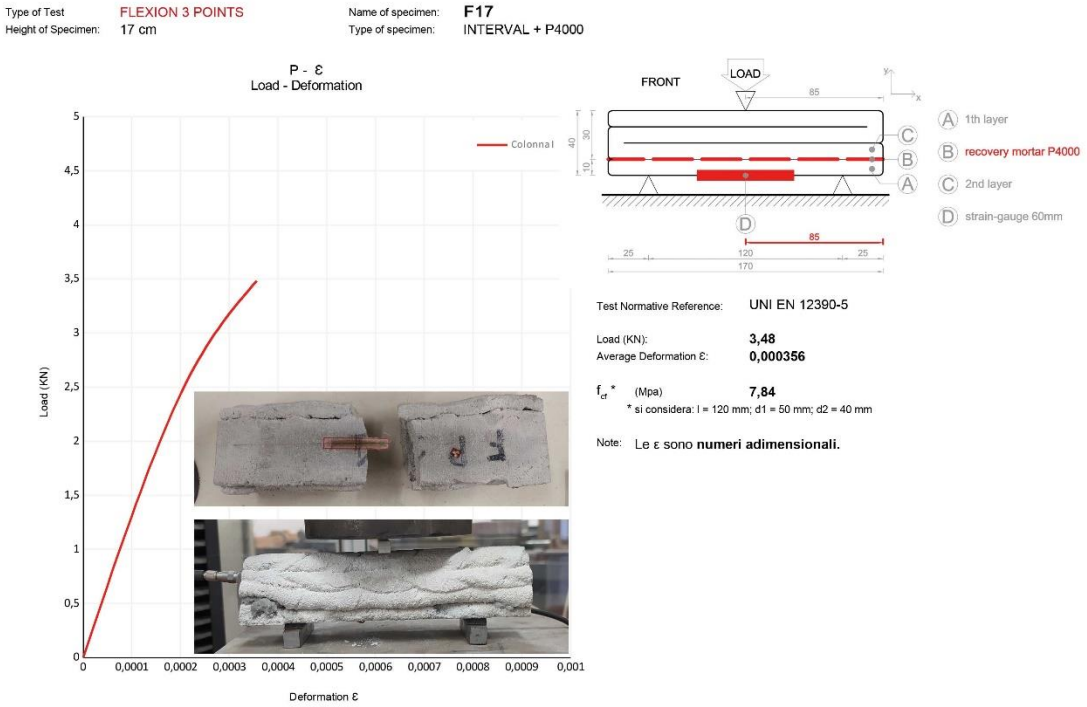


Fig. 4.1.2.34 – Provino F17 – Scheda 2

I dati che sono stati estrapolati si possono dire soddisfacenti. Avendo sottoposto i provini a flessione con una forza perpendicolare alla linea di stampa, i valori delle resistenze a flessione risultano alte. Questi dati e la modalità di collasso dei provini sono in linea con quanto indicato dalla normativa.
Di seguito sono proposte schede riassuntive in cui:

- scheda A.1 e scheda A.2: rappresentano i diagrammi di forza-spostamento dei sei provini realizzati con stampa continua (tre con lunghezza 9 cm e tre con lunghezza 17 cm). La curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda B.1 e scheda B.2: rappresentano i diagrammi di forza-deformazione dei sei provini realizzati con stampa continua (tre con lunghezza 9 cm e tre con lunghezza 17 cm). La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda C.1 e scheda C.2: rappresentano i diagrammi di forza-spostamento dei sei provini realizzati con stampa continua e intervallo temporale (tre con lunghezza 9 cm e tre con lunghezza 17 cm). La curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda D.1 e scheda D.2: rappresentano i diagrammi di forza-deformazione dei sei provini realizzati con stampa continua e intervallo temporale (tre con lunghezza 9 cm e tre con lunghezza 17 cm). La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda E.1 e scheda E.2: rappresentano i diagrammi di forza-spostamento dei sei provini realizzati con stampa continua e nell'intervallo temporale l'aggiunta della malta per la ripresa di getto (tre con lunghezza 9 cm e tre con lunghezza 17 cm). La curva ha

come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);

- scheda F.1 e scheda F.2: rappresentano i diagrammi di forza-deformazione dei sei provini realizzati con stampa continua e nell'intervallo temporale l'aggiunta della malta per la ripresa di getto (tre con lunghezza 9 cm e tre con lunghezza 17 cm). La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda G.1 e scheda G.2: rappresentano tutti i diagrammi di forza-spostamento di tutti i provini lunghi 9 cm (scheda G.1) e di tutti i provini lunghi 17 cm (scheda G.2). La curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).
- scheda H.1 e scheda H.2: rappresentano tutti i diagrammi forza-deformazione di tutti i provini lunghi 9 cm (scheda H.1) e di tutti i provini lunghi 17 cm (scheda H.2). La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

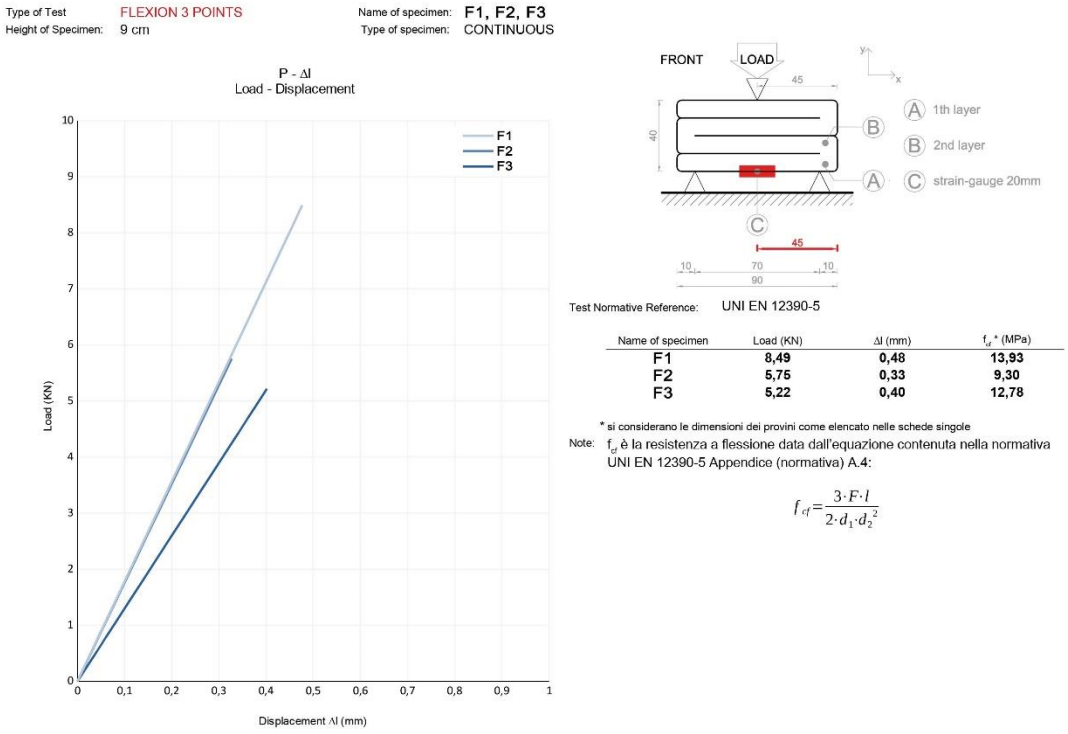


Fig. 4.1.1.35: Scheda A.1 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F1, F2, F3

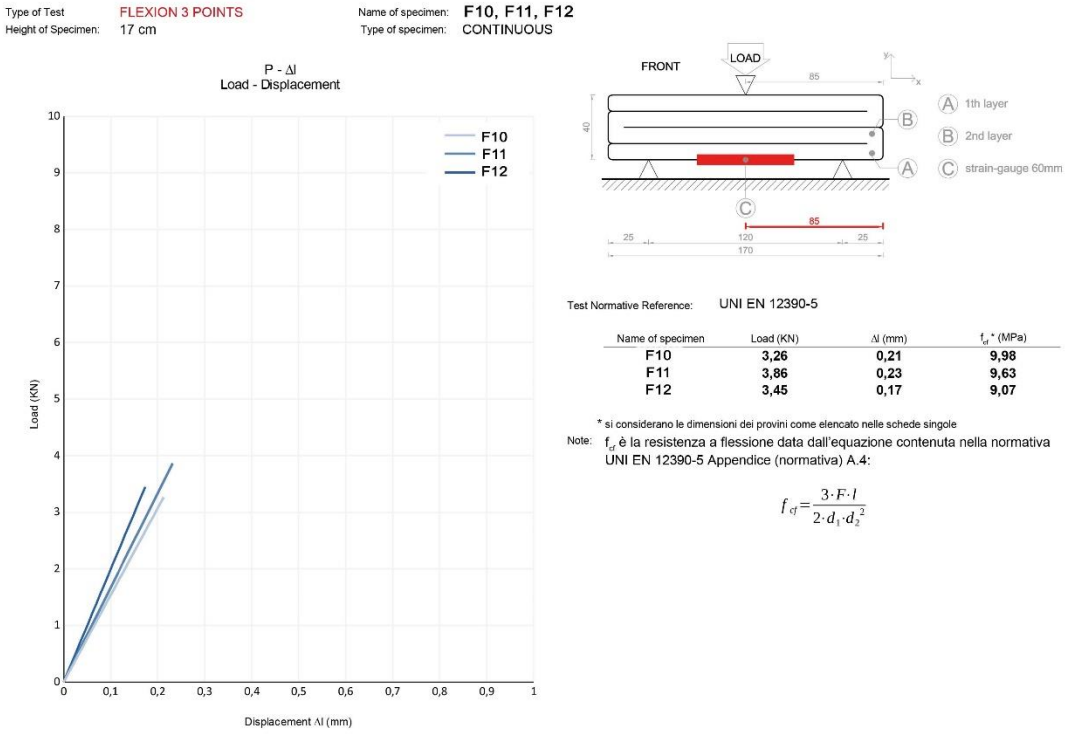


Fig. 4.1.2.36: Scheda A.2 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F10, F11, F12

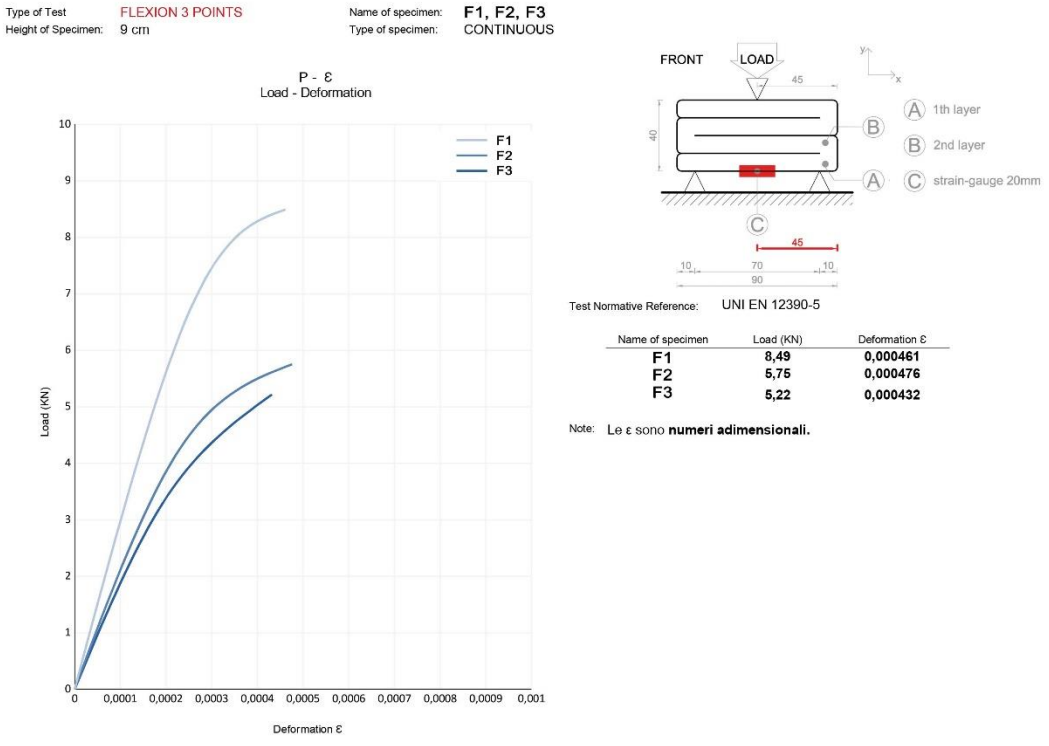


Fig. 4.1.1.37: Scheda B.1 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F1, F2, F3

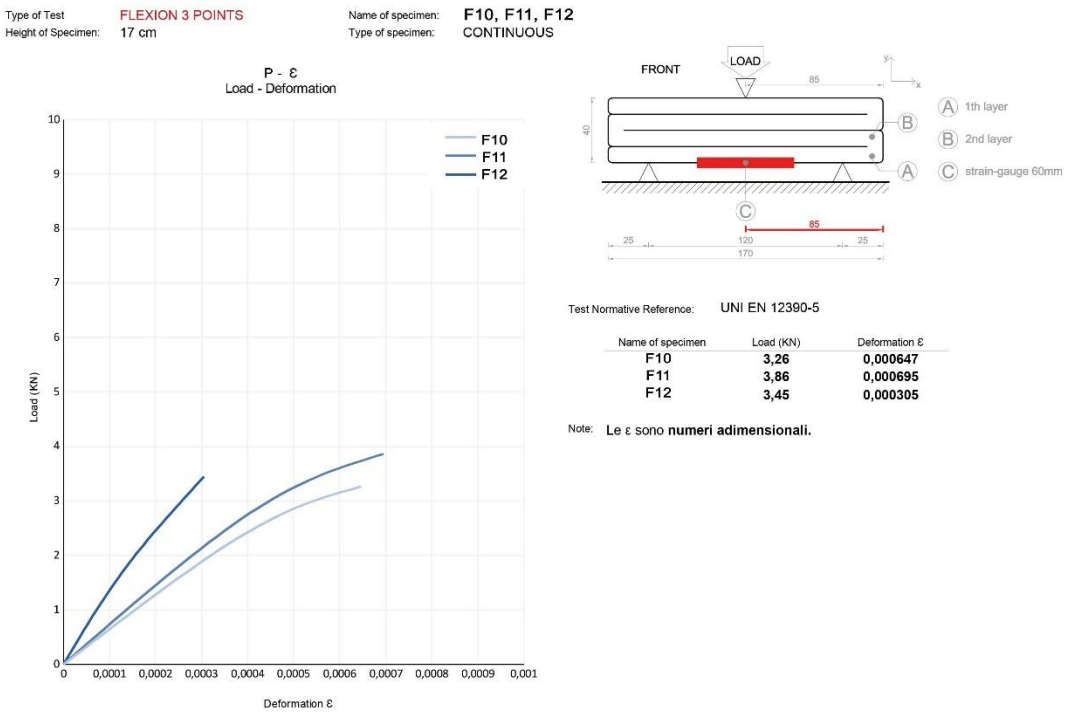


Fig. 4.1.2.38: Scheda B.2 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F10, F11, F12

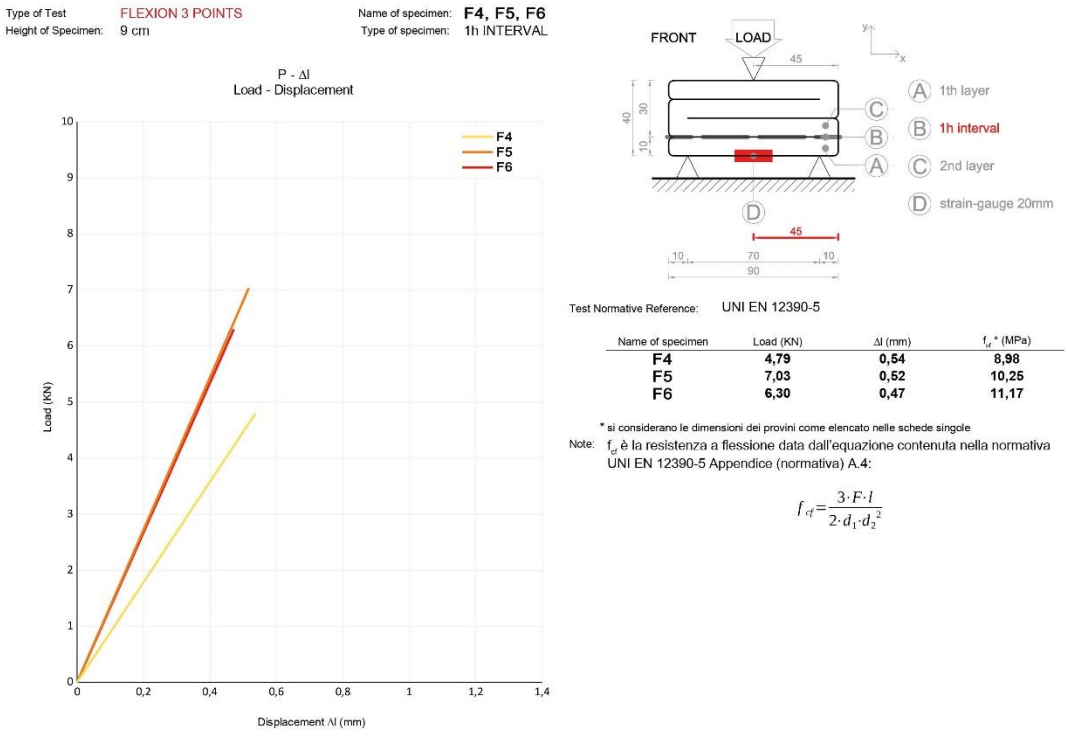


Fig. 4.1.1.39: Scheda C.1 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F4, F5, F6

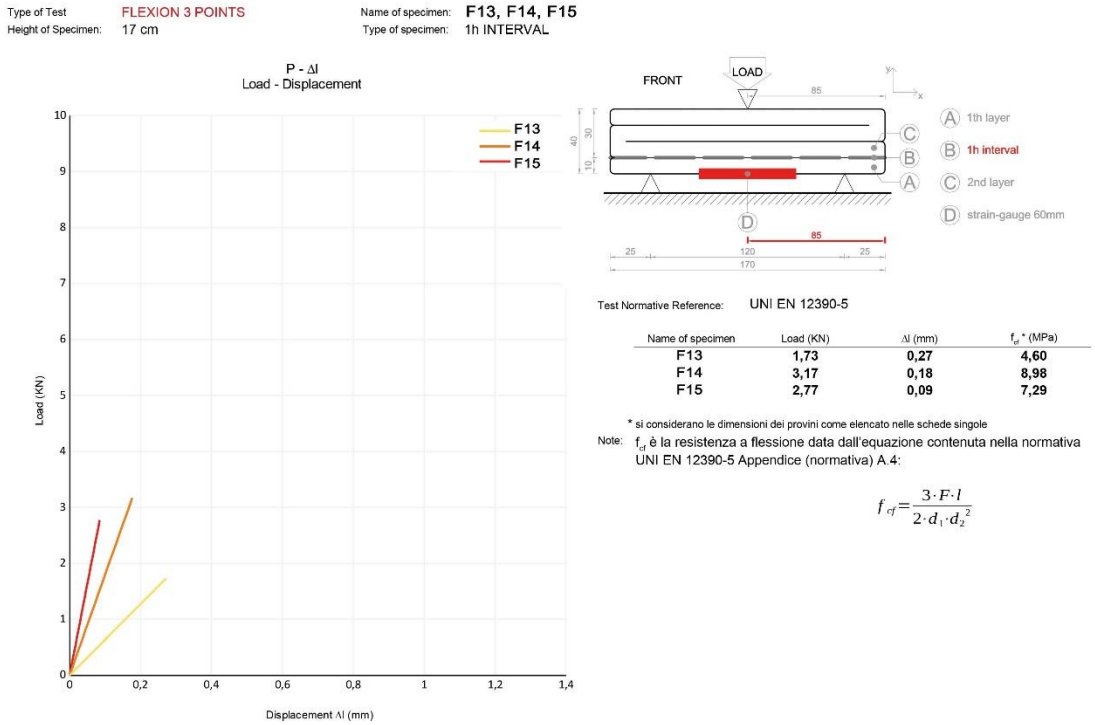


Fig. 4.1.2.40: Scheda C.2 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F13, F14, F15

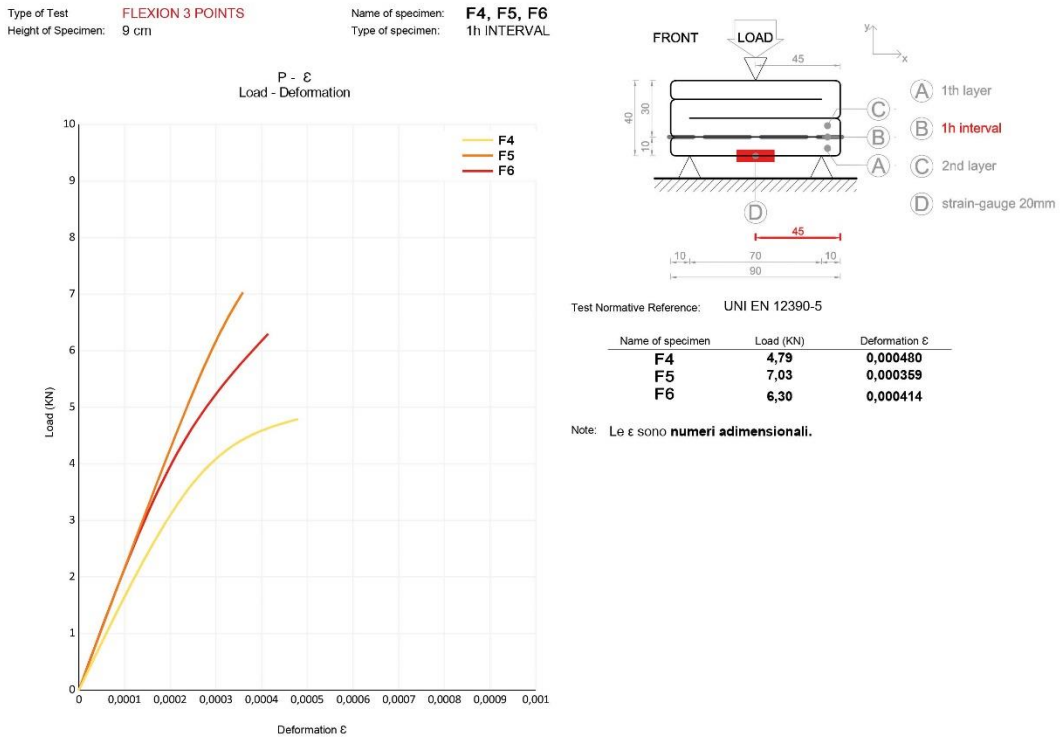


Fig. 4.1.1.41: Scheda D.1 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F4, F5, F6

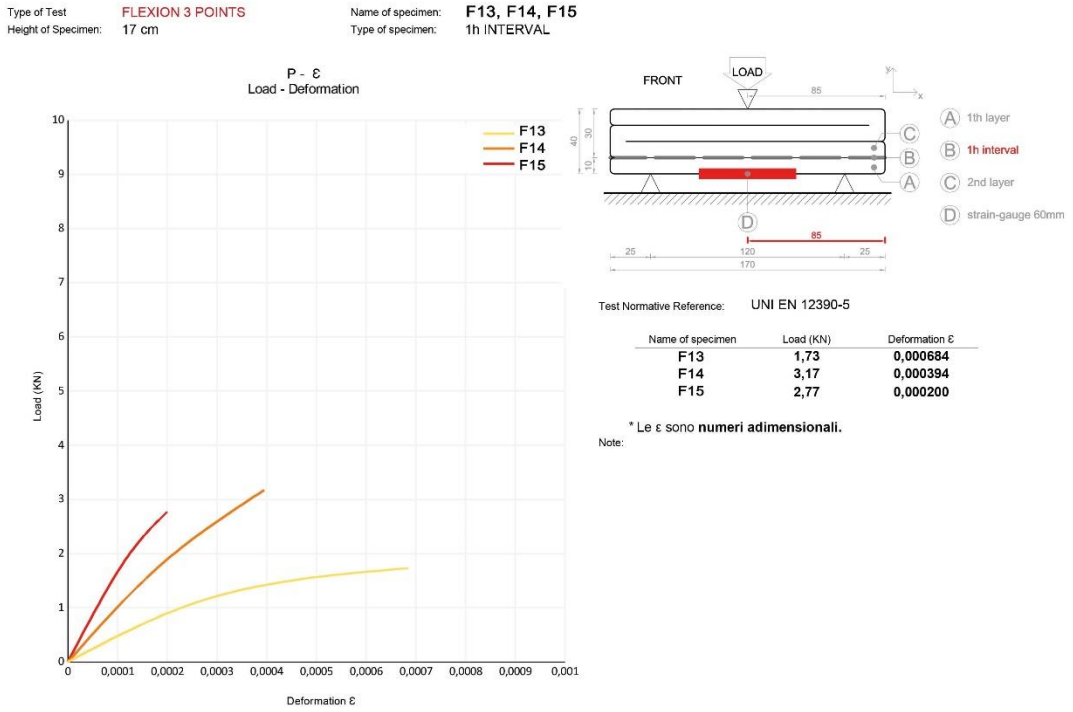


Fig. 4.1.2.42: Scheda D.2 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F13, F14, F15

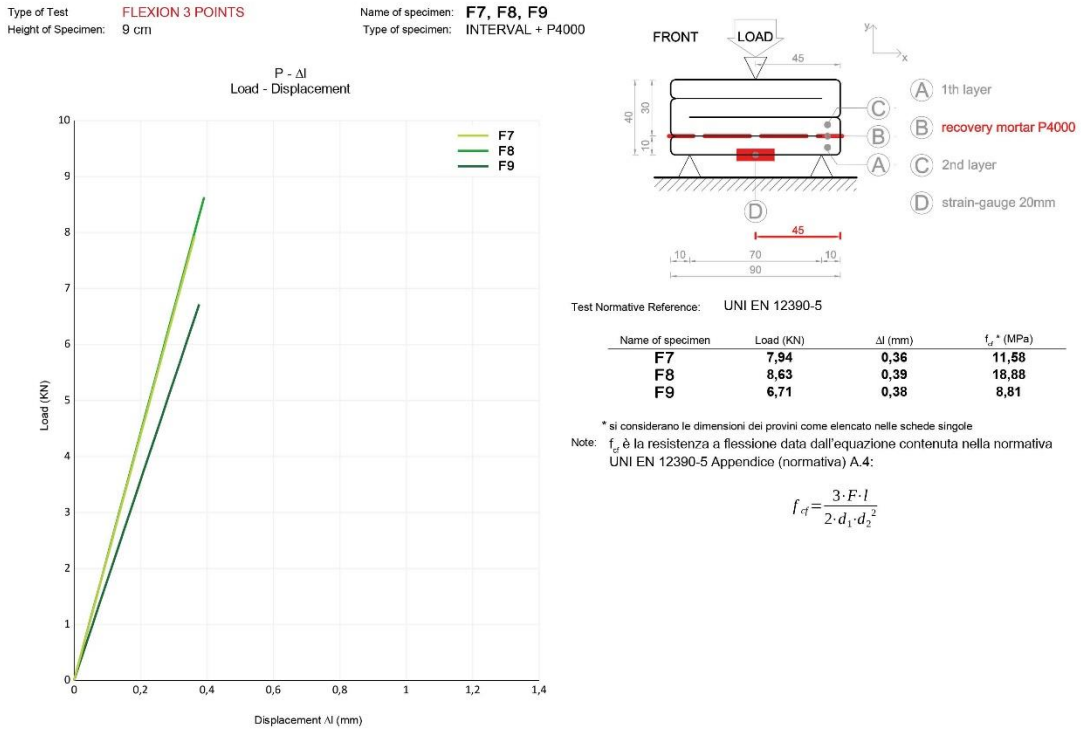


Fig. 4.1.1.43: Scheda E.1 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F7, F8, F9

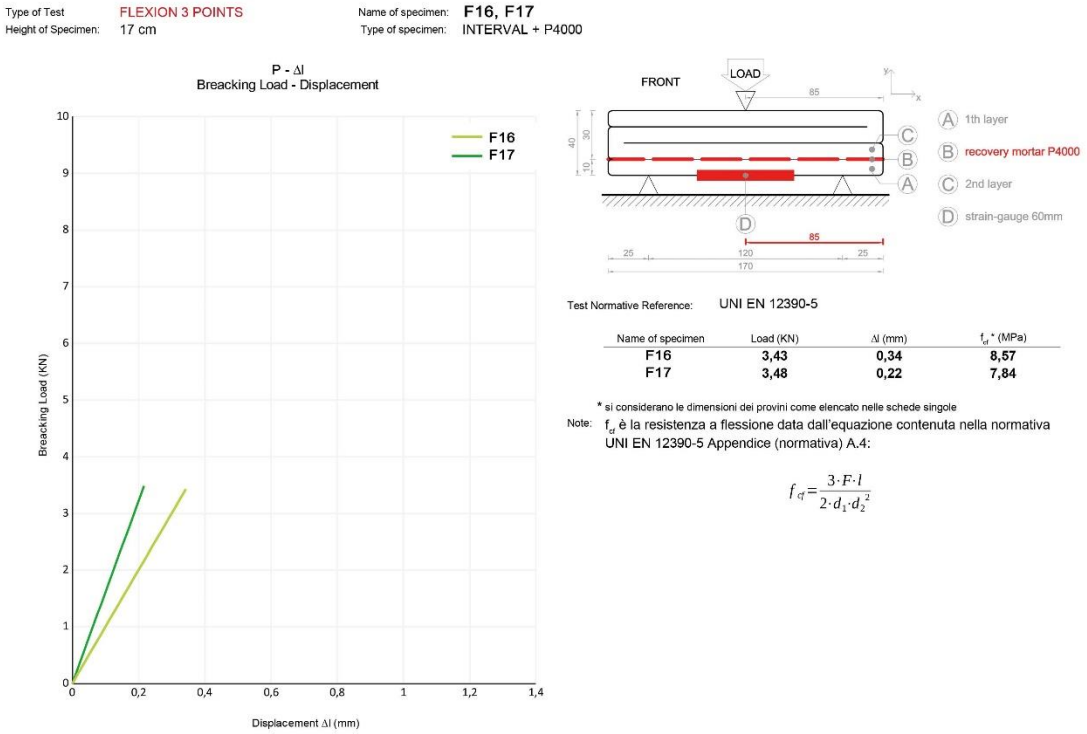


Fig. 4.1.2.44: Scheda E.2 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F16, F17

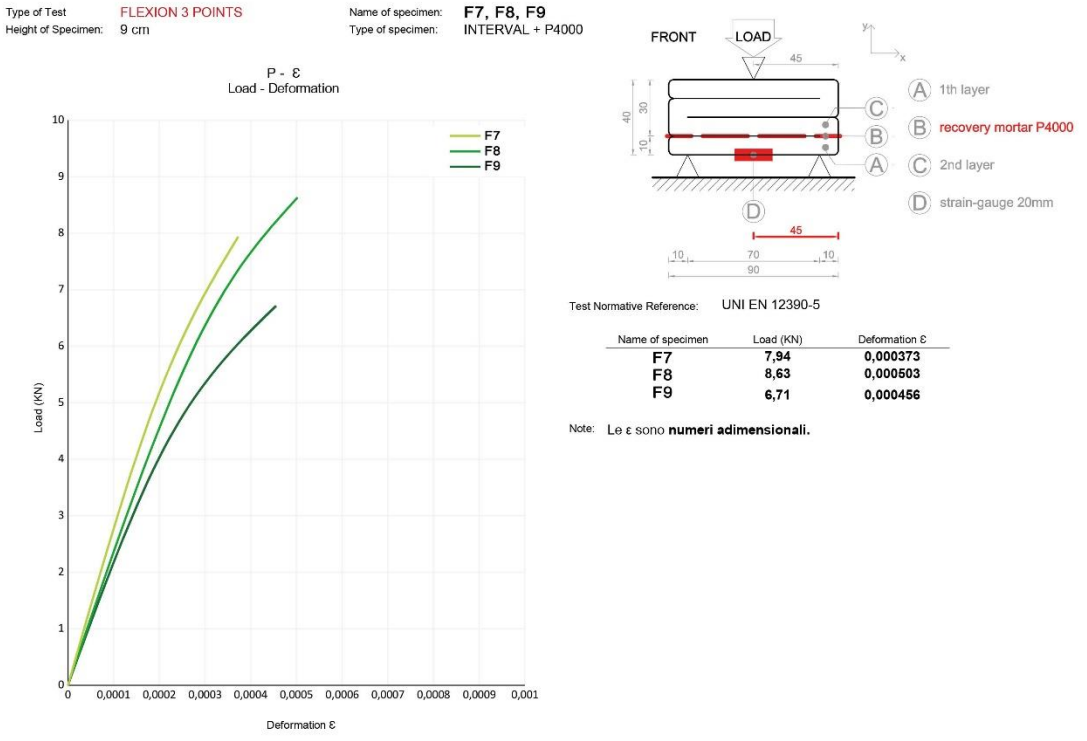


Fig. 4.1.1.45: Scheda F.1 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F7, F8, F9

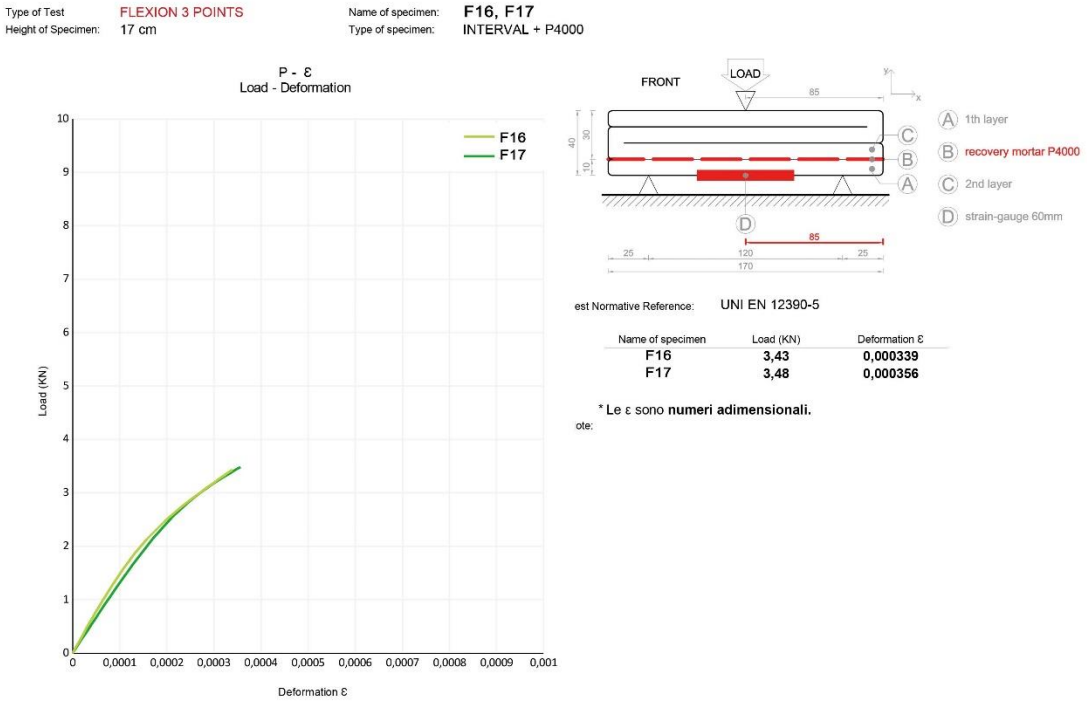


Fig. 4.1.2.46: Scheda F.2 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F16, F17

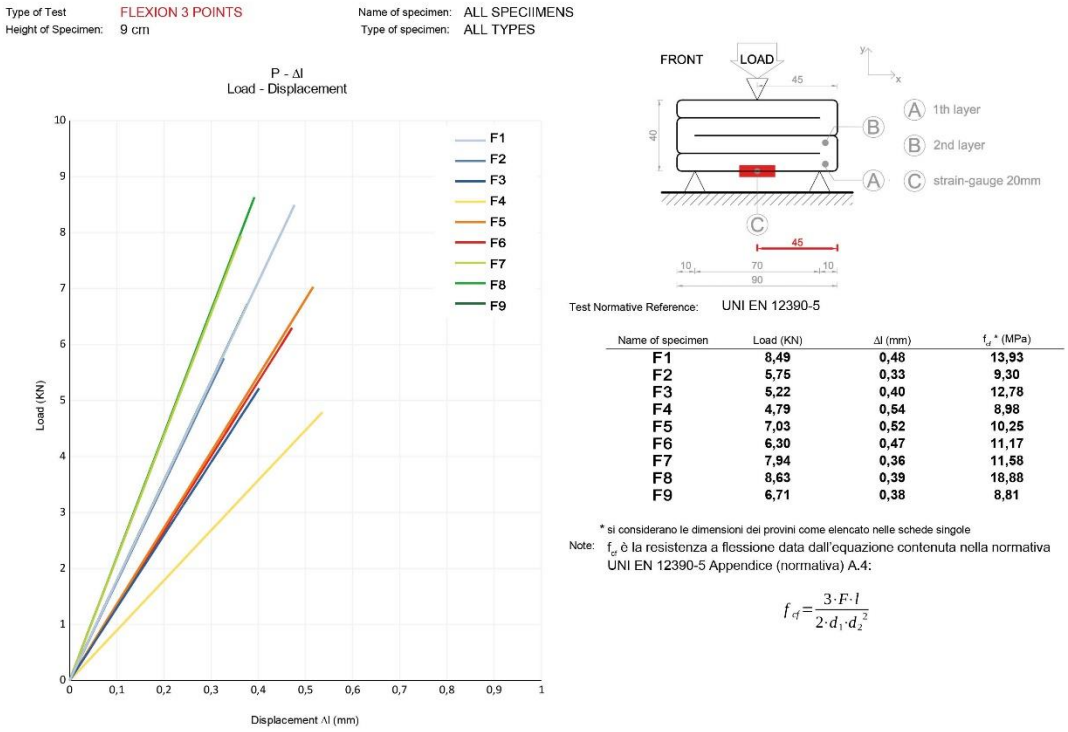


Fig. 4.1.1.47: Scheda G.1 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui tutti i provini 4x4x9 cm

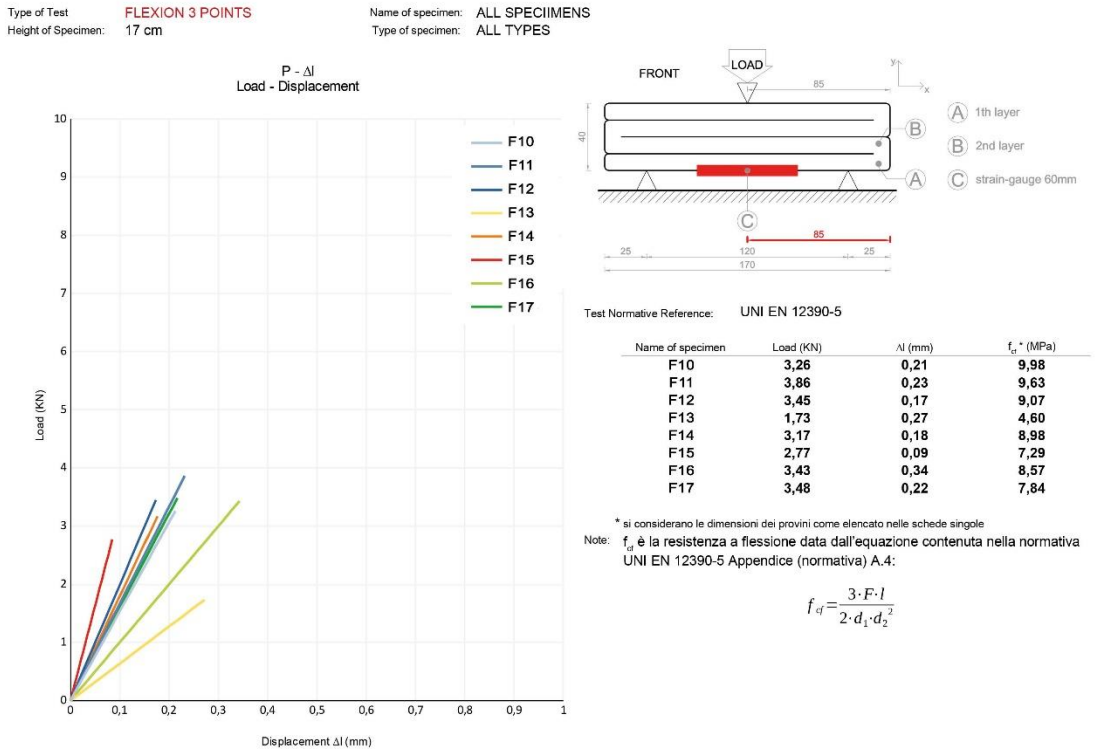


Fig. 4.1.2.48: Scheda G.2 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui tutti i provini 4x4x17 cm

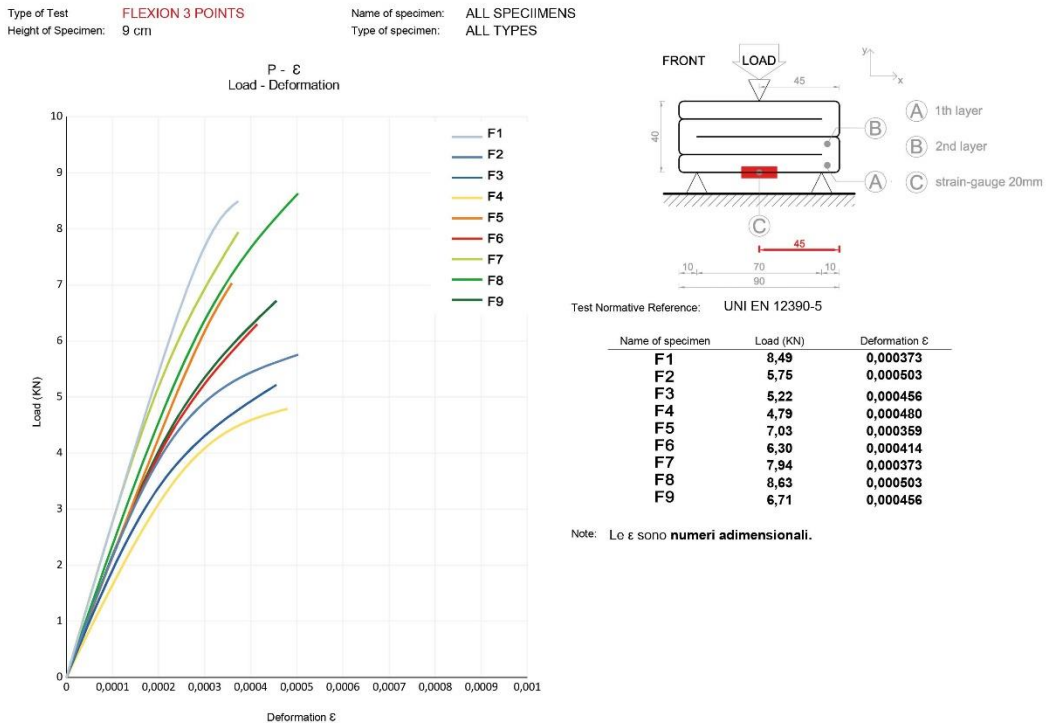


Fig. 4.1.1.49: Scheda H.1 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui tutti i provini 4x4x9 cm

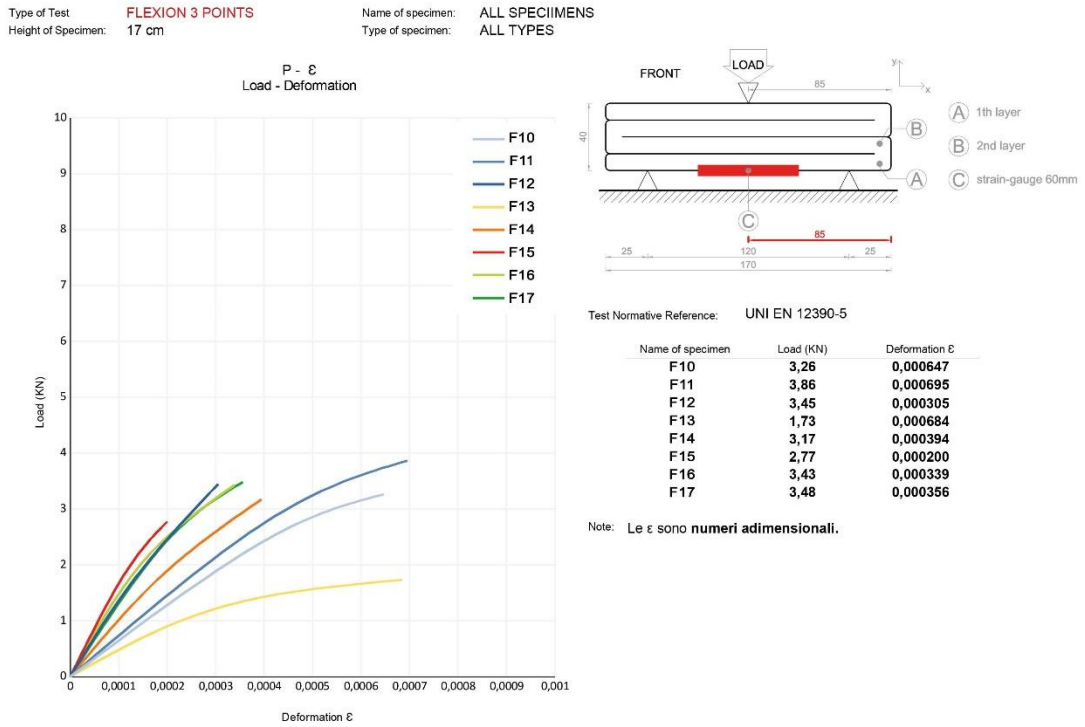


Fig. 4.1.2.50: Scheda H.2 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui tutti i provini 4x4x17 cm

In entrambe le prove di flessione a tre punti, i provini realizzati con stampa continua e con la malta per la ripresa di getto hanno valori simili. Nel dettaglio, la resistenza alla flessione del provino F1 è del 17% superiore rispetto al provino F7, mentre il provino F10 ha un valore superiore del 14% rispetto al provino F16. Lo stesso vale per un confronto tra i provini realizzati con stampa continua e quelli con intervallo temporale. Il provino F1 ha un valore di resistenza alla flessione superiore del 35% rispetto al provino F4, mentre il provino F10 ha un valore superiore del 53% rispetto al provino F13.
L'energia di frattura calcolata sui provini a flessione, presentano valori in linea con quelli calcolati da più recenti studi (Ding et al. 2021). Nei test a flessione su tre punti con provini di lunghezza 9cm, l'energia di frattura più alta calcolata è del provino F4 il quale ha un valore superiore dell'8,5% rispetto all'energia di frattura del provino F1. Questo implica che il provino F4 sia più rigido. Questa differenza è data dalla qualità della stampa (che risulta più fluida e meno porosa) e dal valore più alto di deformazione (ε_{F4} = 0,00776). Nei test a flessione su tre punti con provini di lunghezza 17cm, l'energia di frattura più alta calcolata è del provino F10 il quale ha un valore superiore del 51% rispetto all'energia di frattura del provino F13. Questo implica che il provino F10 sia più rigido. Questa differenza è data dalla qualità della stampa (che risulta meno porosa) e dal valore più alto di deformazione (ε_{F10} = 0,00646).

4.1.3. Test a Flessione su quattro punti

I test a flessione su quattro punti sono stati realizzati seguendo le indicazioni della normativa EN UNI 12390-5 e, come indicato nel paragrafo precedente dedicato al design delle prove, ai provini lunghi 21 cm sono stati applicati strain-gauges sullo strato inferiore, alla base del provino. I test sono stati eseguiti in controllo di forza (50 N/s) (Liu, 2023) e, come avvenuto per i test a tre punti, i dati estrapolati sono stati riassunti per ogni singolo provino in due schede contenenti:

- scheda 1: rappresenta il diagramma di forza-spostamento dove la curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda 2: rappresenta il diagramma di forza-deformazione: la curva ha come asse delle ascisse la deformazione dello strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) calcolata dai dati raccolti dagli strain-gauges e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

Ai diagrammi seguono anche le foto raccolte prima del test e dopo il test che evidenziano i collassi dei provini.
Di seguito sono esposti tutti i provini testati: F18 e F19 con stampa continua, F20 e F21 con intervallo temporale e dal F22 al F24 con l'aggiunta della malta additivata.

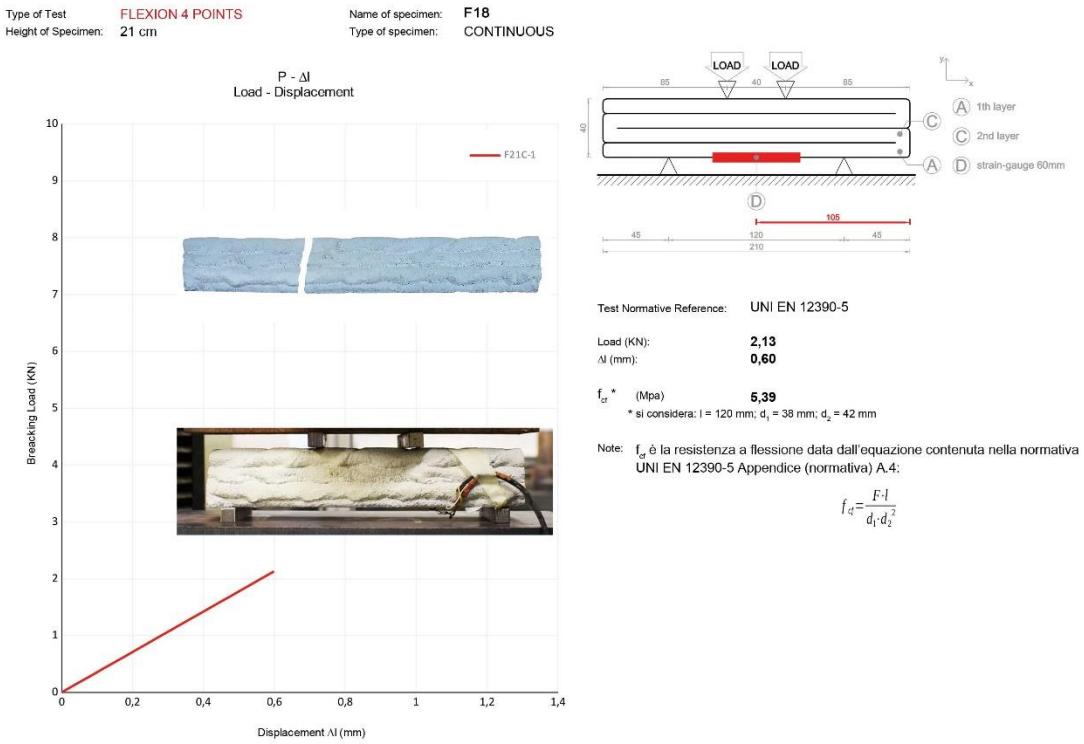


Fig. 4.1.3.1 – Provino F18 – Scheda 1



Fig. 4.1.3.2 – Provino F18 – Scheda 2

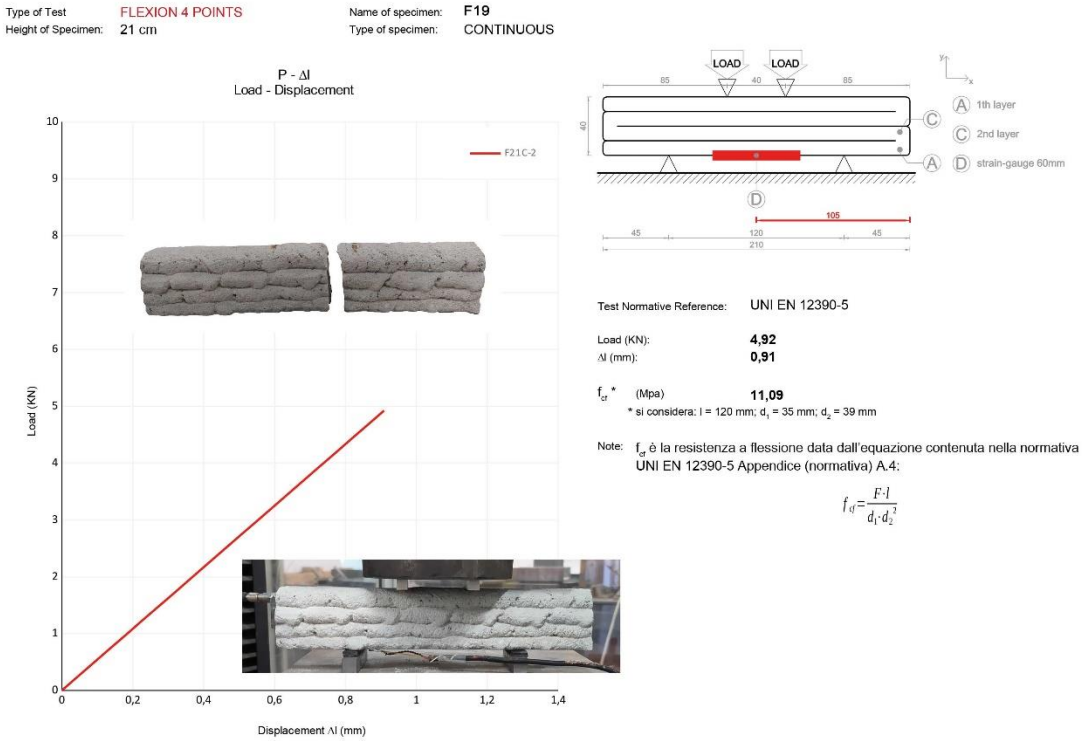


Fig. 4.1.3.3 – Provino F19 – Scheda 1

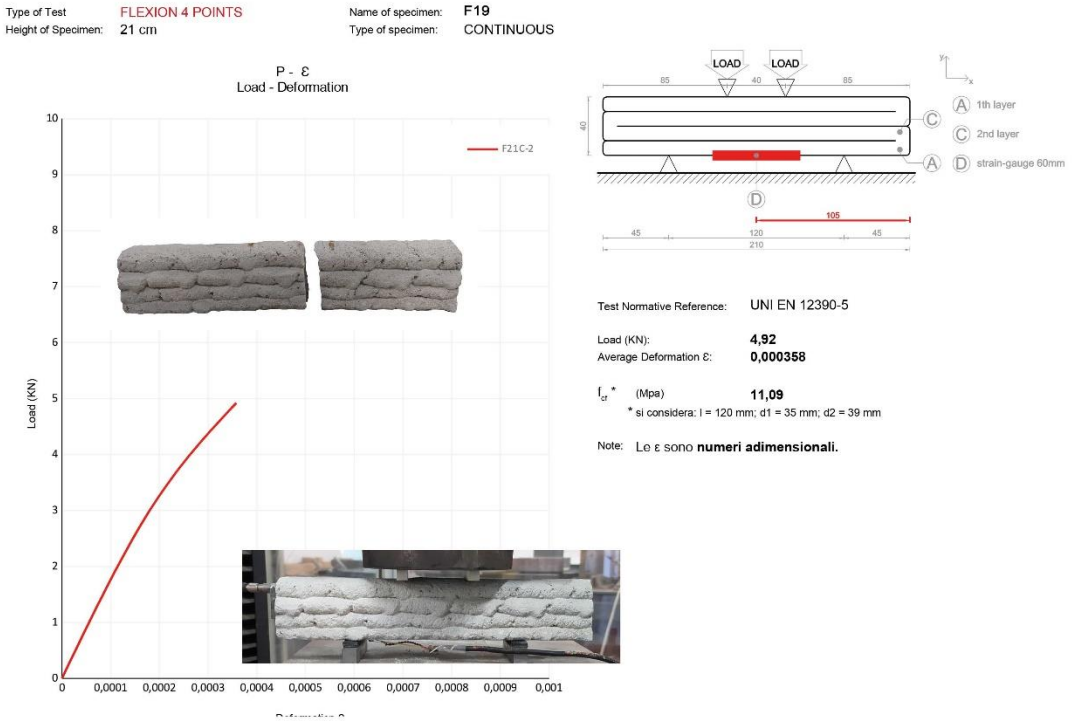


Fig. 4.1.3.4 – Provino F19 – Scheda 2

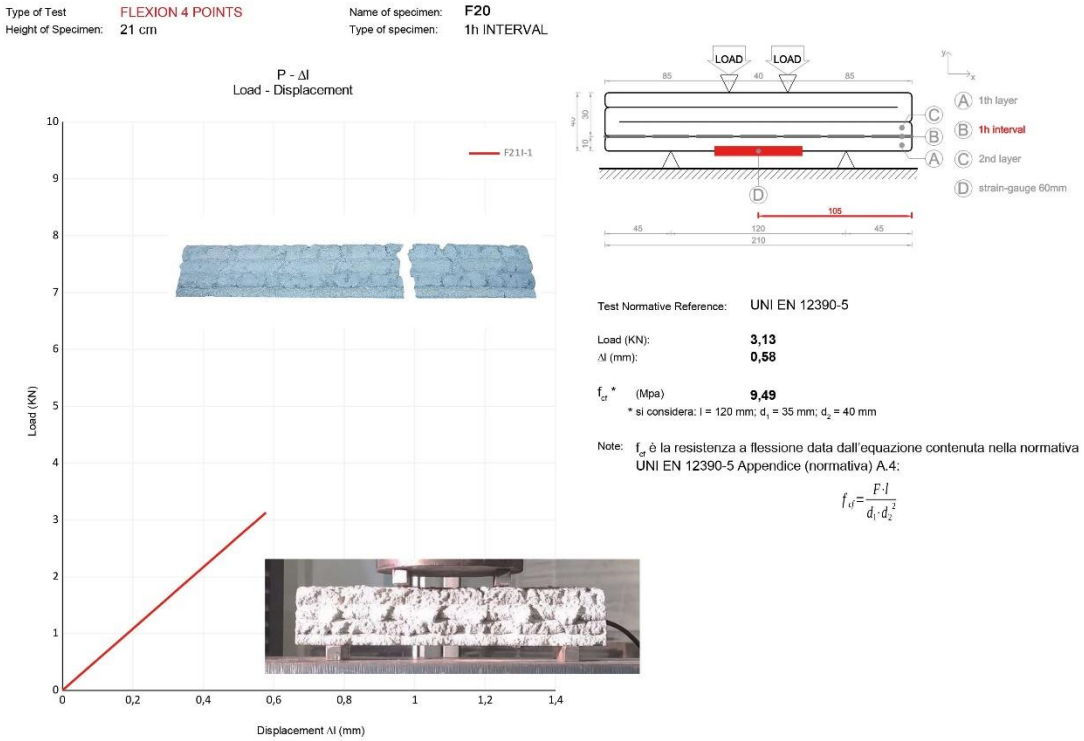


Fig. 4.1.3.5 – Provino F20 – Scheda 1

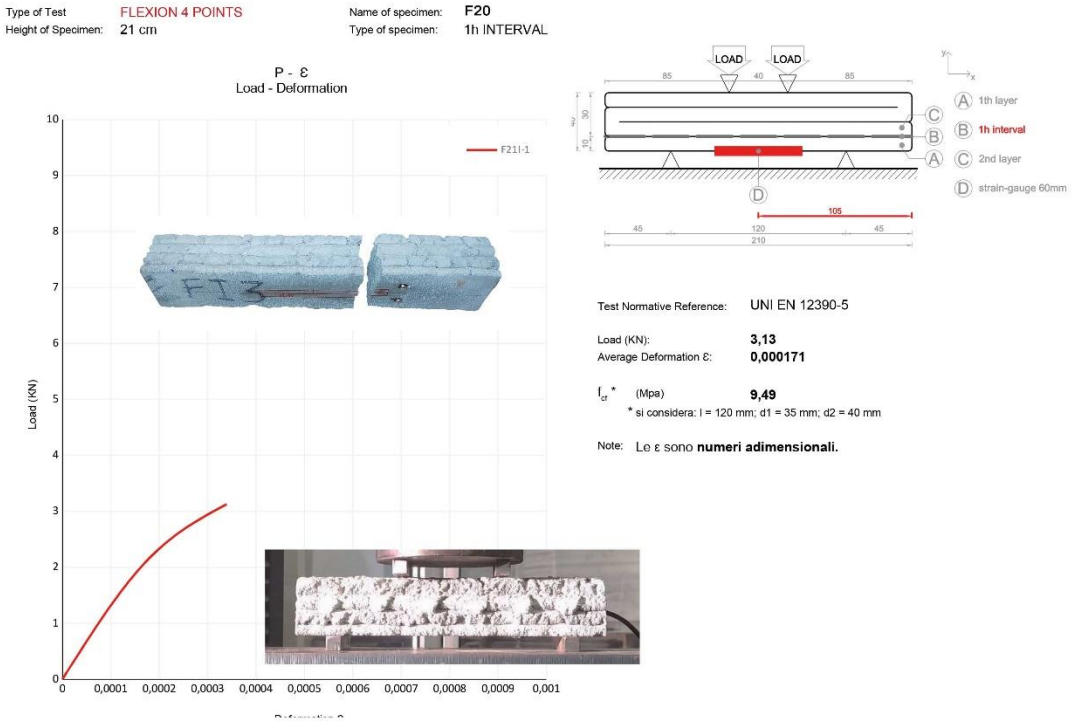


Fig. 4.1.3.6 – Provino F20 – Scheda 2

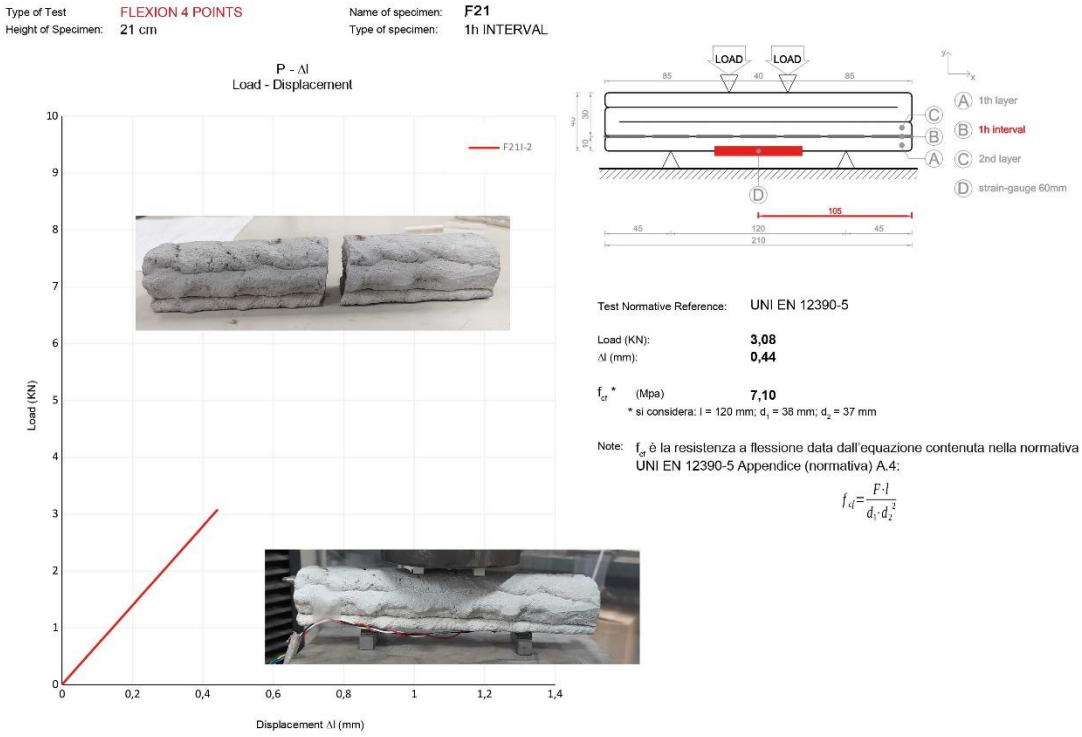


Fig. 4.1.3.7 – Provino F21 – Scheda 1

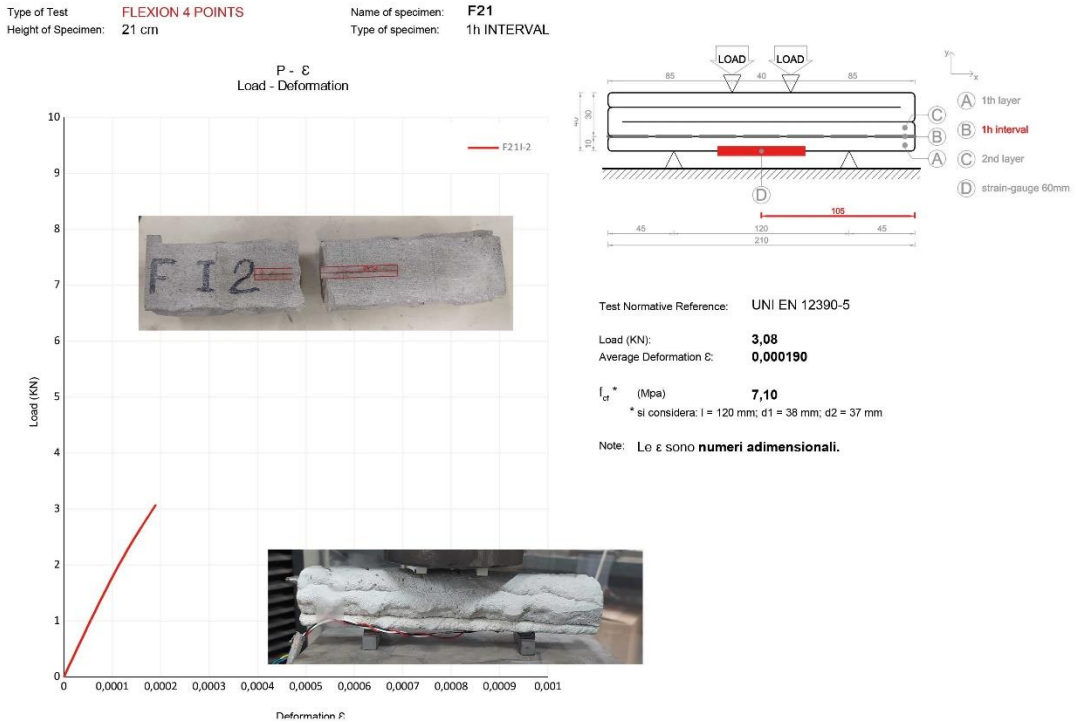


Fig. 4.1.3.8 – Provino F21 – Scheda 2

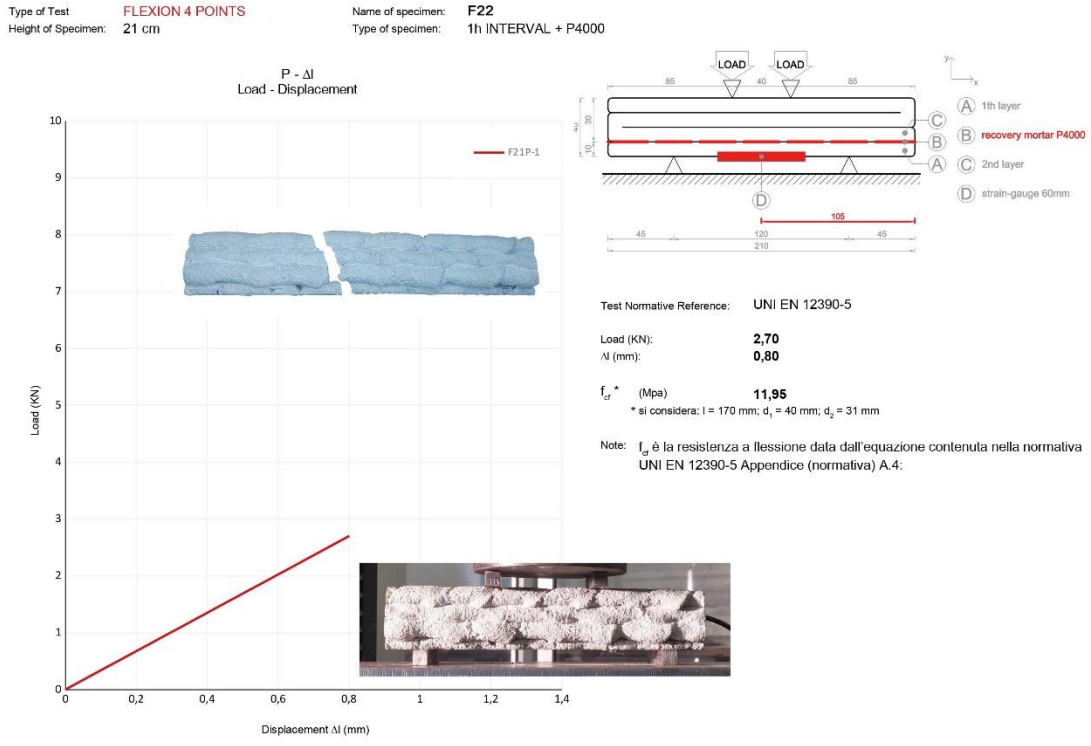


Fig. 4.1.3.9 – Provino F22 – Scheda 1



Fig. 4.1.3.10 – Provino F22 – Scheda 2

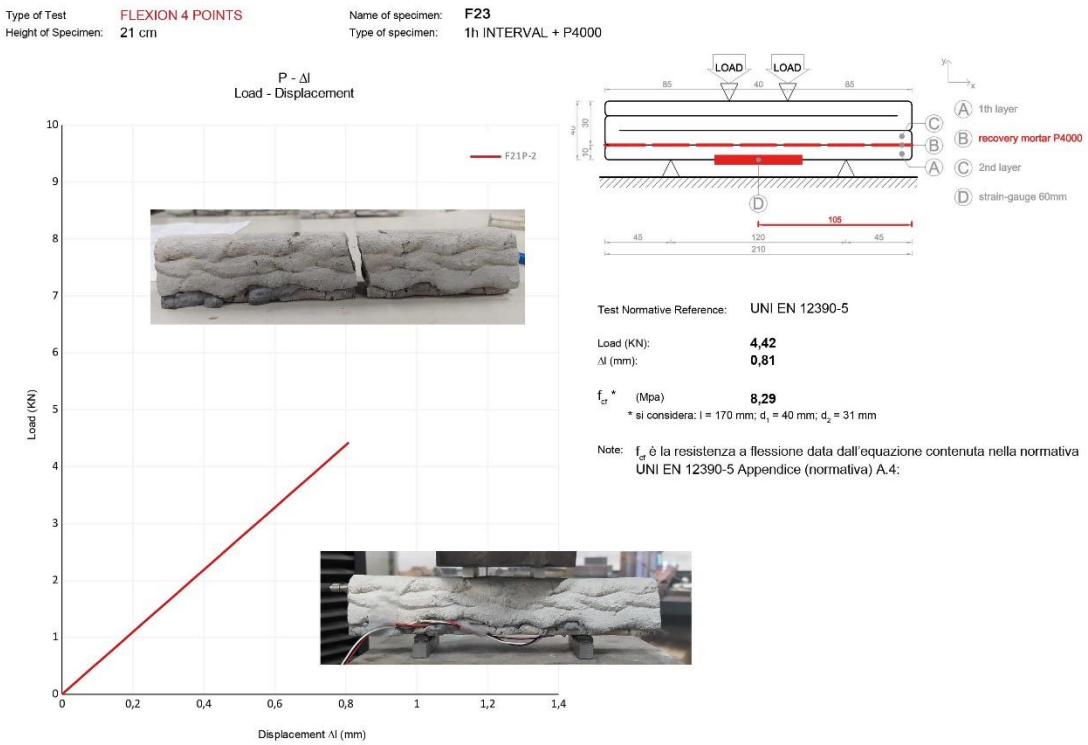


Fig. 4.1.3.11 – Provino F23 – Scheda 1

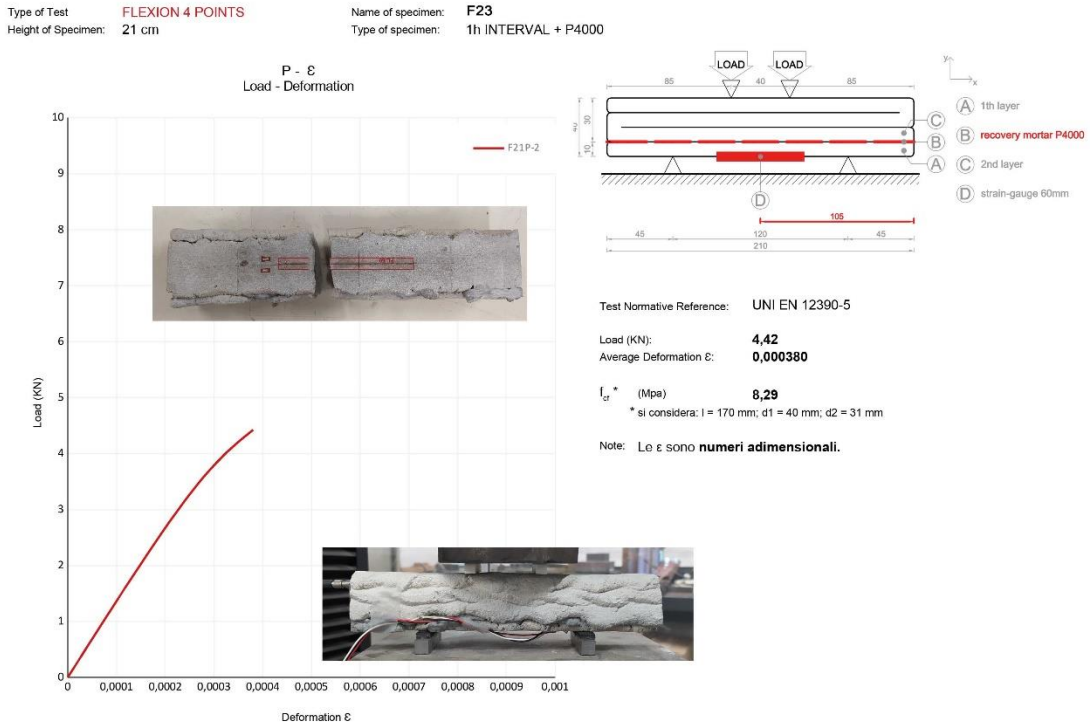


Fig. 4.1.3.12 – Provino F23 – Scheda 2

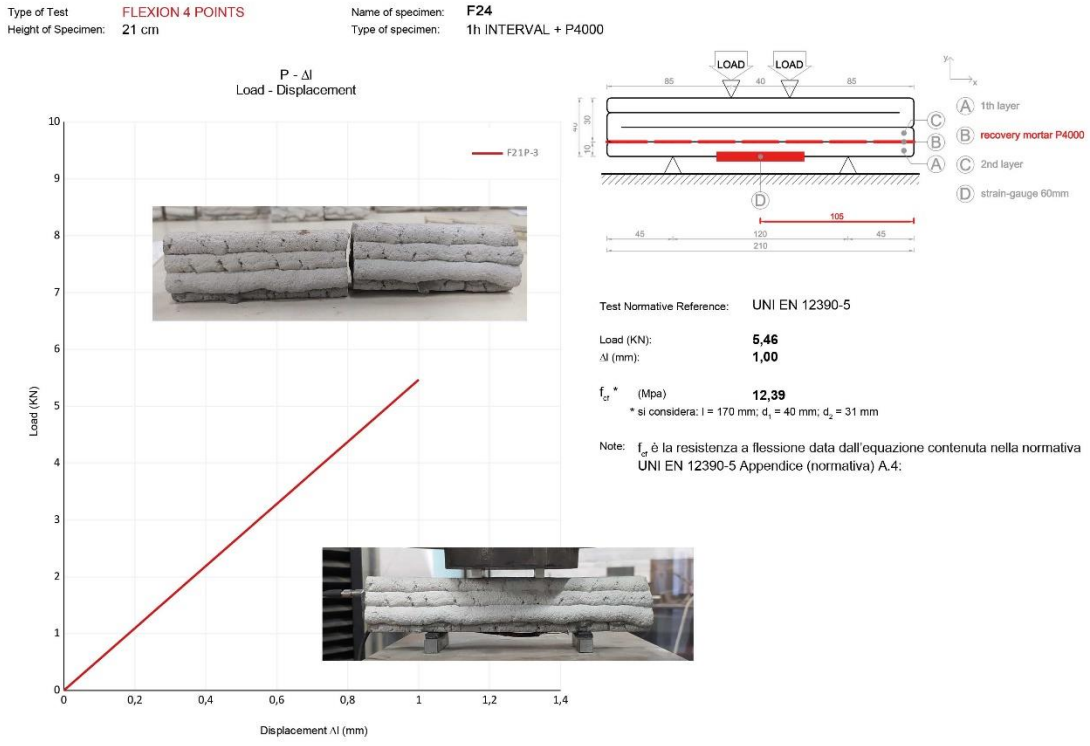


Fig. 4.1.3.13 – Provino F24 – Scheda 1

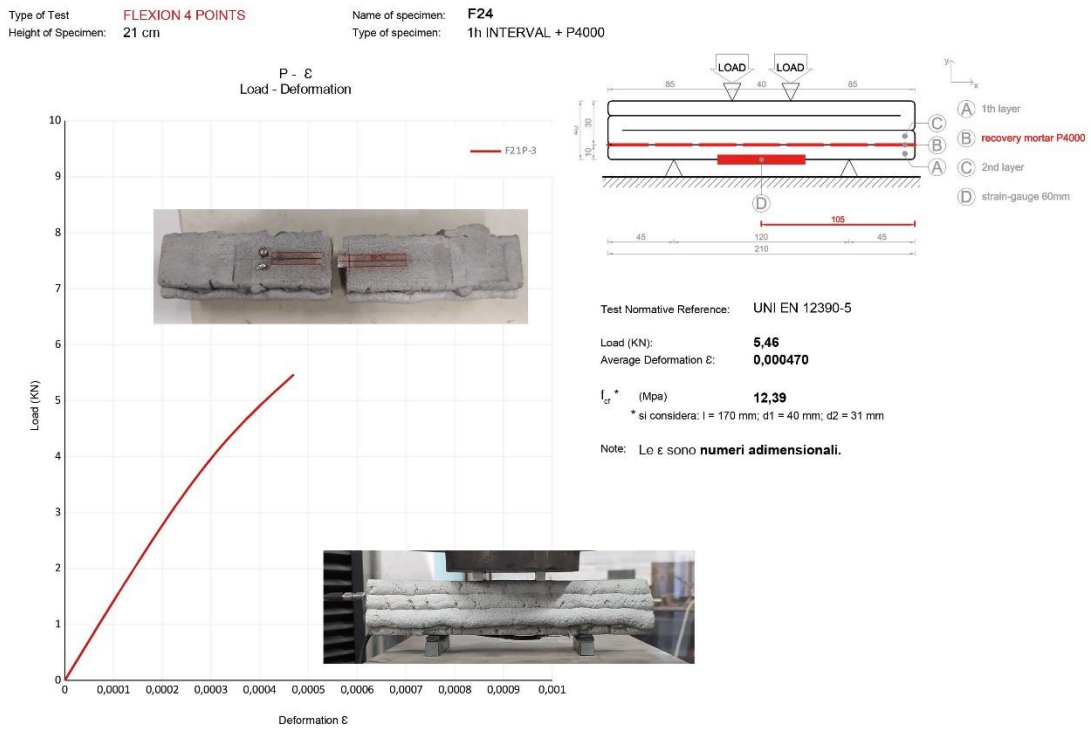


Fig. 4.1.3.14 – Provino F24 – Scheda 2

I dati che sono stati estrapolati si possono dire soddisfacenti. Avendo sottoposto i provini a flessione con una forza perpendicolare alla linea di stampa, i valori delle resistenze a flessione risultano alte. Questi dati e la modalità di collasso dei provini sono in linea con quanto indicato dalla normativa. Di seguito sono proposte schede riassuntive in cui:

- scheda A.3: rappresenta i diagrammi di forza-spostamento dei due provini realizzati con stampa continua. La curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda B.3: rappresenta i diagrammi di forza-deformazione dei due provini realizzati con stampa continua. La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda C.3: rappresentano i diagrammi di forza-spostamento dei due provini realizzati con stampa continua e intervallo temporale. La curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda D.3: rappresentano i diagrammi di forza-deformazione dei due provini realizzati con stampa continua e intervallo temporale. La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda E.3: rappresentano i diagrammi di forza-spostamento dei tre provini realizzati con stampa continua e nell'intervallo temporale l'aggiunta della malta per la ripresa di getto. La curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);
- scheda F.3: rappresentano i diagrammi di forza-deformazione dei tre provini realizzati con stampa continua e nell'intervallo temporale l'aggiunta della malta per la ripresa di getto. La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-

gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN);

- scheda G.3: rappresentano tutti i diagrammi di forza-spostamento di tutti i provini. La curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).
- scheda H.3: rappresentano tutti i diagrammi forza-deformazione di tutti i provin. La curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

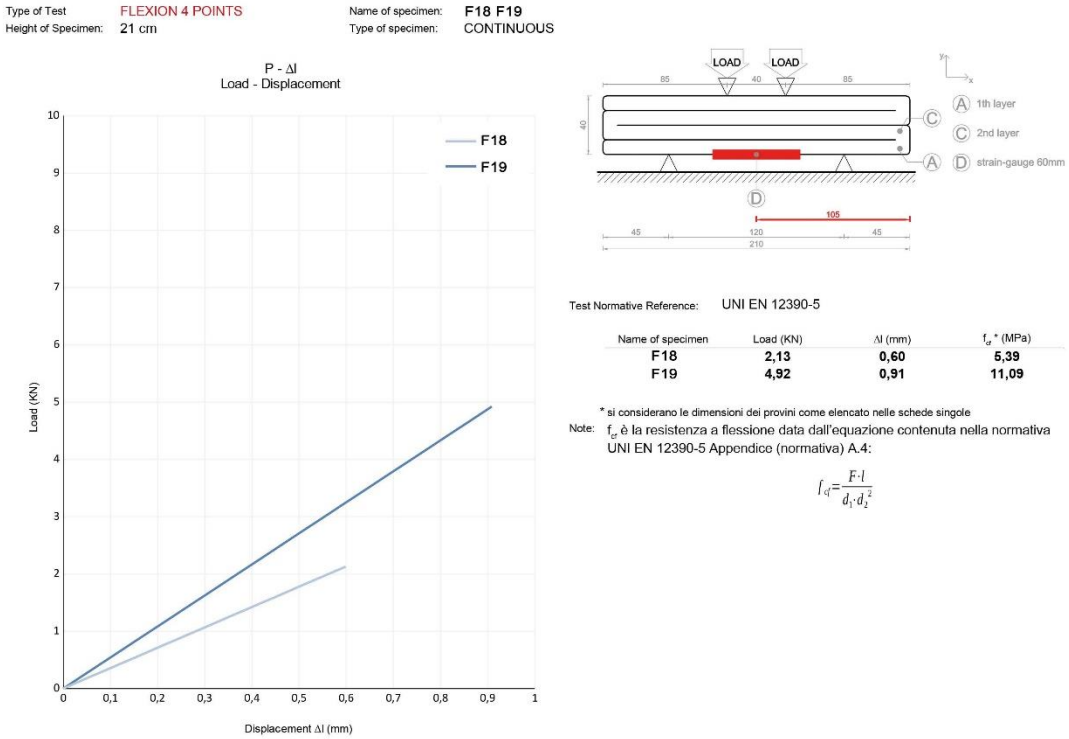


Fig. 4.1.3.1: Scheda A.3 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F18, F19

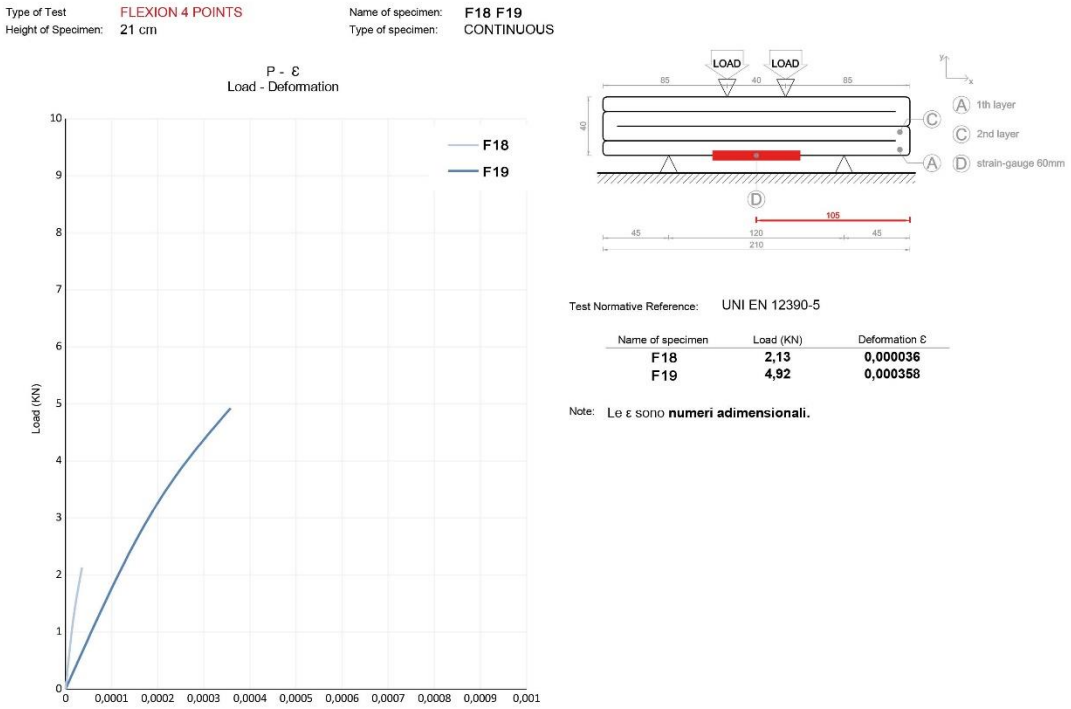


Fig. 4.1.3.16: Scheda B.3 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F18, F19

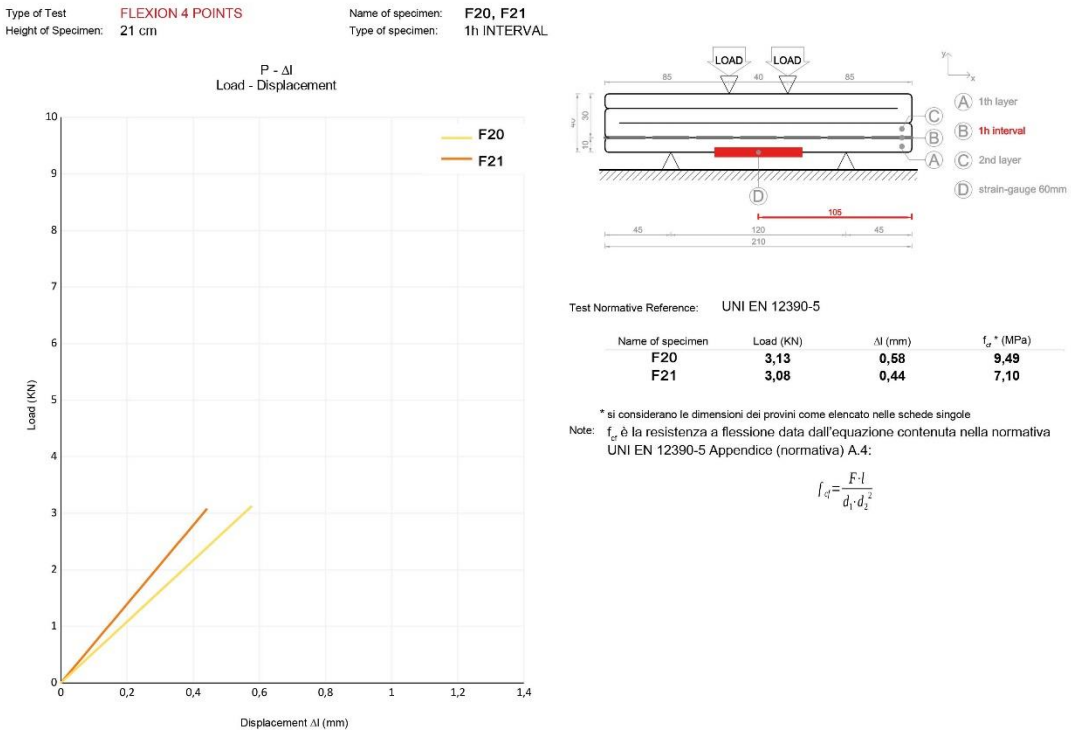


Fig. 4.1.3.17: Scheda C.3 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F20, F21

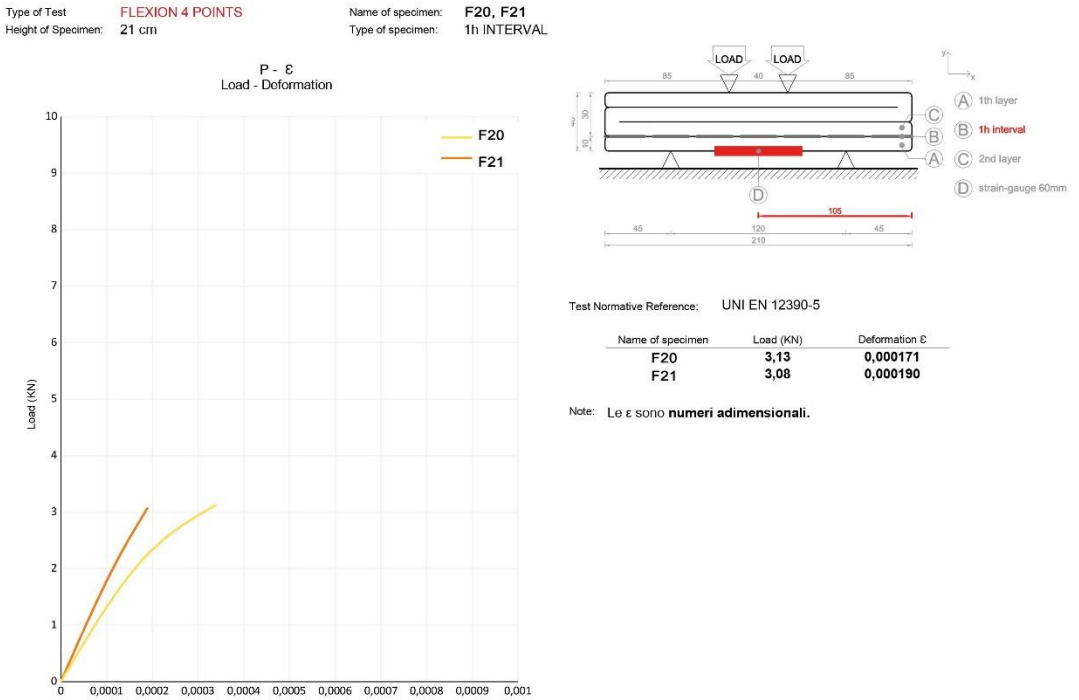


Fig. 4.1.3.18: Scheda D.3 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F20, F21

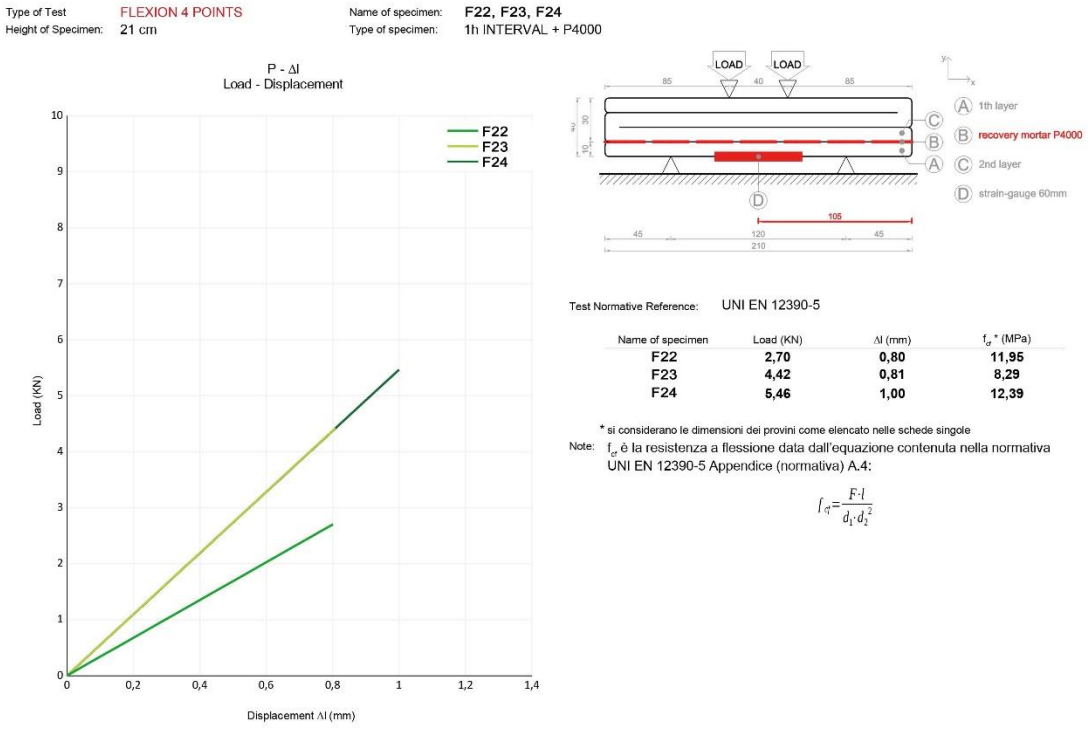


Fig. 4.1.3.19: Scheda E.3 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione sui provini F22, F23, F24

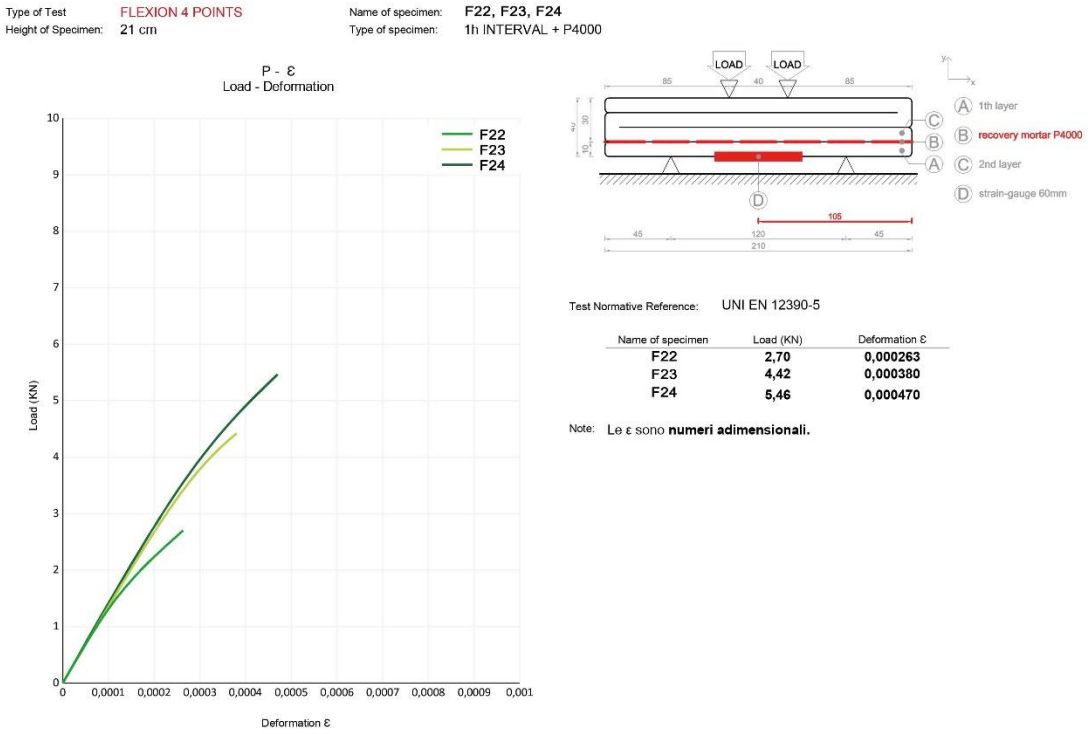


Fig. 4.1.3.20: Scheda F.3 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione sui provini F22, F23, F24

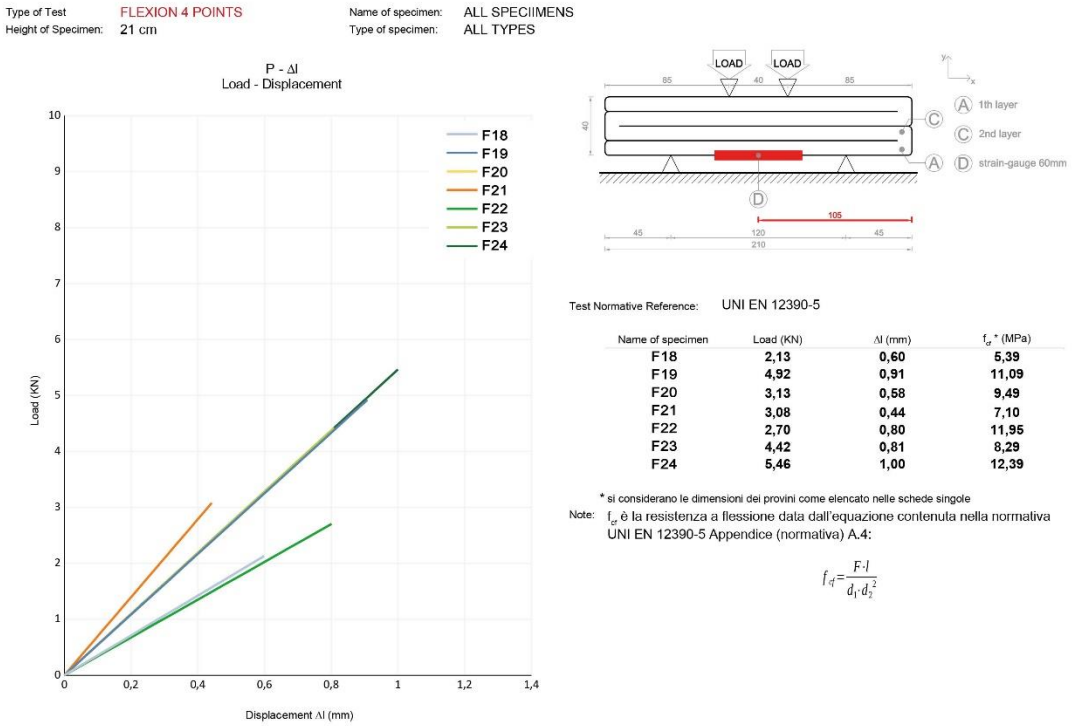


Fig. 4.1.3.21: Scheda G.3 – Grafico Carico-Spostamento dei test a flessione su tutti i provini 4x4x21

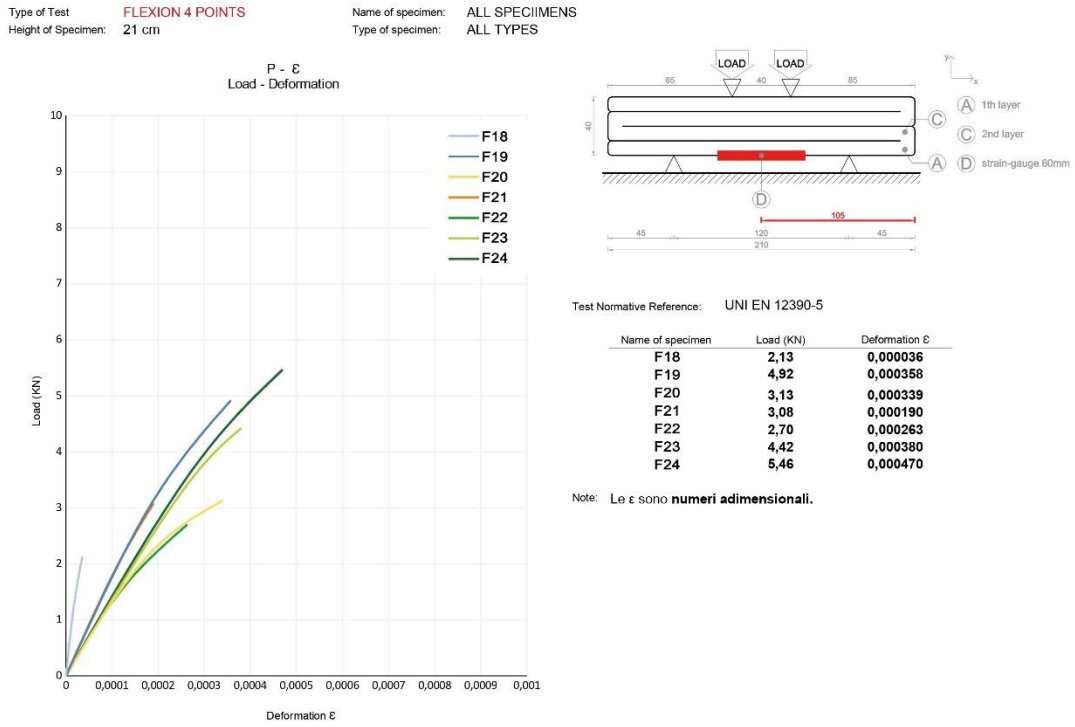


Fig. 4.1.3.22: Scheda H.3 – Grafico Carico-Deformazione dei test a flessione su tutti i provini 4x4x21

Nella prova di flessione a quattro punti, il provino F22 ha un valore di resistenza alla flessione superiore del 21% rispetto al provino F20 e del 55% superiore al provino F18. Si può concludere che la prova effettuata sul provino F18 non è da considerarsi valida in quanto anche il valore della deformazione a cui è stato sottoposto l'estensimetro è inferiore dell'86% rispetto al valore estratto dall'estensimetro del provino F22. Nei test a flessione su quattro punti con provini di lunghezza 21cm, l'energia di frattura più alta calcolata è del provino F22 il quale ha un valore superiore del 34% rispetto all'energia di frattura del provino F20. Questo implica che il provino F22 sia più rigido. Questa differenza è data dalla qualità della stampa (che risulta più fluida) e dal valore più alto di deformazione (ε_{F22} = 0,00314). Calcolando l'energia di frattura media di tutti i provini suddivisi per lunghezza si ottiene che: $G_{f\,F9}$ = 0,005858 N/mm; $G_{f\,F17}$ = 0,004503 N/mm; $G_{f\ F9}$ = 0,002370 N/mm. Emerge che all'aumentare della lunghezza, mantenendo la sezione trasversale di dimensioni costanti (4cm x 4cm), l'energia di frattura diminuisce. Si evidenzia infine che per tutti i provini realizzati con stampa continua (F1 e F10, ad eccezione del provino F18) l'energia calcolata è maggiore rispetto alle altre tipologie di stampa. Infine si evidenzia che, ad eccezione del provino F22, gli altri due provini realizzati con malta per la ripresa di getto (F7 e F16) hanno valori di energia nettamente inferiori rispetto ai provini realizzati con le altre due tipologie.

4.1.4. Test delle Triplette

I test delle triplette sono stati realizzati seguendo le indicazioni della normativa EN UNI 1052-3 e come indicato nel design delle prove, ai singoli provini sono stati applicati estensimetri a filo ai lati del provino e i test sono stati eseguiti in controllo di forza (50 N/s). Di seguito vengo presentate le schede con al loro interno i grafici estrapolati dalle prove correlati dalle foto prima e dopo il test. Le schede si suddividono come segue:

- Scheda 1: presenta il diagramma di forza-spostamento; la curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).
- Scheda 2: presenta il diagramma di forza-deformazione dei due estensimetri a filo e la curva ha come asse delle ascisse la deformazione degli estensimetri ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm). Come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN). Il grafico è diviso in due quadranti per indagare le sollecitazioni degli estensimetri sollecitati a compressione e/o trazione.
- Scheda 3: presenta il diagramma di forza-deformazione (media) in cui la curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli strain-gauges ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

Di seguito sono esposti tutti i provini testati: dal T1 al T7 con stampa continua, dal T8 al T14 con intervallo temporale e dal T15 al T20 con l'aggiunta della malta additivata.

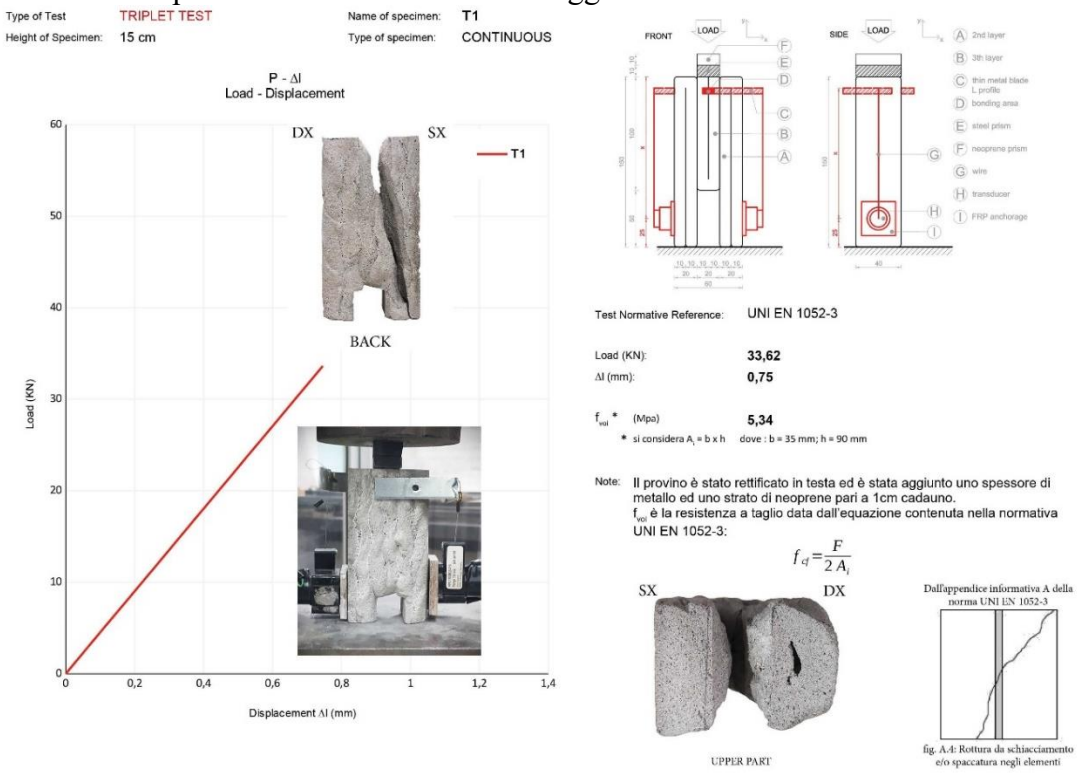


Fig. 4.1.4.1 – Provino T1 – Scheda 1

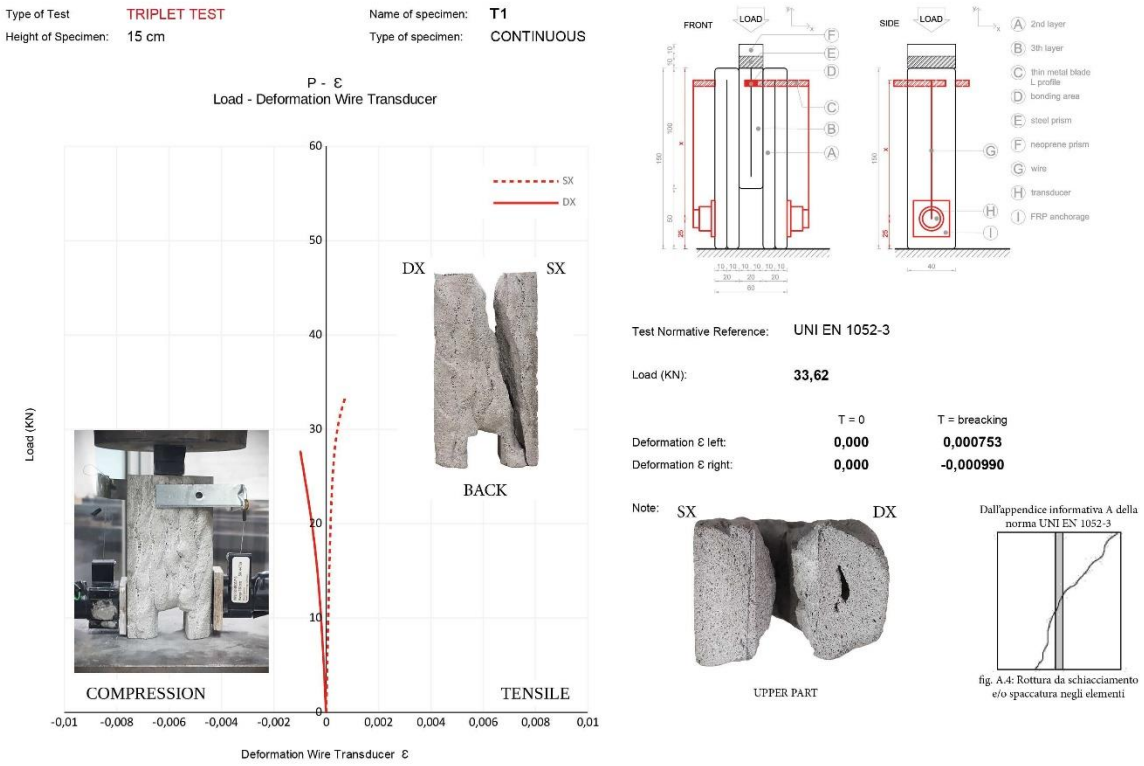


Fig. 4.1.4.2 – Provino T1 – Scheda 2

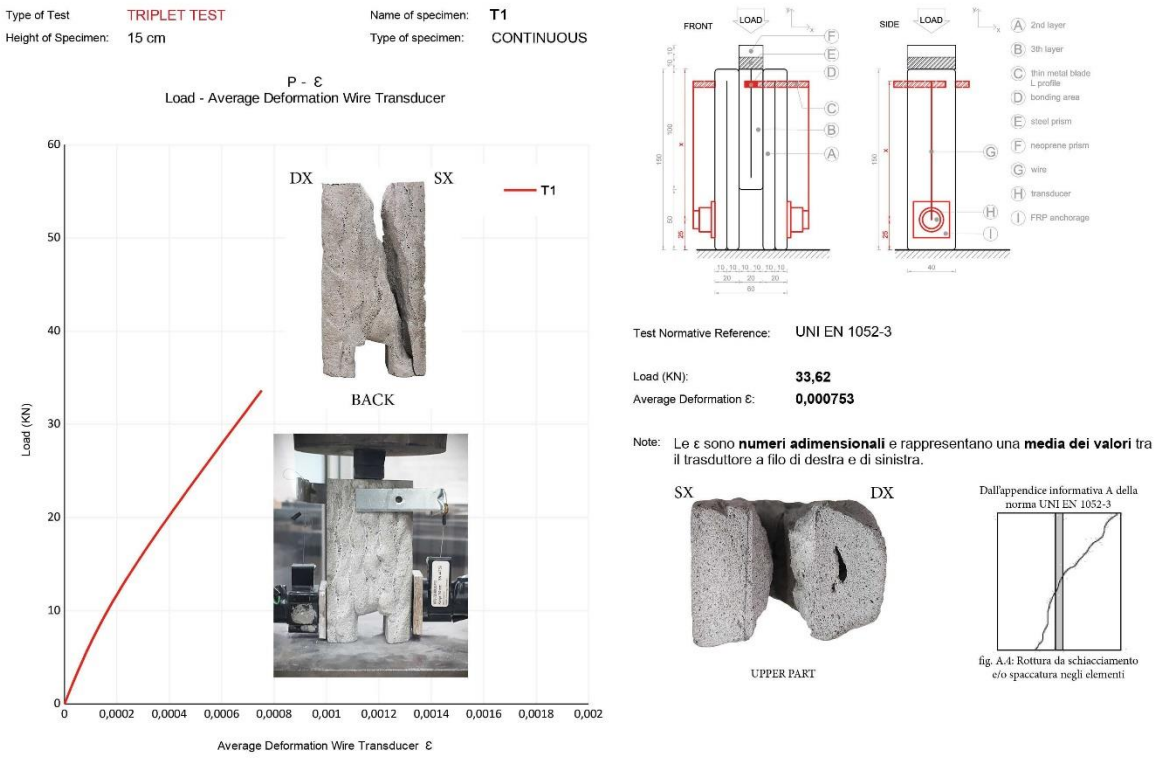


Fig. 4.1.4.3 – Provino T1 – Scheda 3

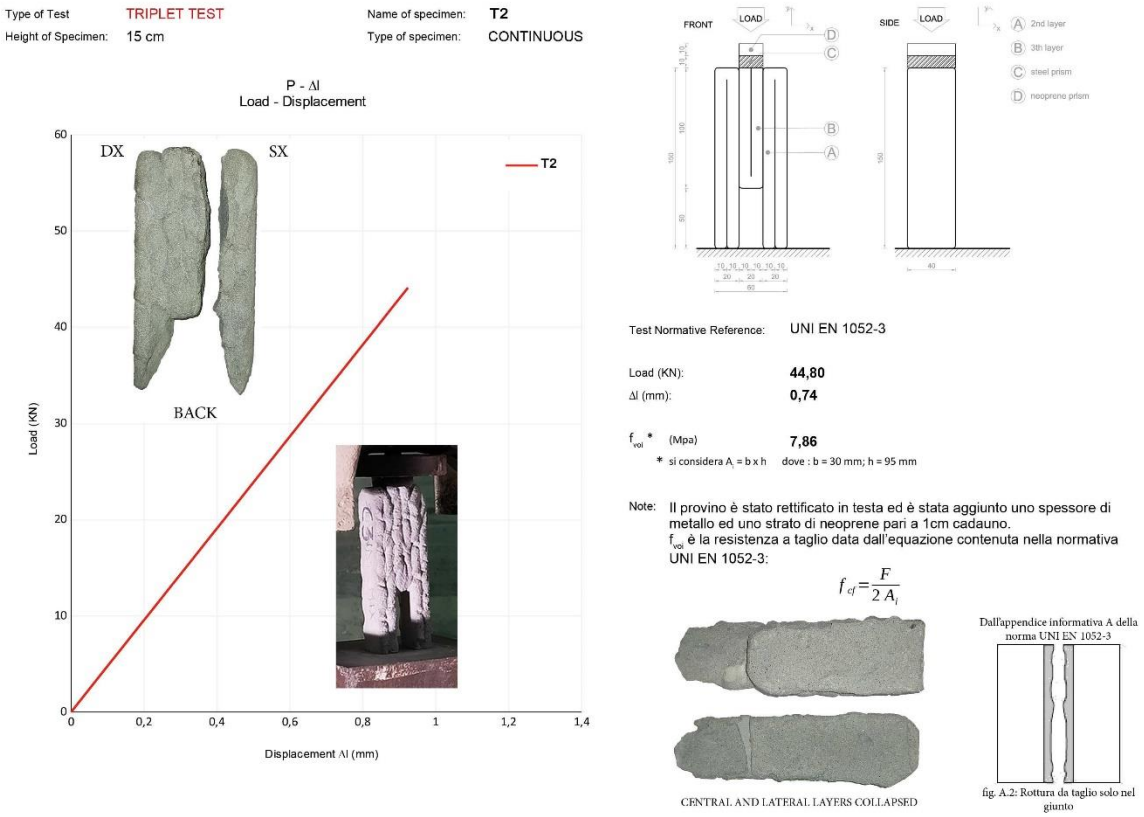


Fig. 4.1.4.4 – Provino T2 – Scheda 1

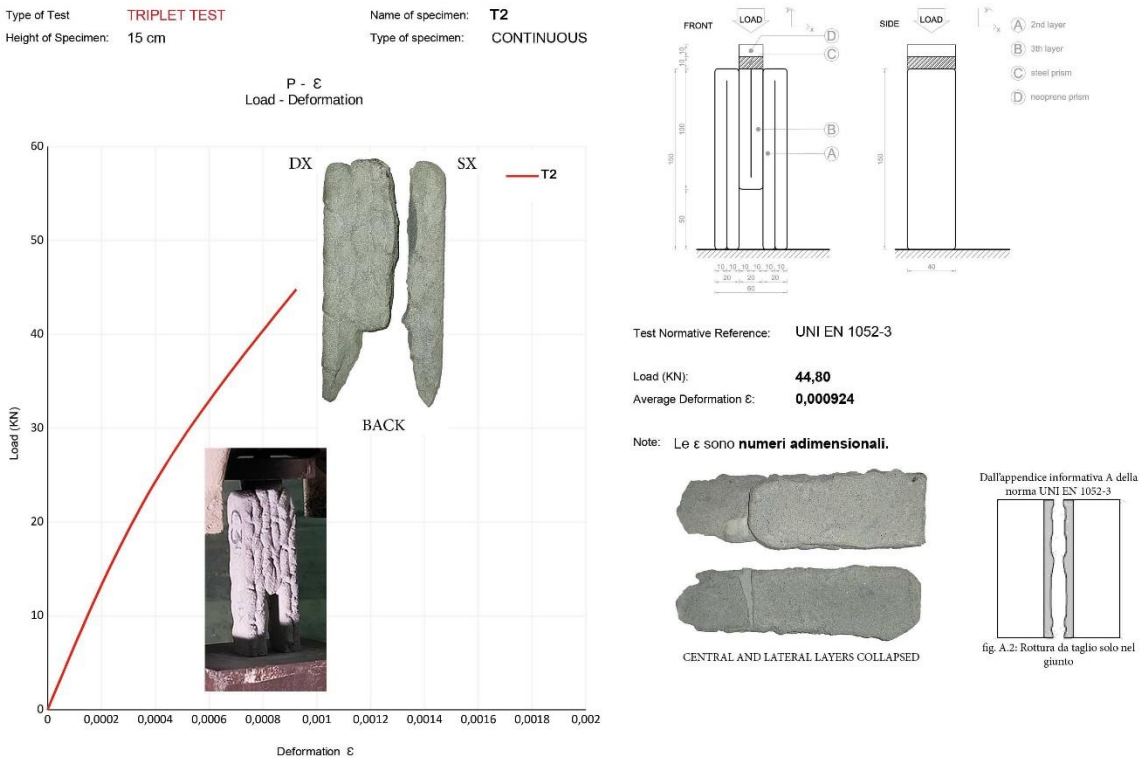


Fig. 4.1.4.5 – Provino T2 – Scheda 2

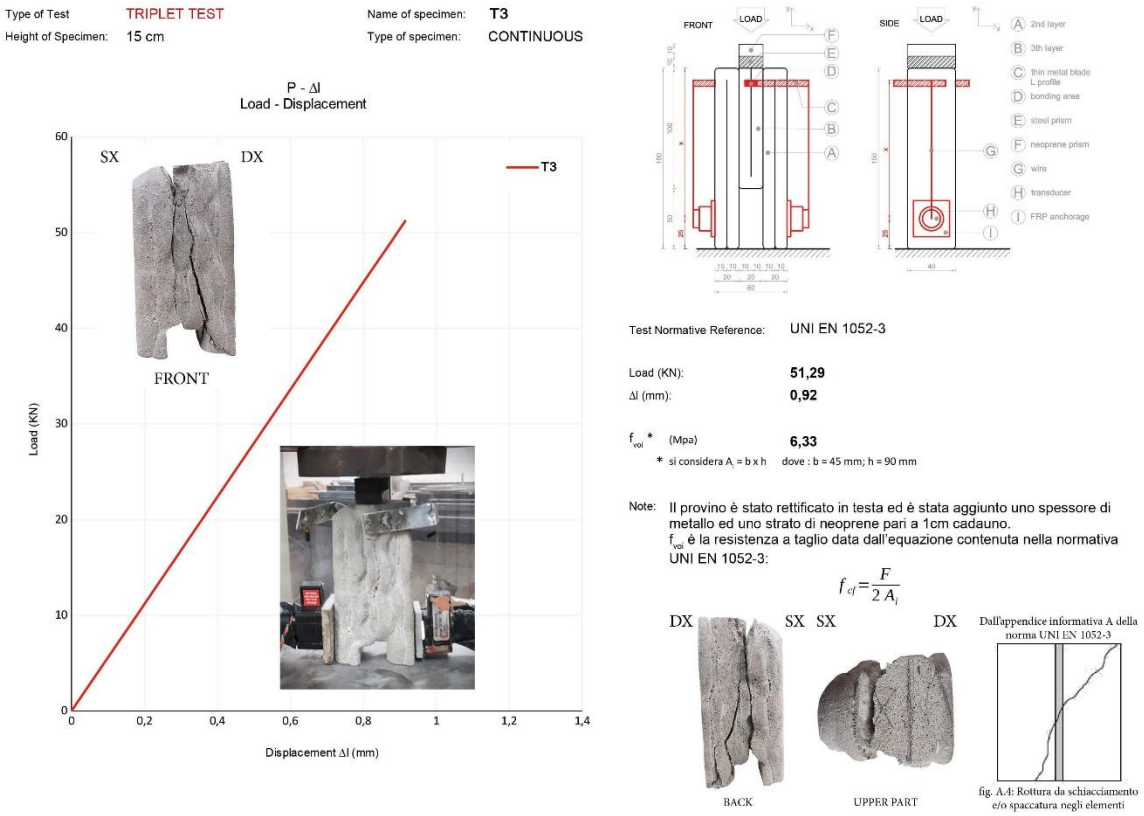


Fig. 4.1.4.6 – Provino T3 – Scheda 1

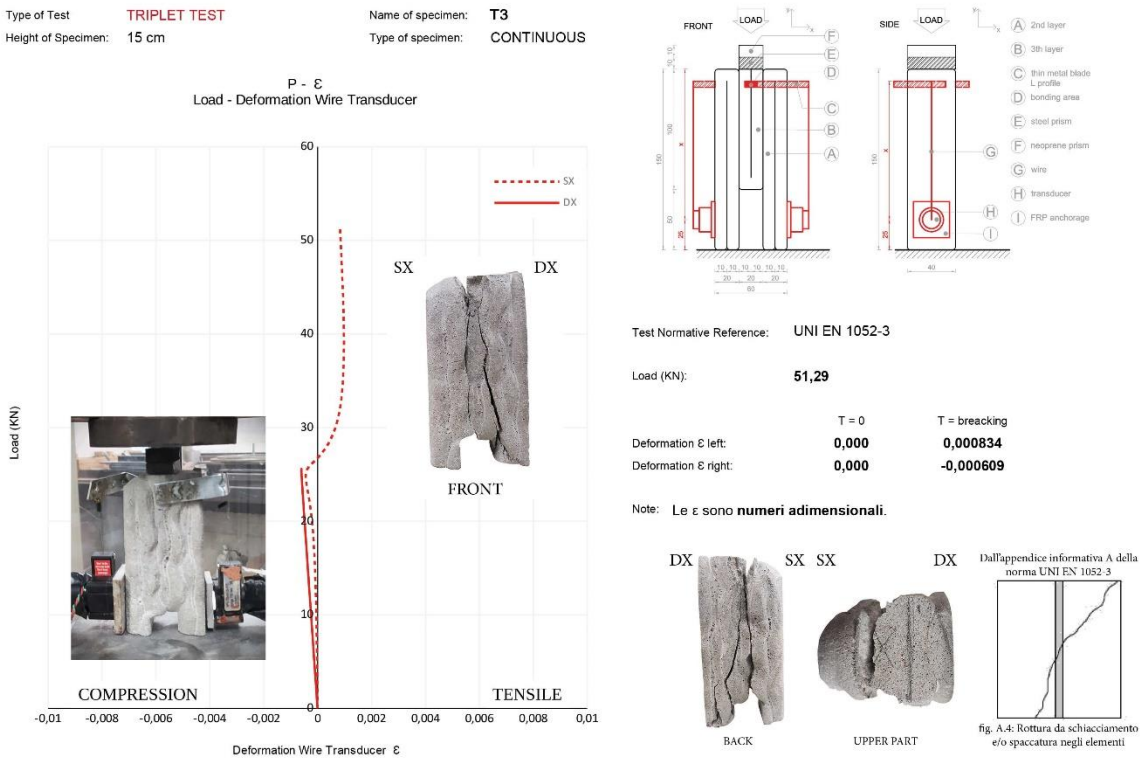


Fig. 4.1.4.7 – Provino T3 – Scheda 2

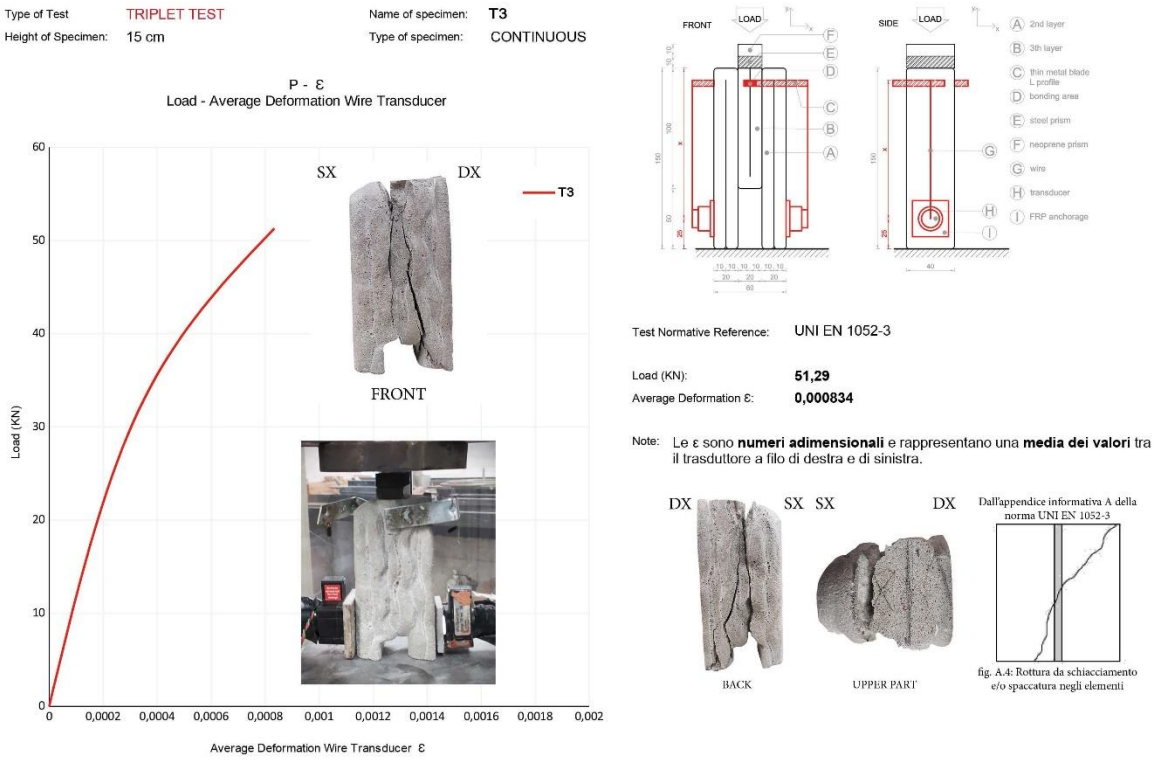


Fig. 4.1.4.8 – Provino T3 – Scheda 3

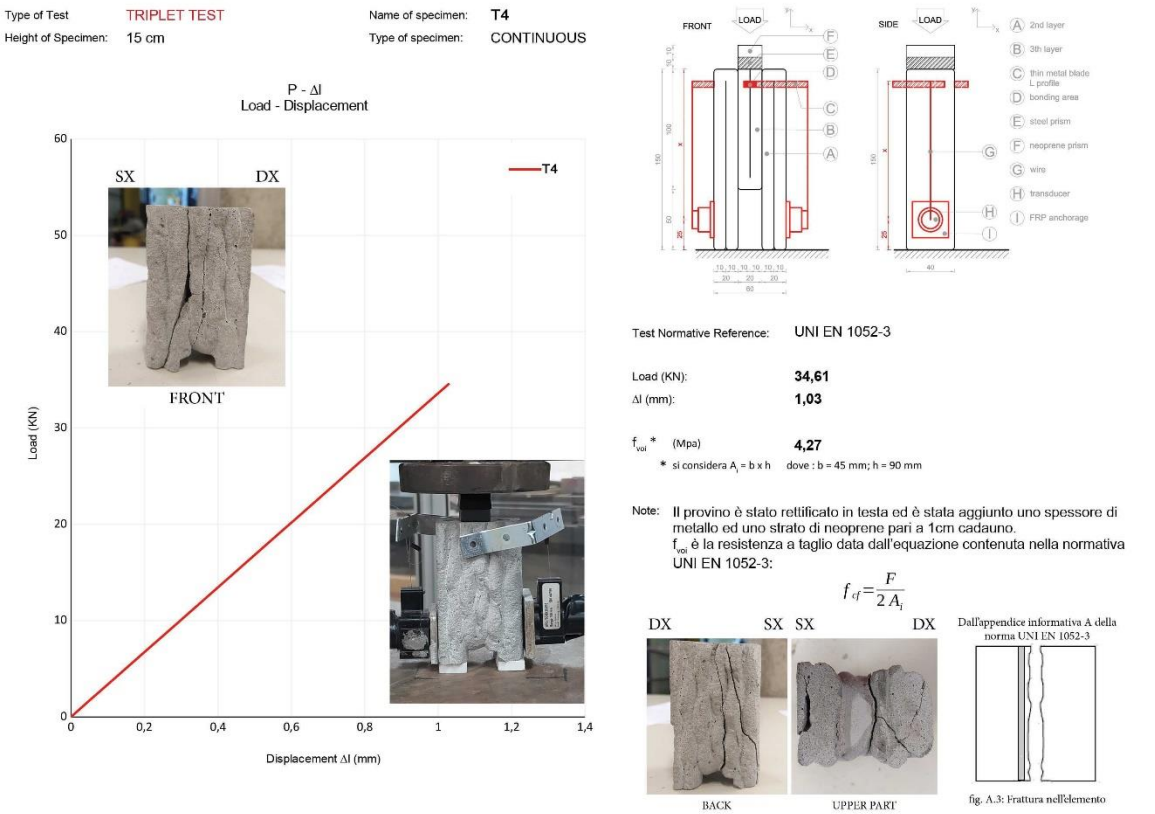


Fig. 4.1.4.9 – Provino T4 – Scheda 1

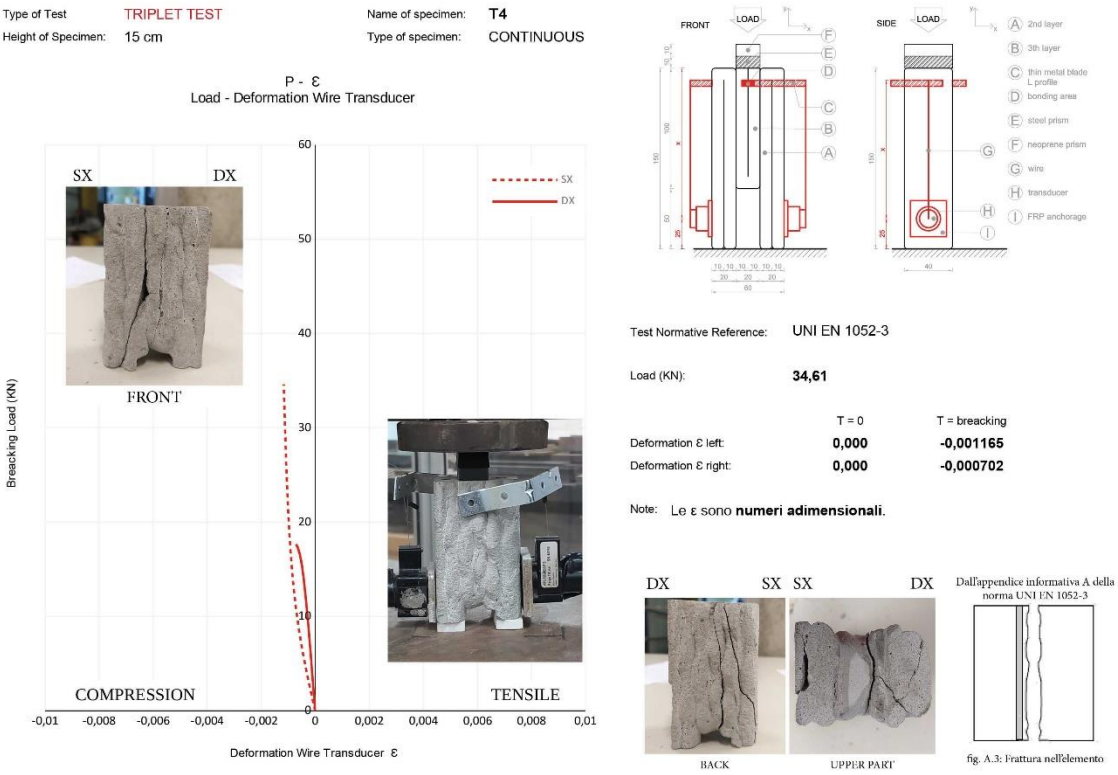


Fig. 4.1.4.10 – Provino T4 – Scheda 2

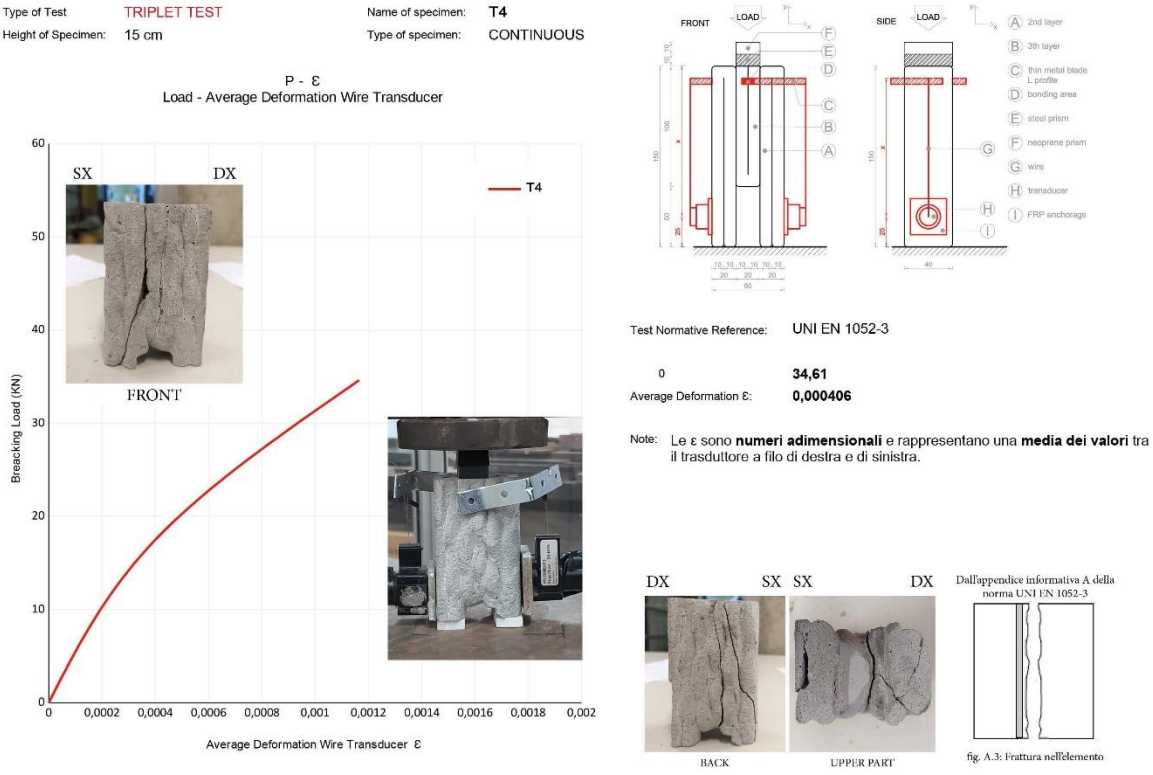


Fig. 4.1.4.11 – Provino T4 – Scheda 3

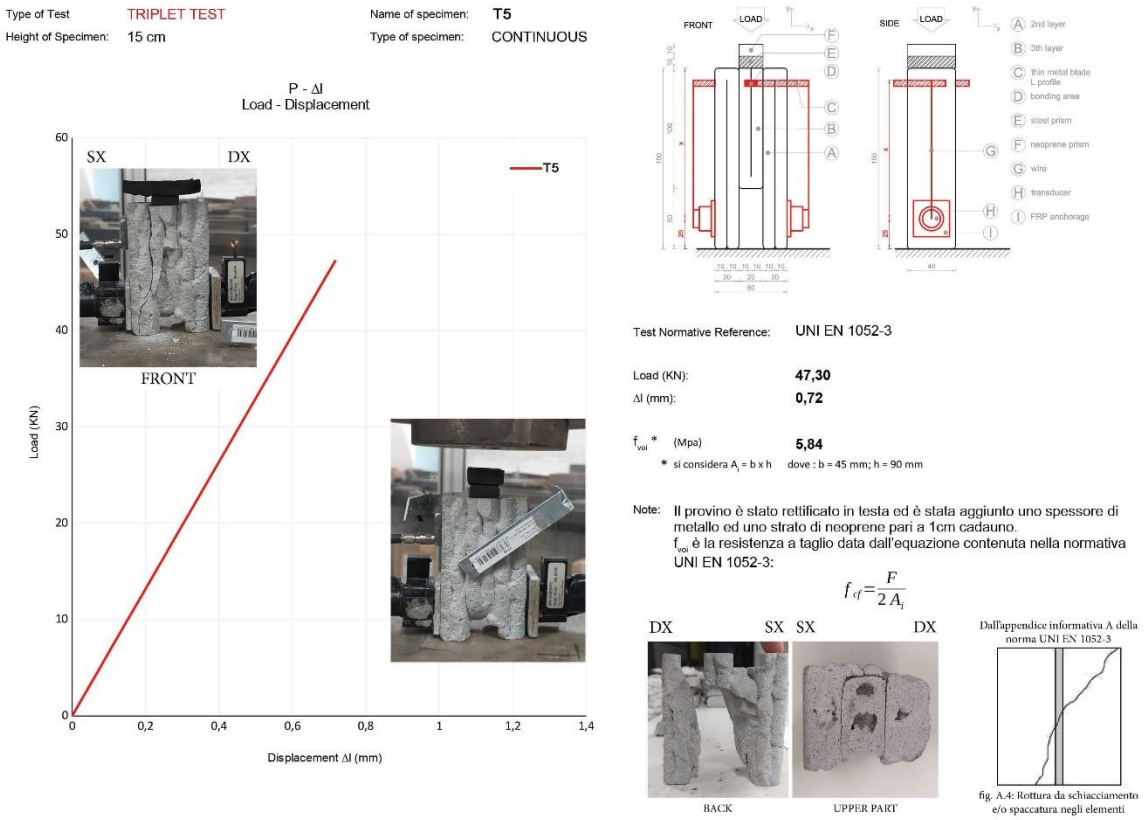


Fig. 4.1.4.12 – Provino T5 – Scheda 1

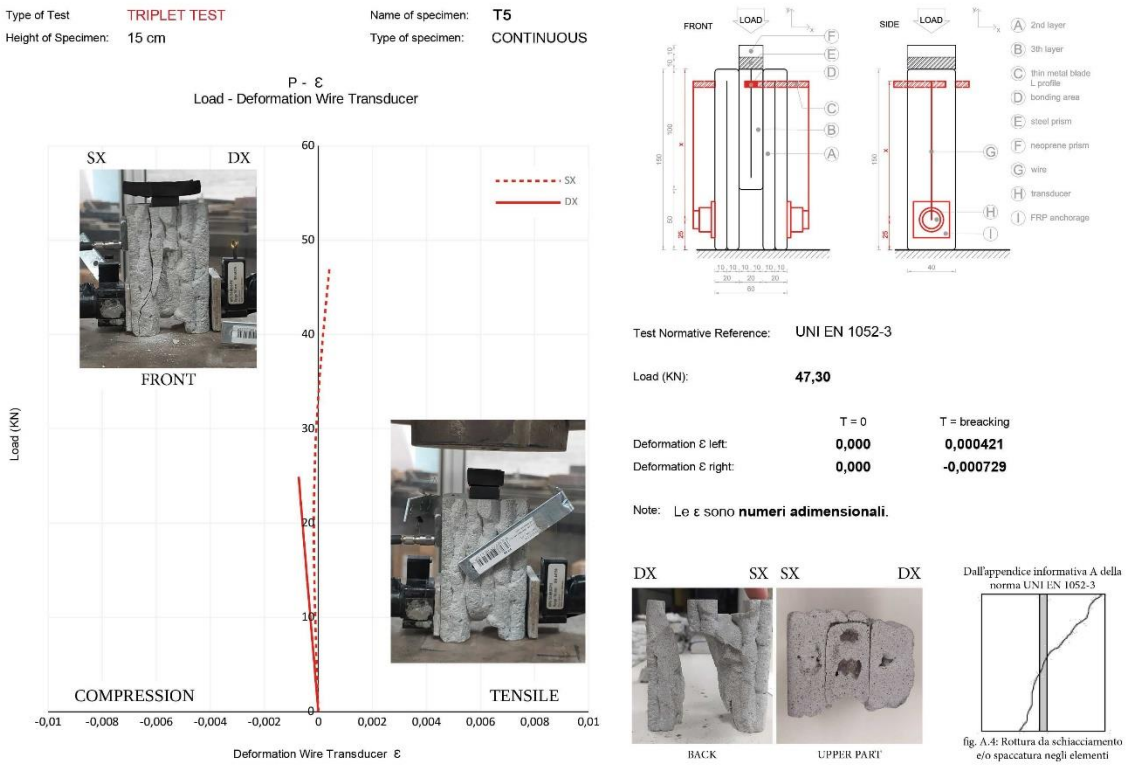


Fig. 4.1.4.13 – Provino T5 – Scheda 2

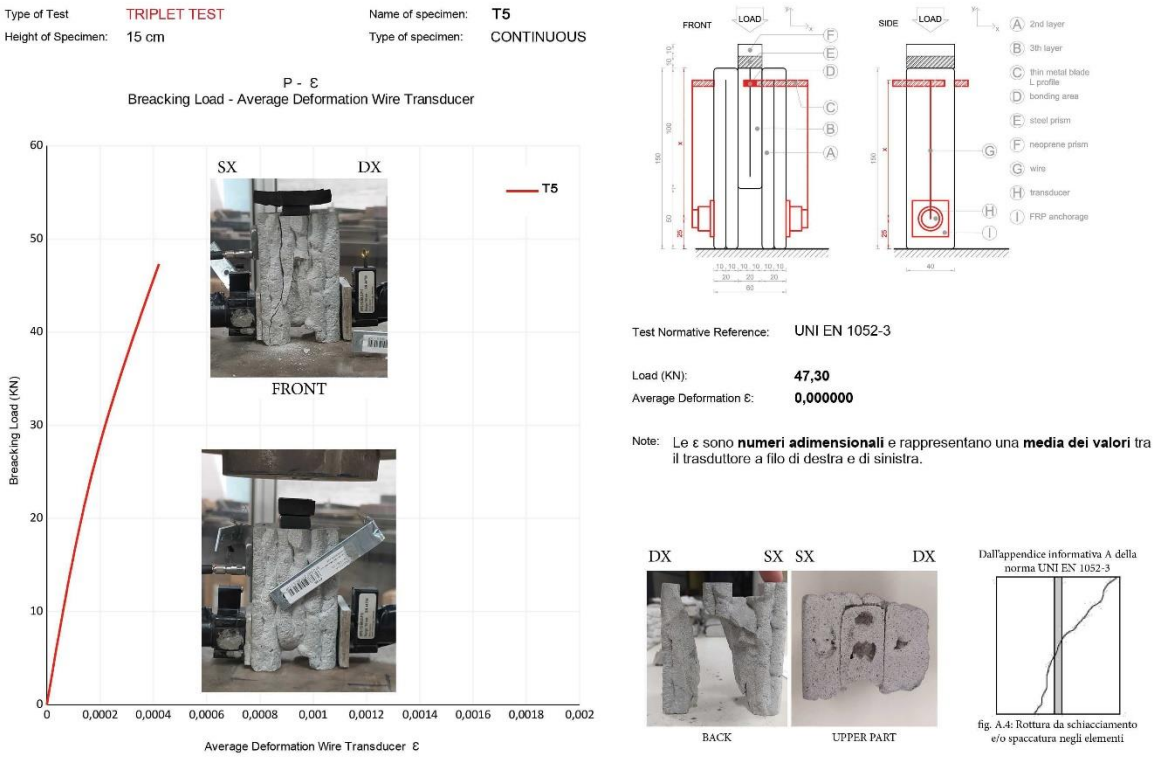


Fig. 4.1.4.14 – Provino T5 – Scheda 3

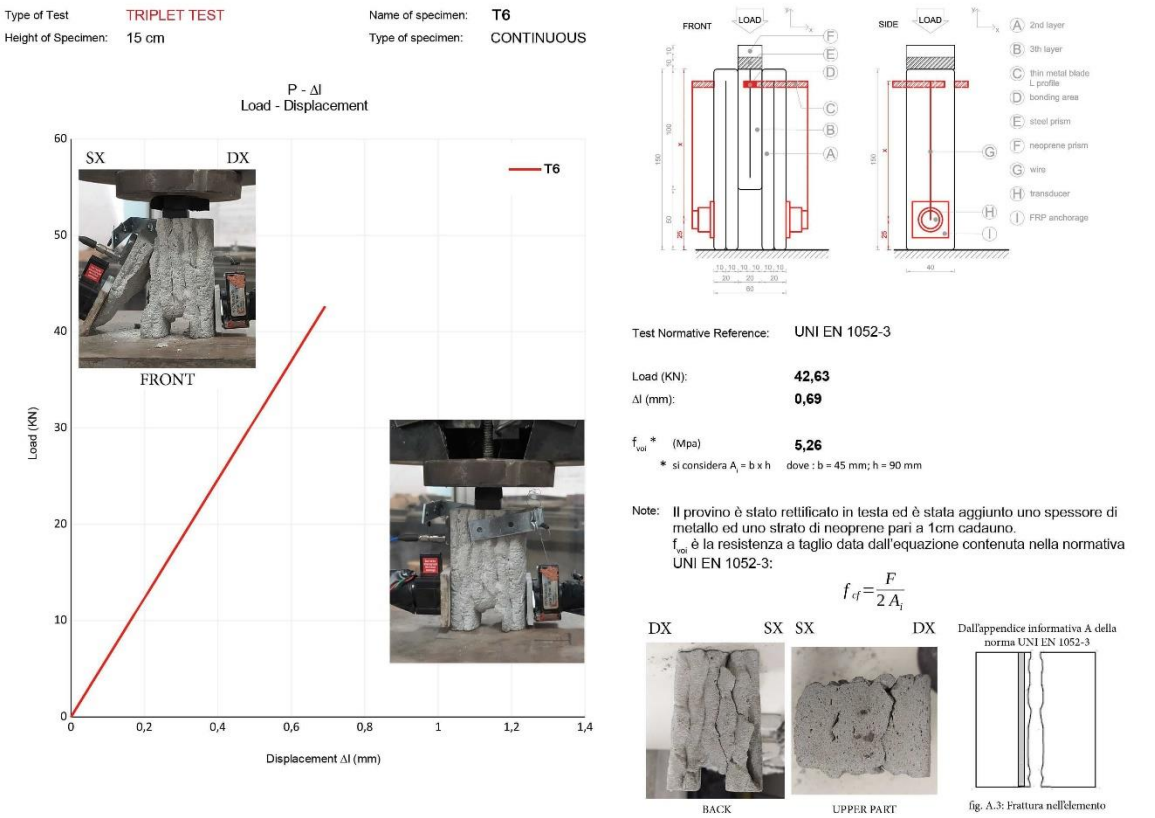


Fig. 4.1.4.15 – Provino T6 – Scheda 1

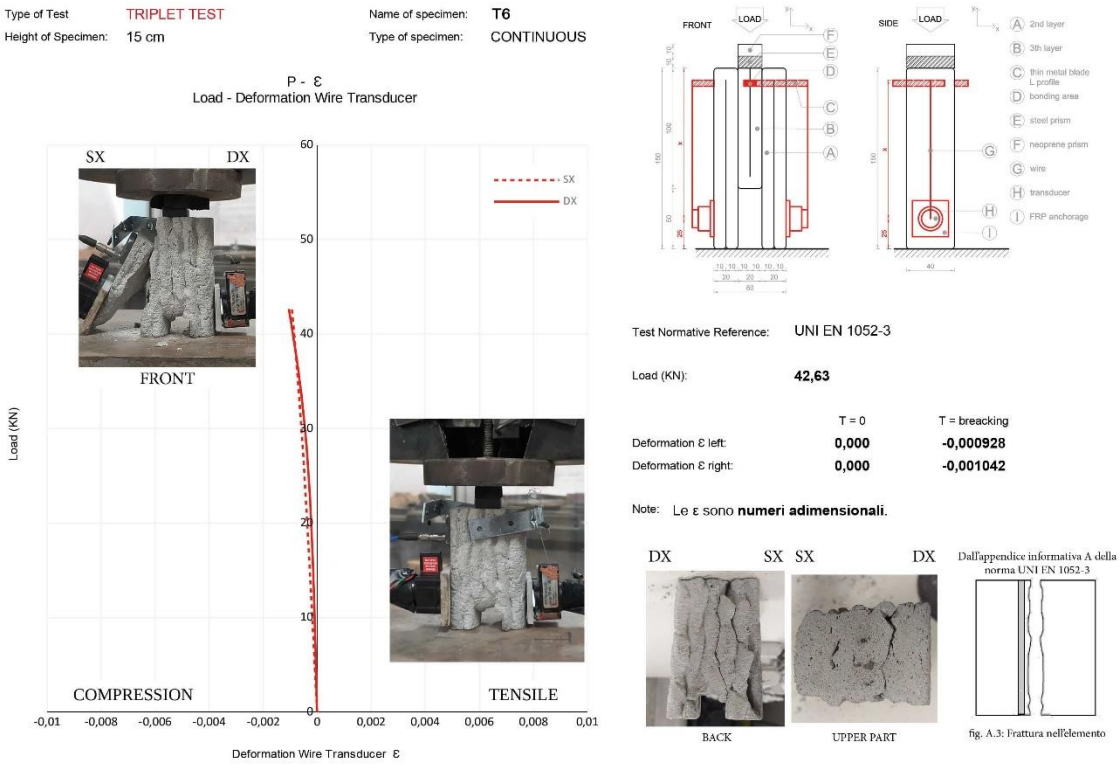


Fig. 4.1.4.16 – Provino T6 – Scheda 2

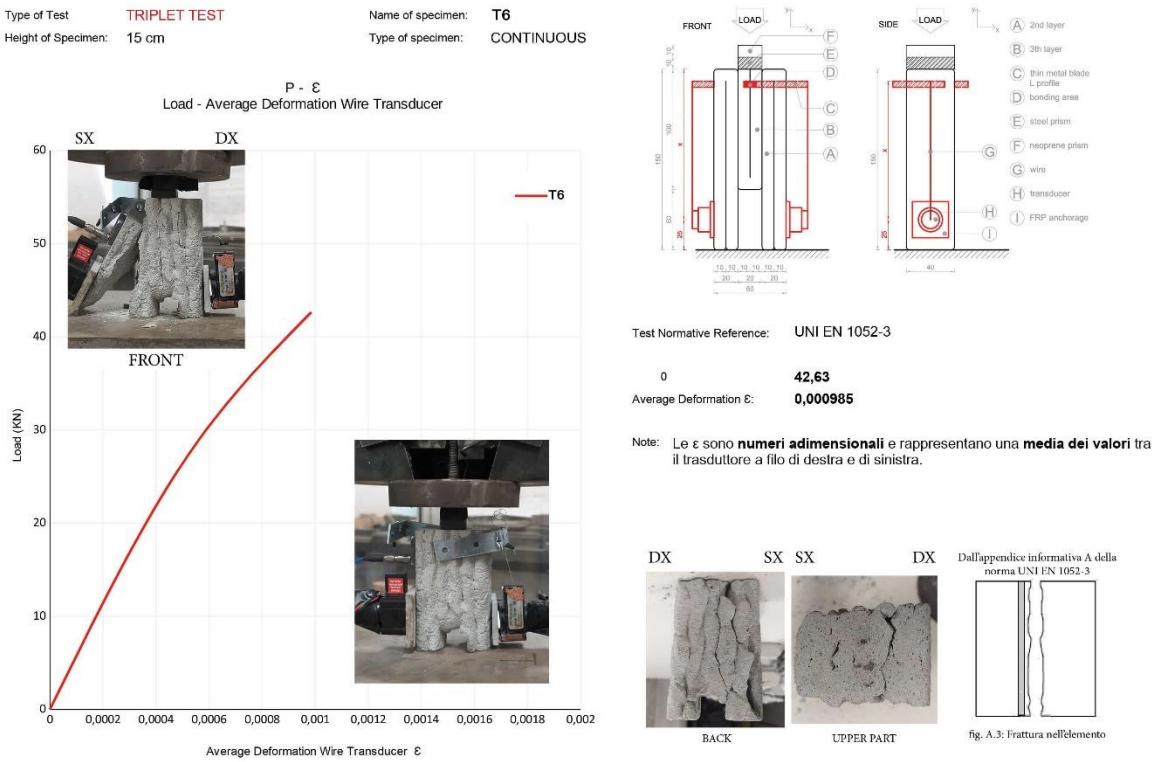


Fig. 4.1.4.17 – Provino T6 – Scheda 3

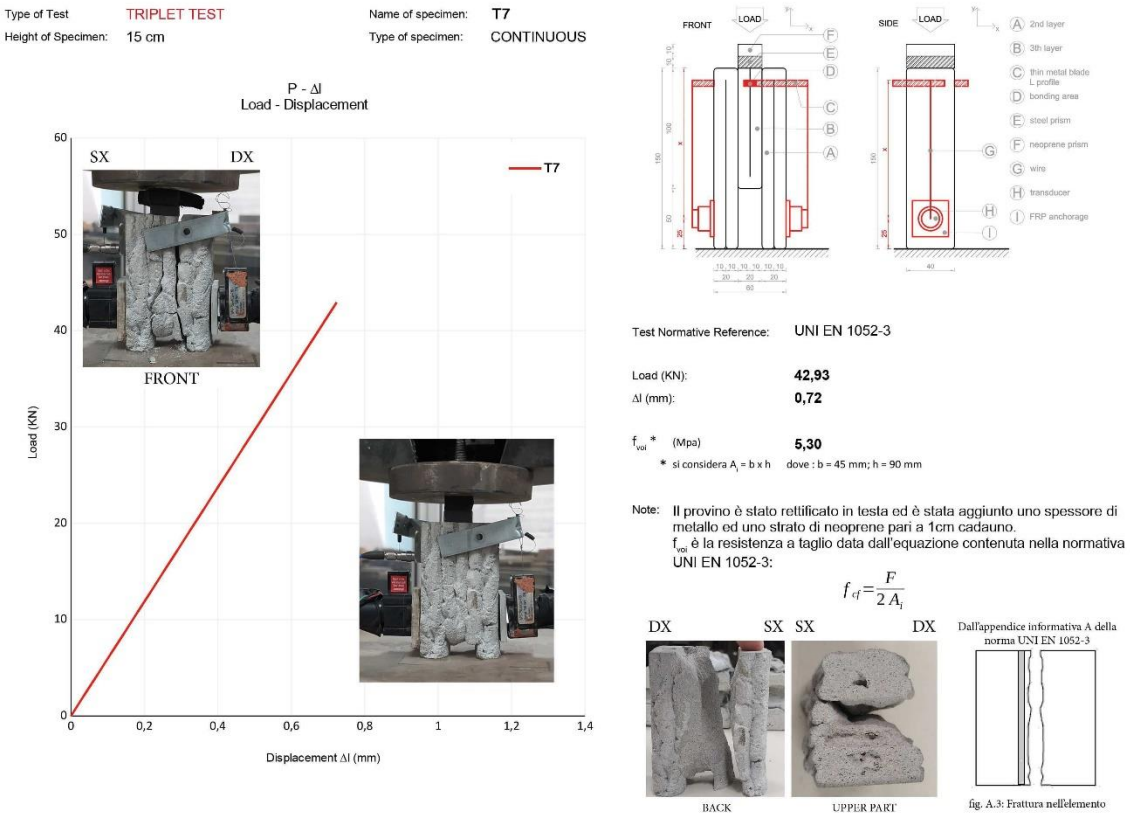


Fig. 4.1.4.18 – Provino T7 – Scheda 1

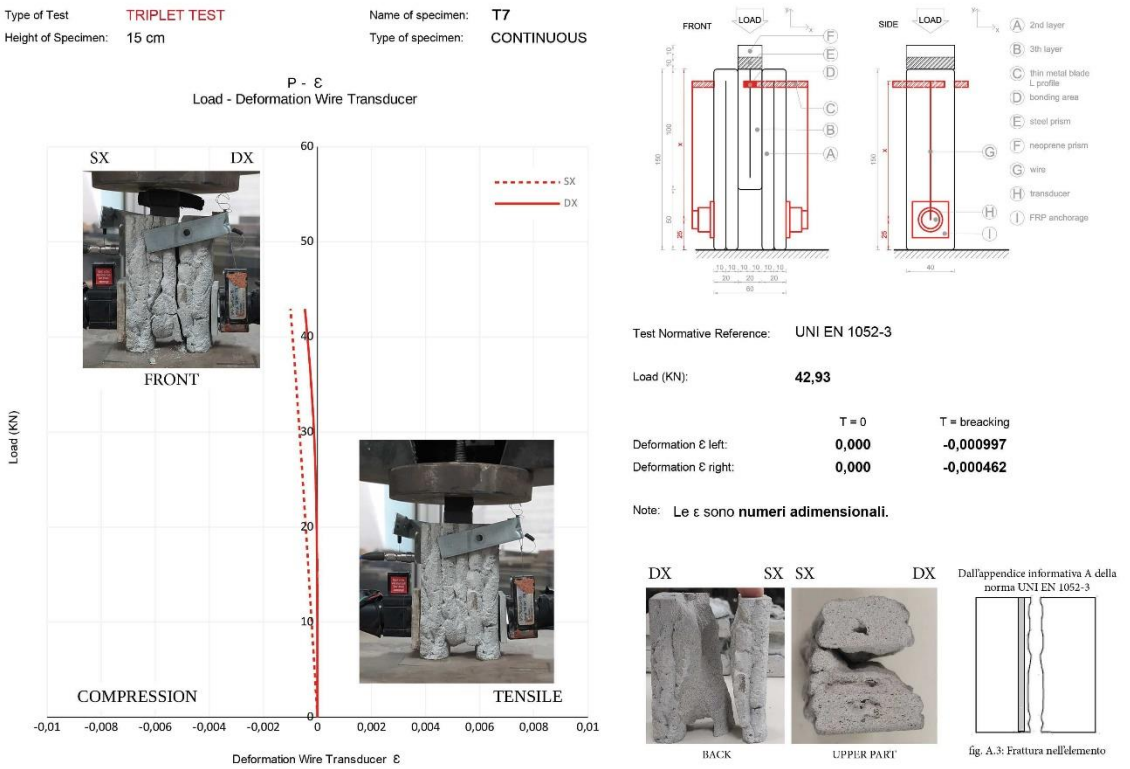


Fig. 4.1.4.19 – Provino T7 – Scheda 2

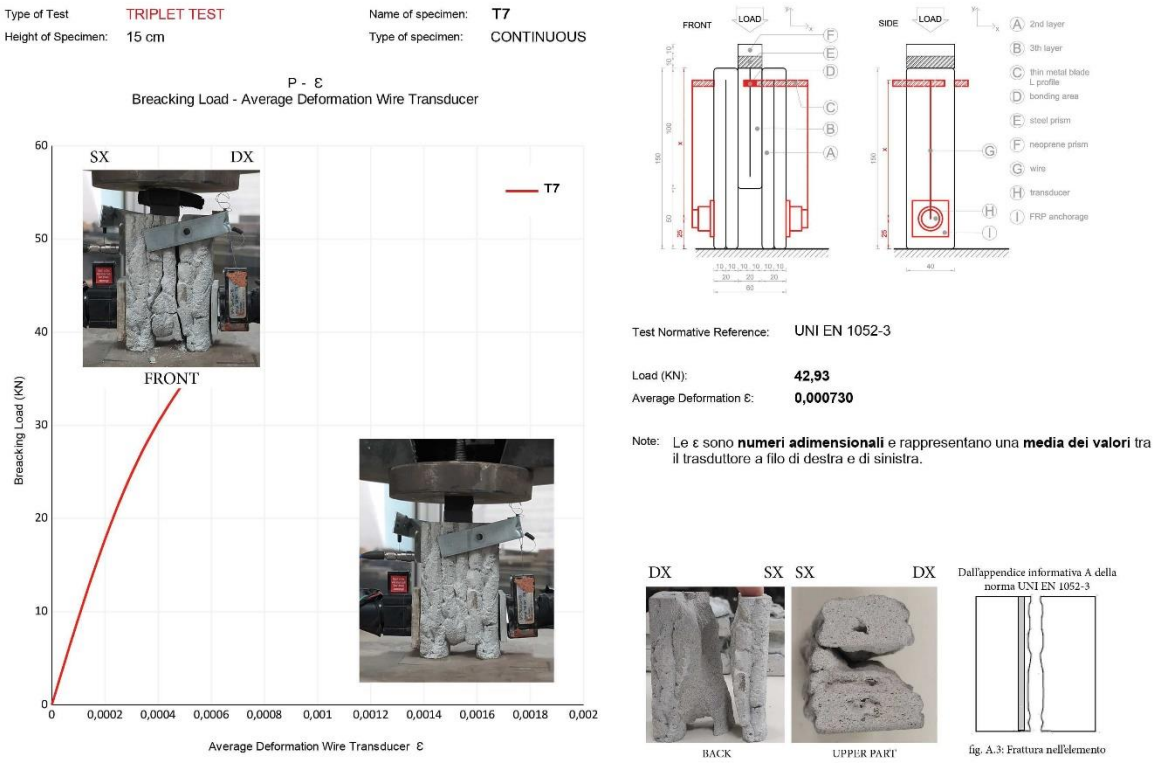


Fig. 4.1.4.20 – Provino T7 – Scheda 3

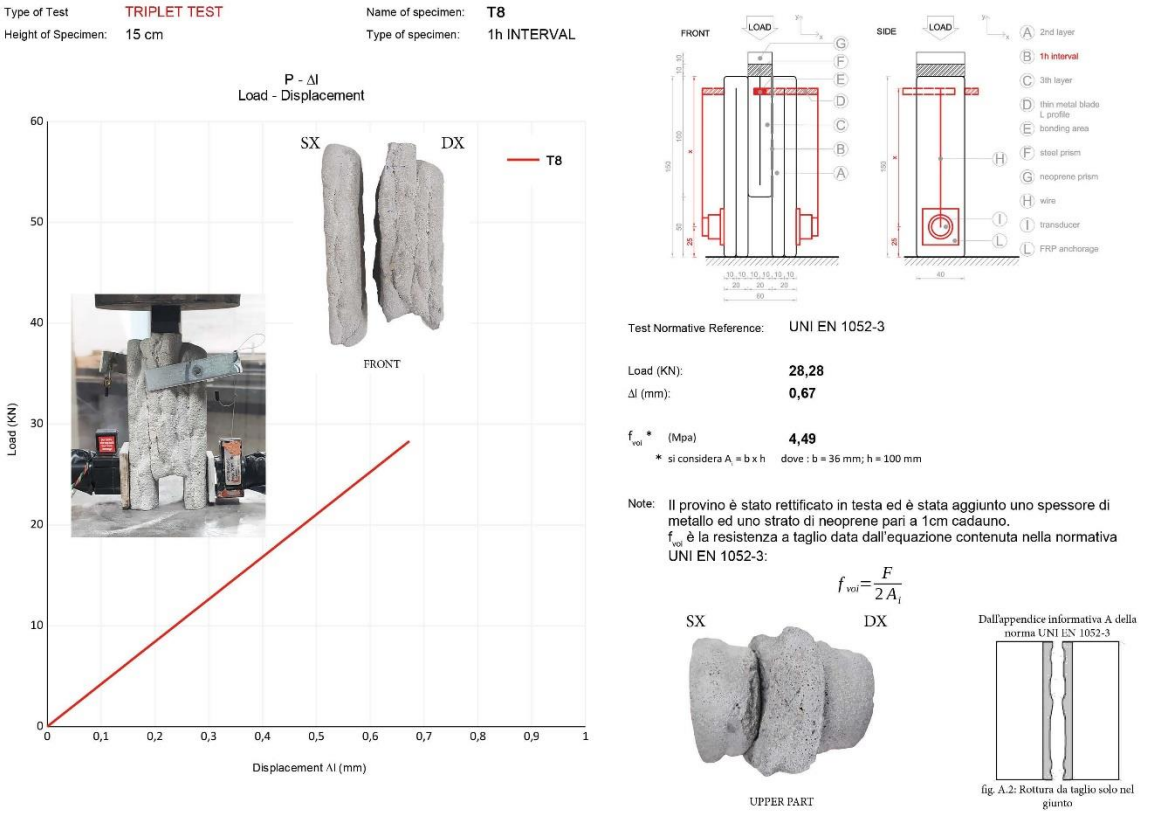


Fig. 4.1.4.21 – Provino T8 – Scheda 1

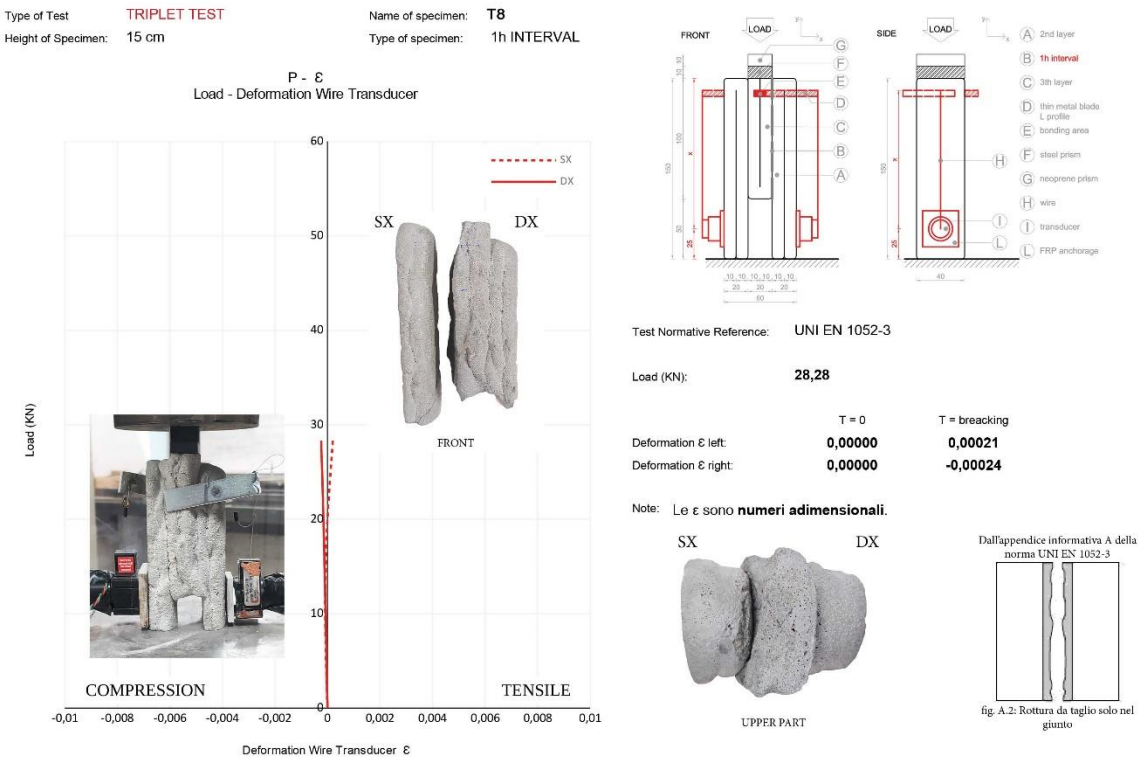


Fig. 4.1.4.22 – Provino T8 – Scheda 2

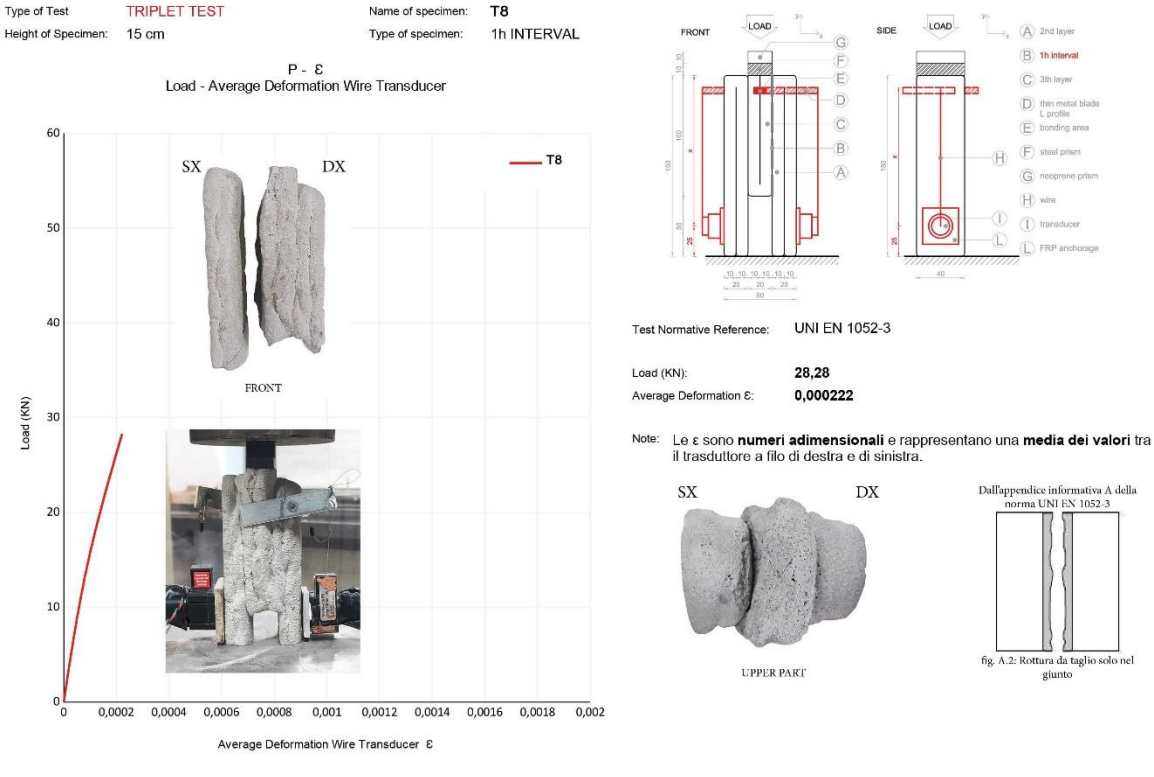


Fig. 4.1.4.23 – Provino T8 – Scheda 3

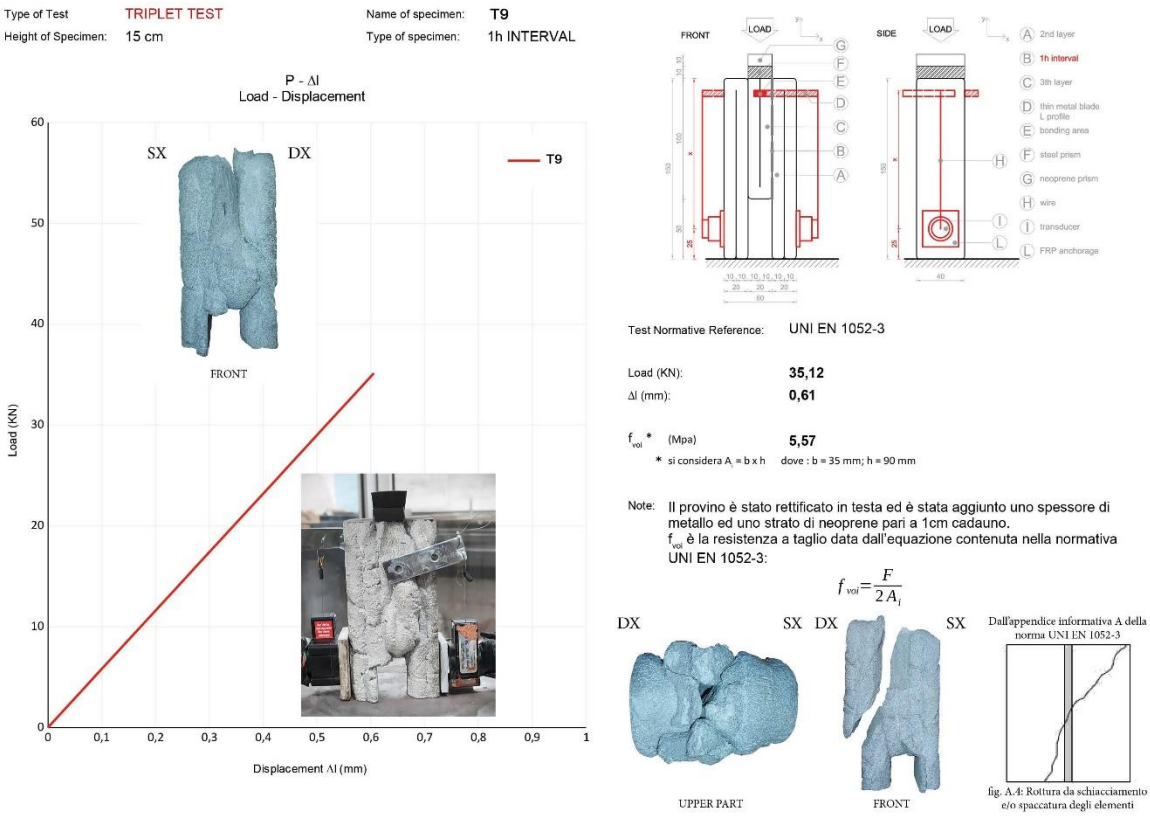


Fig. 4.1.4.24 – Provino T9 – Scheda 1

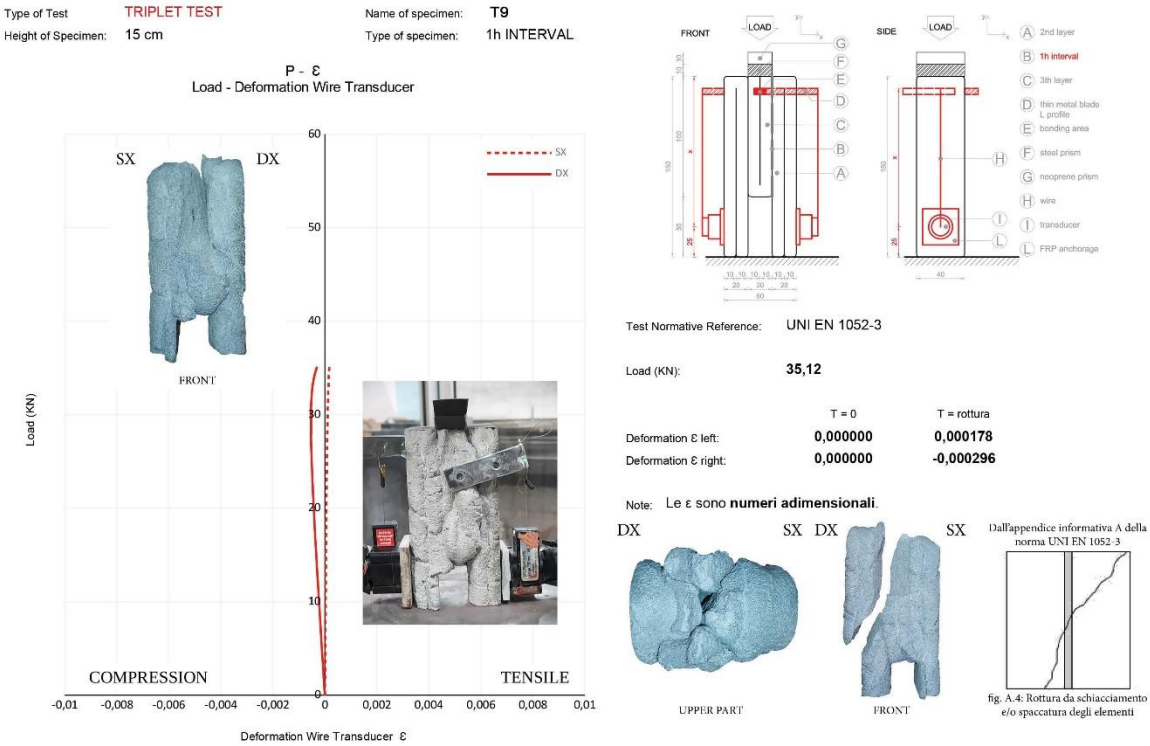


Fig. 4.1.4.25 – Provino T9 – Scheda 2

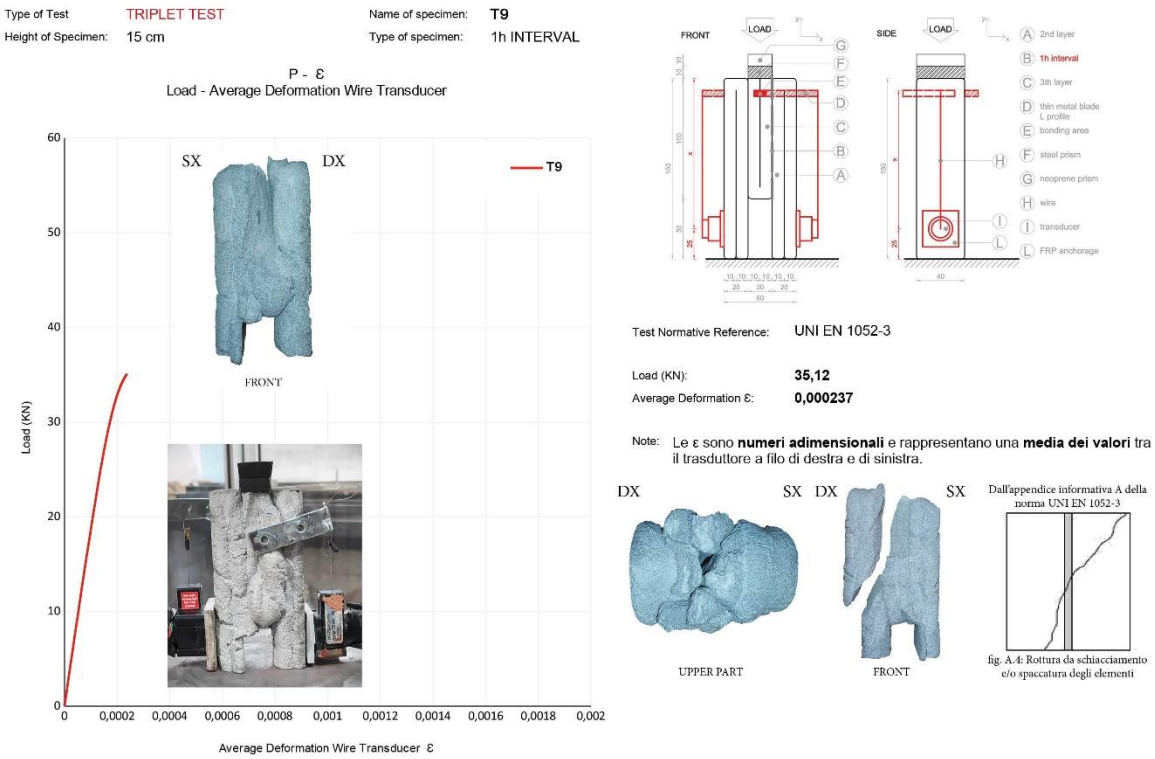


Fig. 4.1.4.26 – Provino T9 – Scheda 3

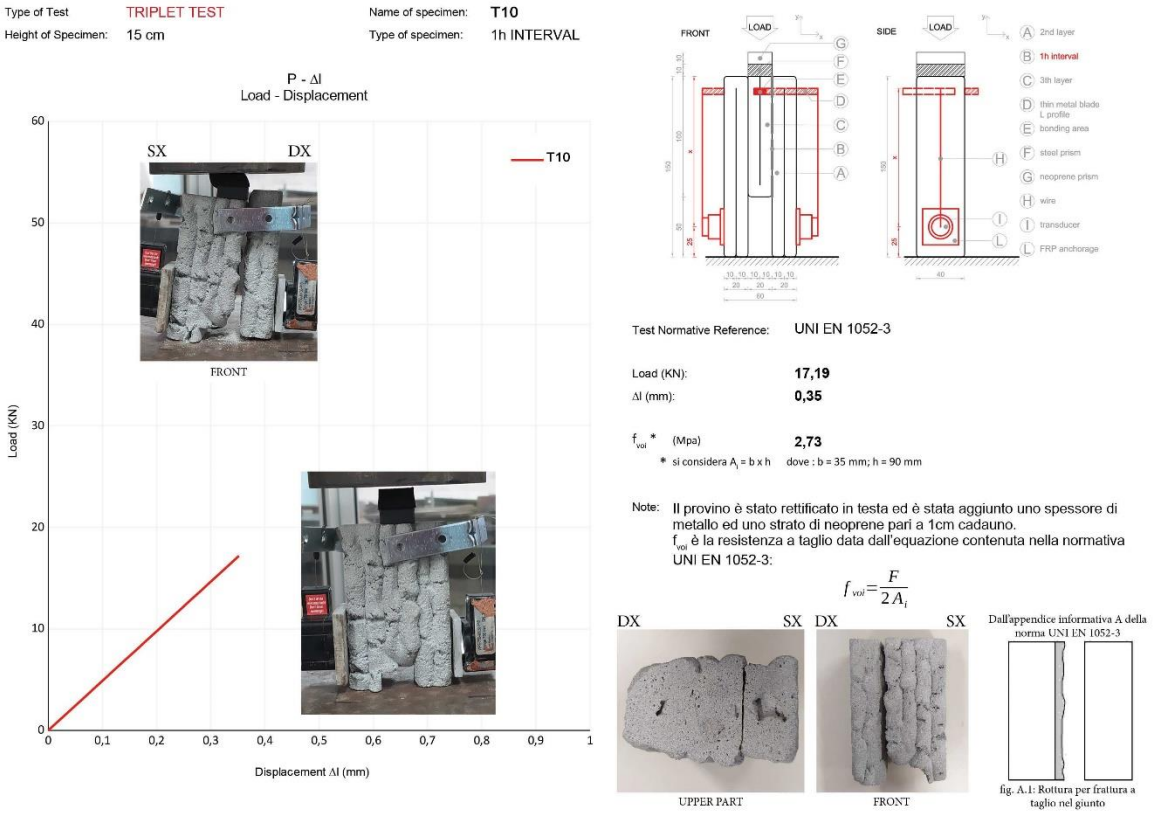


Fig. 4.1.4.27 – Provino T10 – Scheda 1

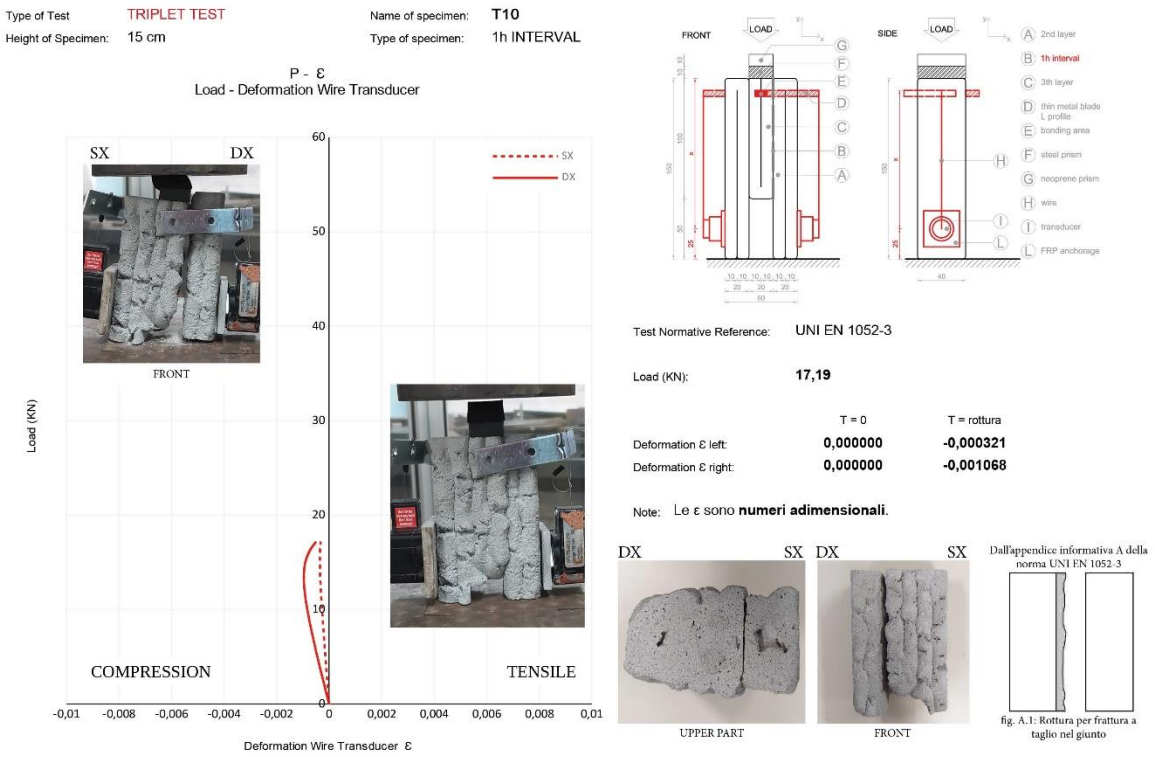


Fig. 4.1.4.28 – Provino T10 – Scheda 2

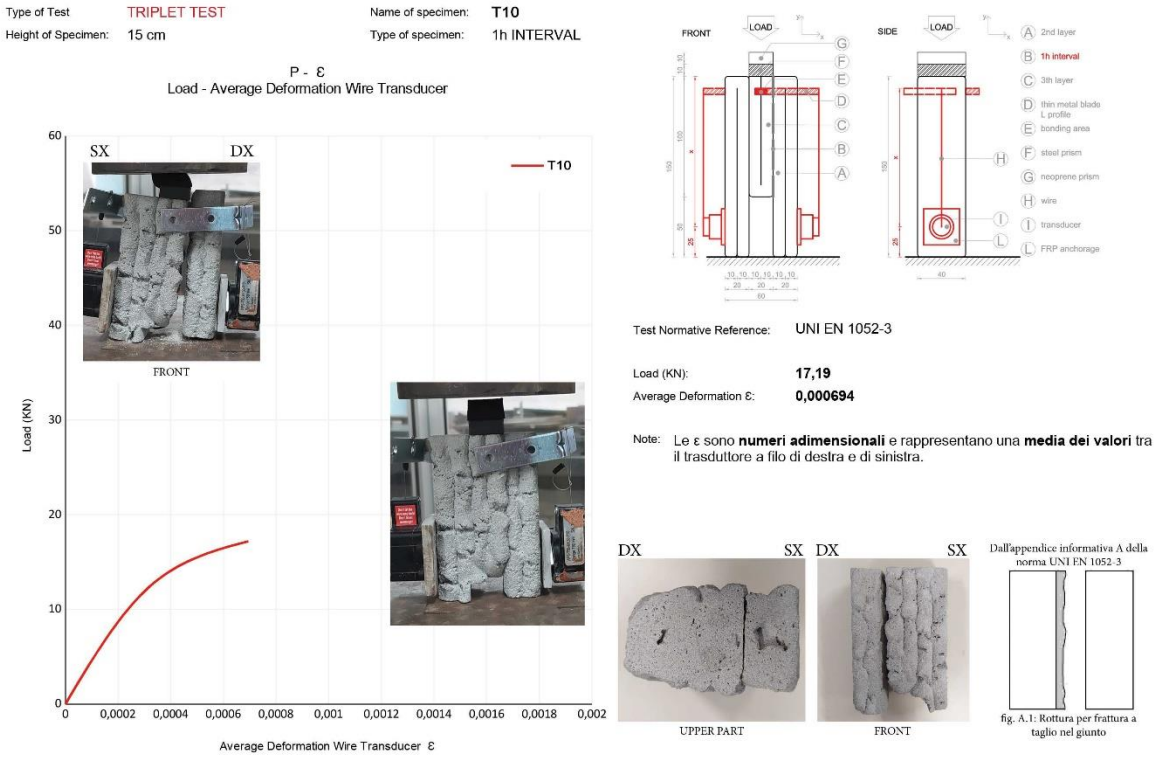


Fig. 4.1.4.29 – Provino T10 – Scheda 3

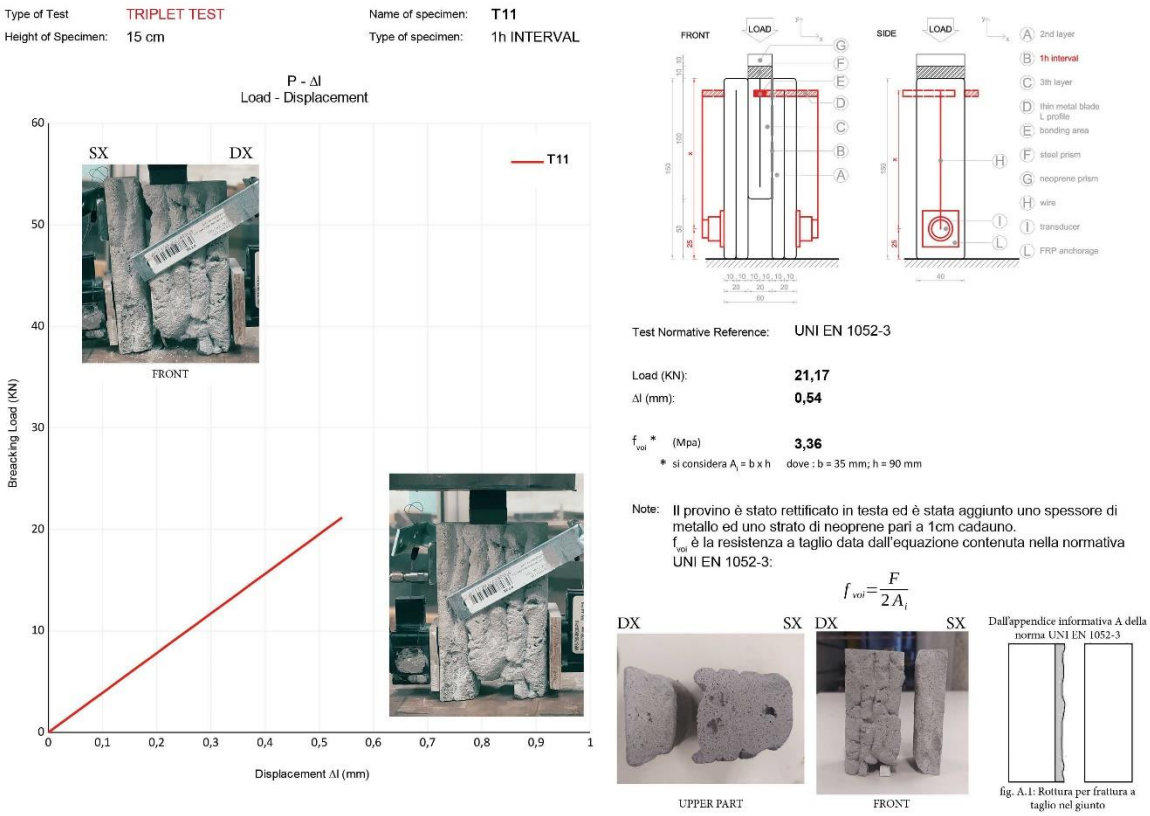


Fig. 4.1.4.30 – Provino T11 – Scheda 1

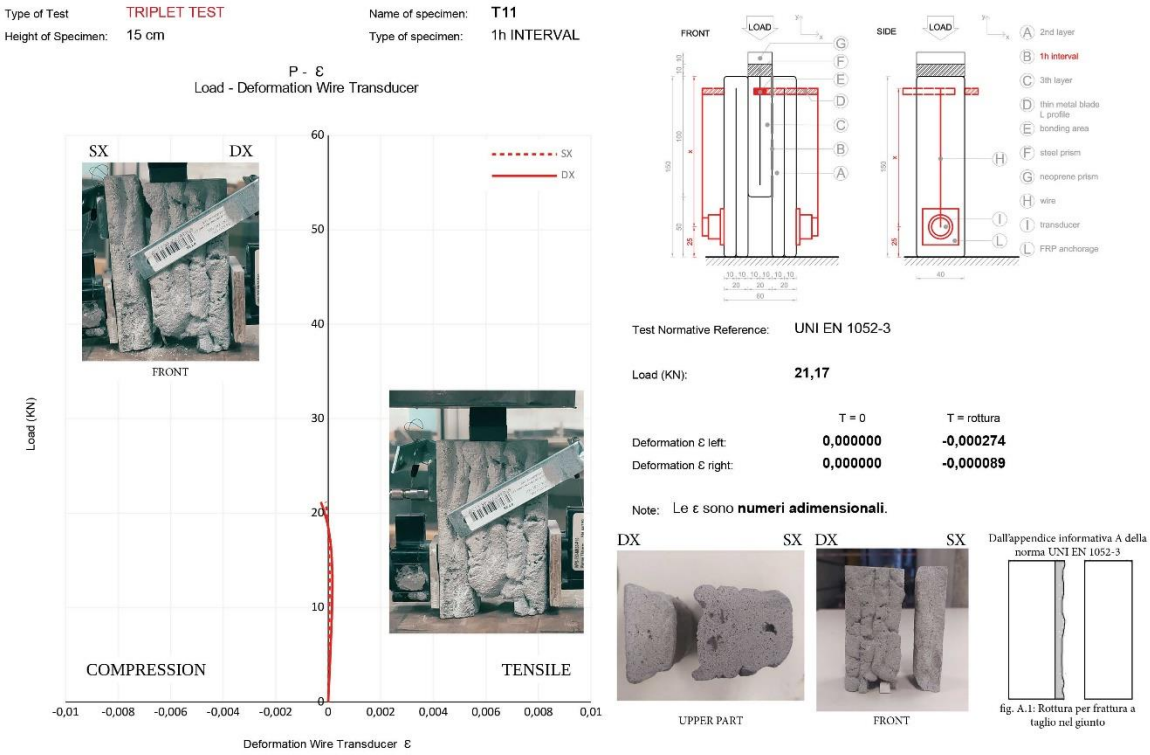


Fig. 4.1.4.31 – Provino T11 – Scheda 2

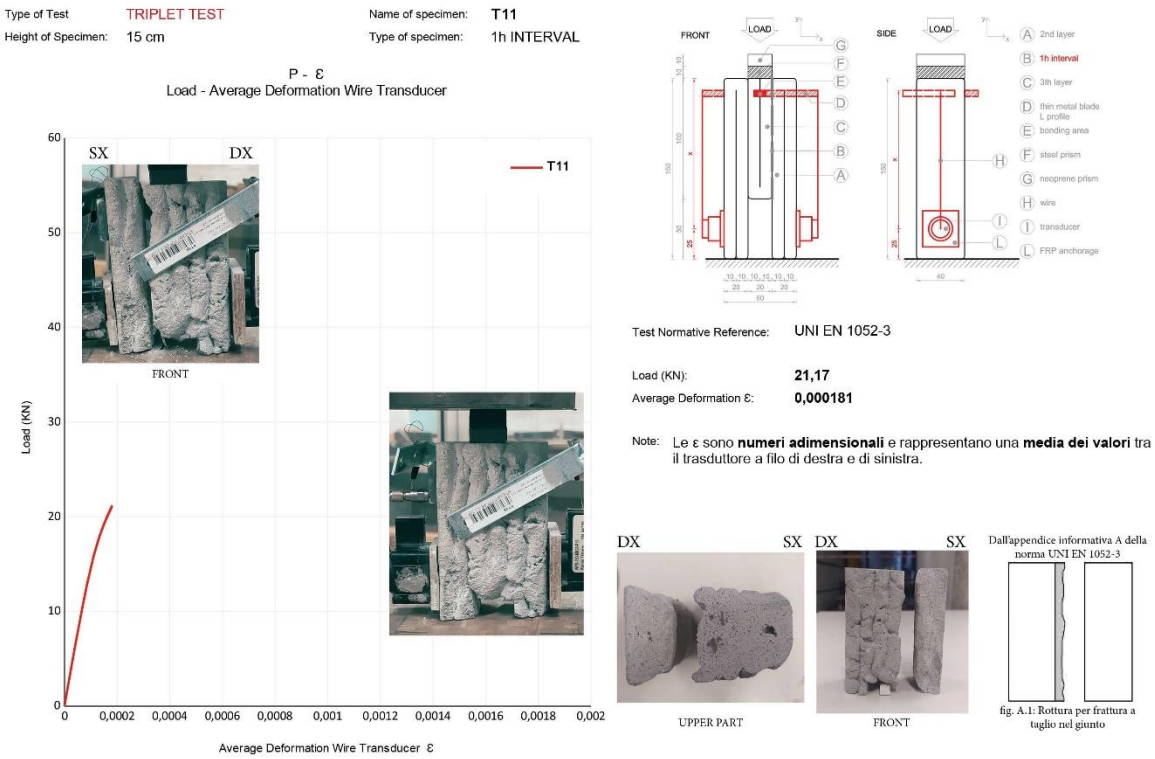


Fig. 4.1.4.32 – Provino T11 – Scheda 3

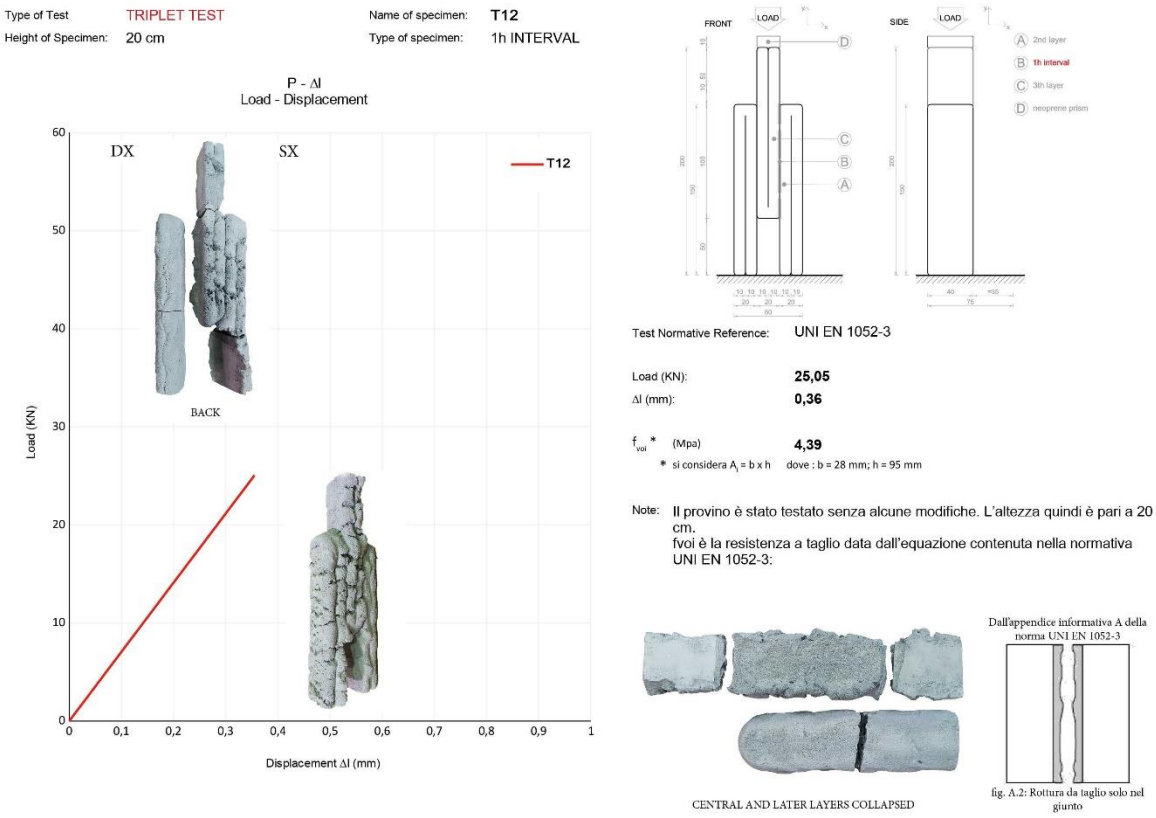


Fig. 4.1.4.33 – Provino T12 – Scheda 1

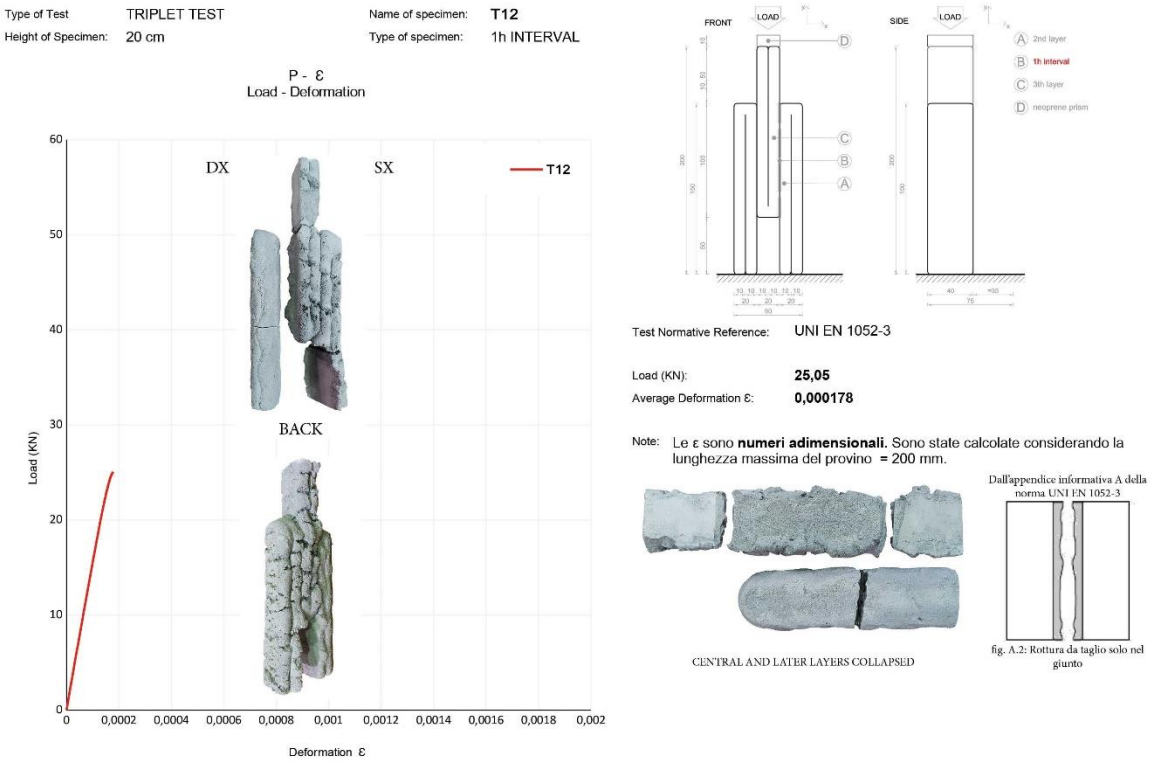


Fig. 4.1.4.34 – Provino T12 – Scheda 2

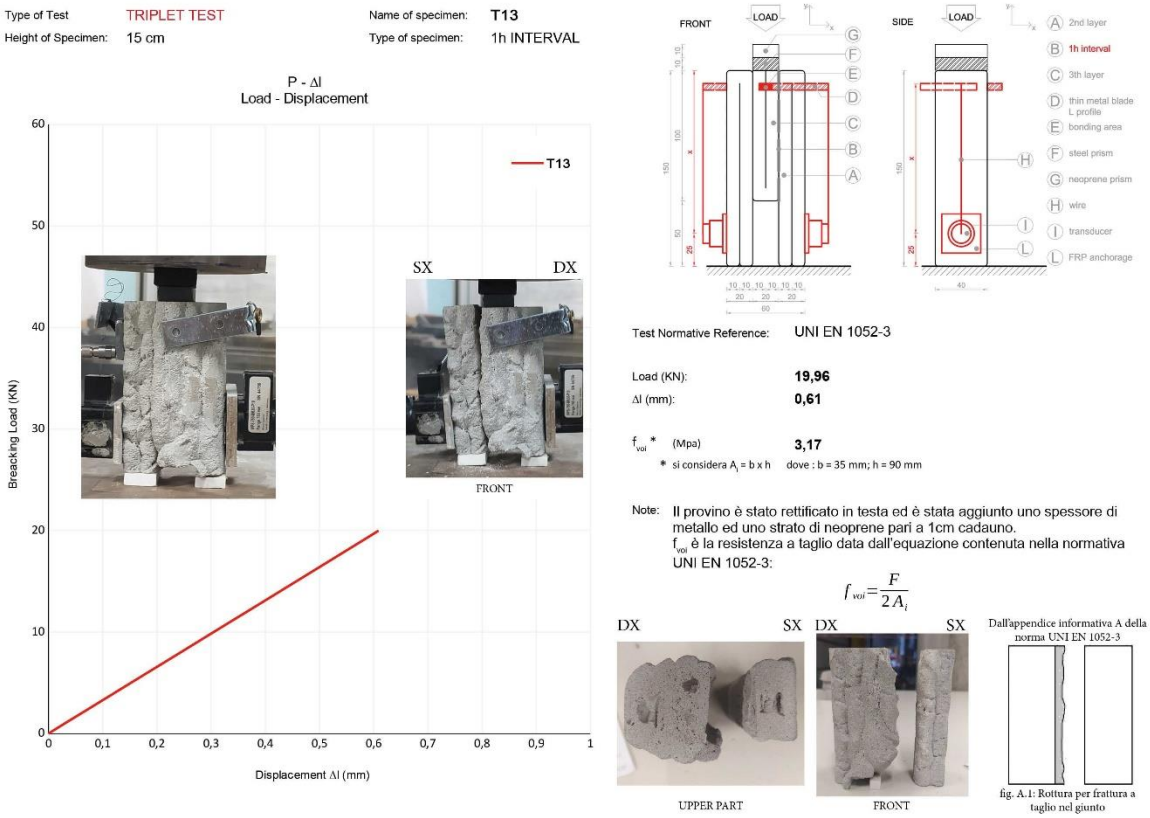


Fig. 4.1.4.35 – Provino T13 – Scheda 1

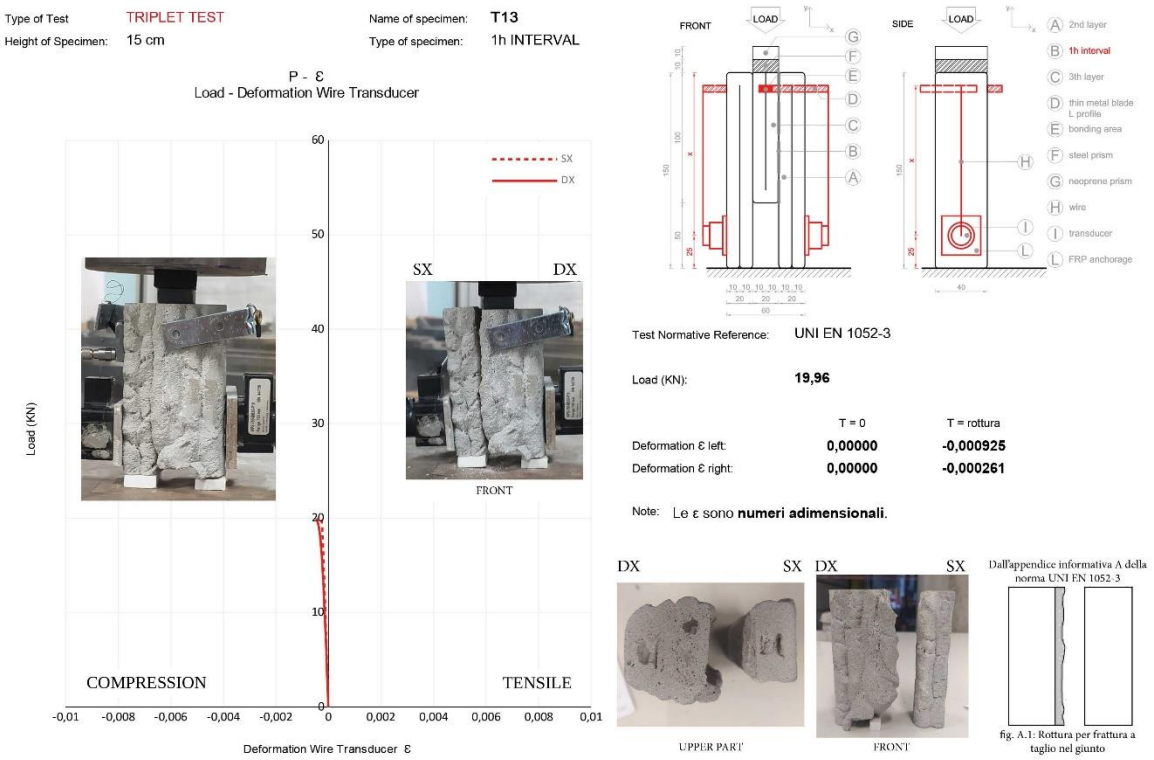


Fig. 4.1.4.36 – Provino T13 – Scheda 2

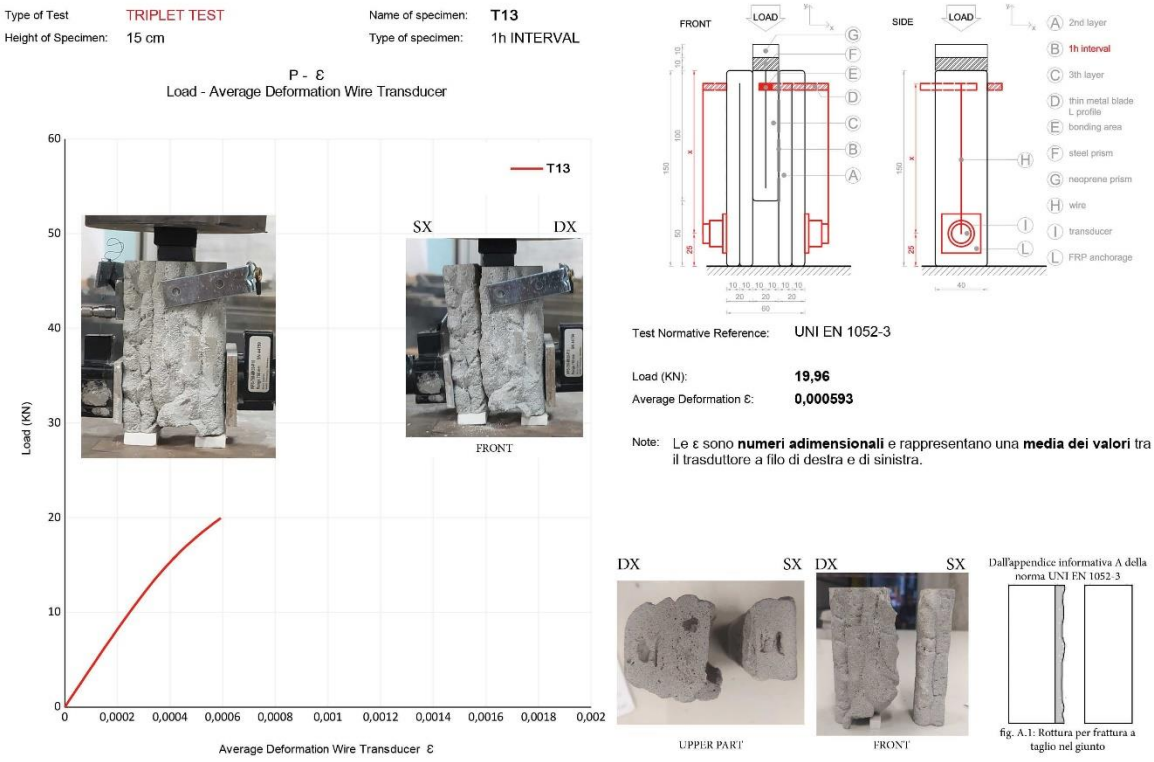


Fig. 4.1.4.37 – Provino T13 – Scheda 3

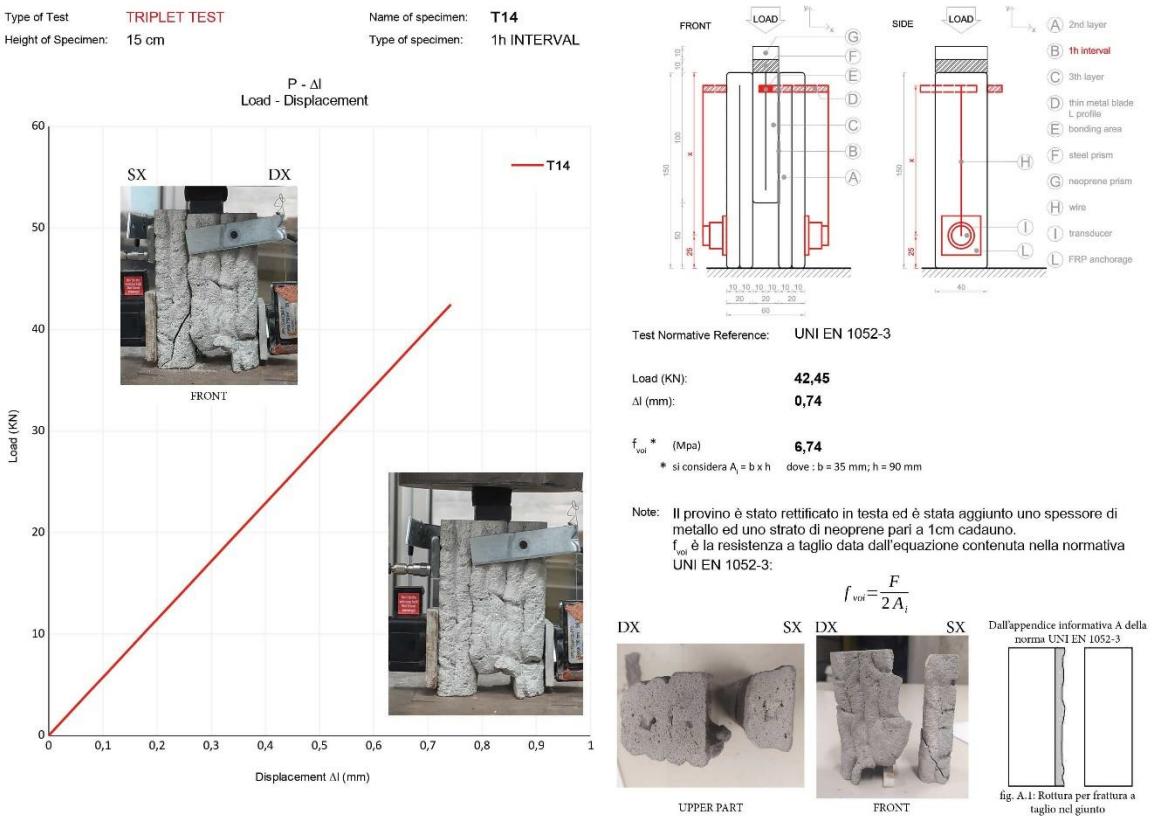


Fig. 4.1.4.38 – Provino T14 – Scheda 1

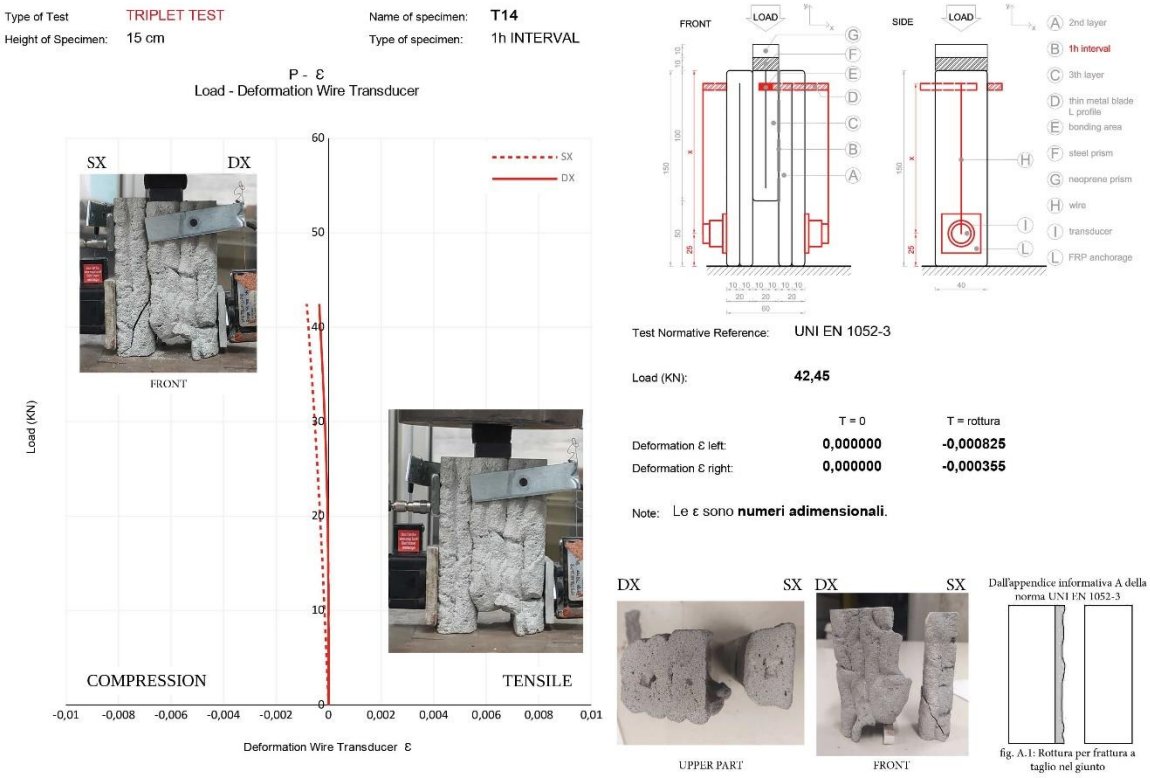


Fig. 4.1.4.39 – Provino T14 – Scheda 2

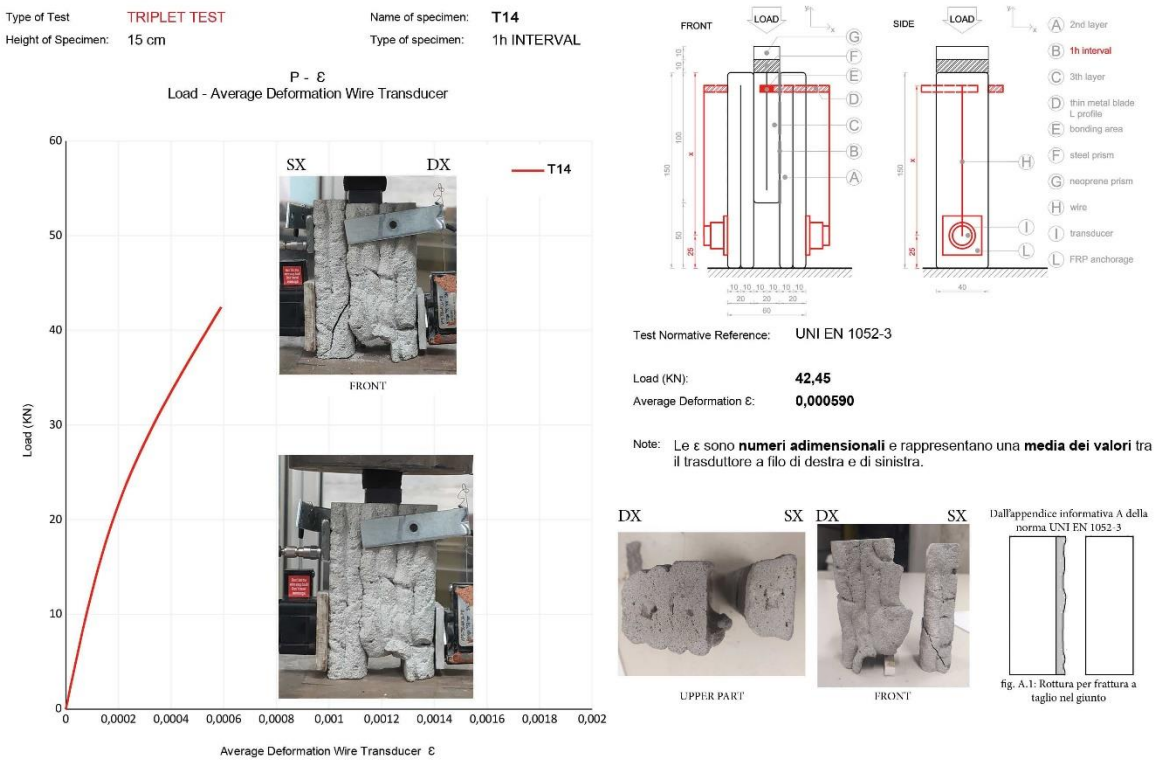


Fig. 4.1.4.40 – Provino T14 – Scheda 3

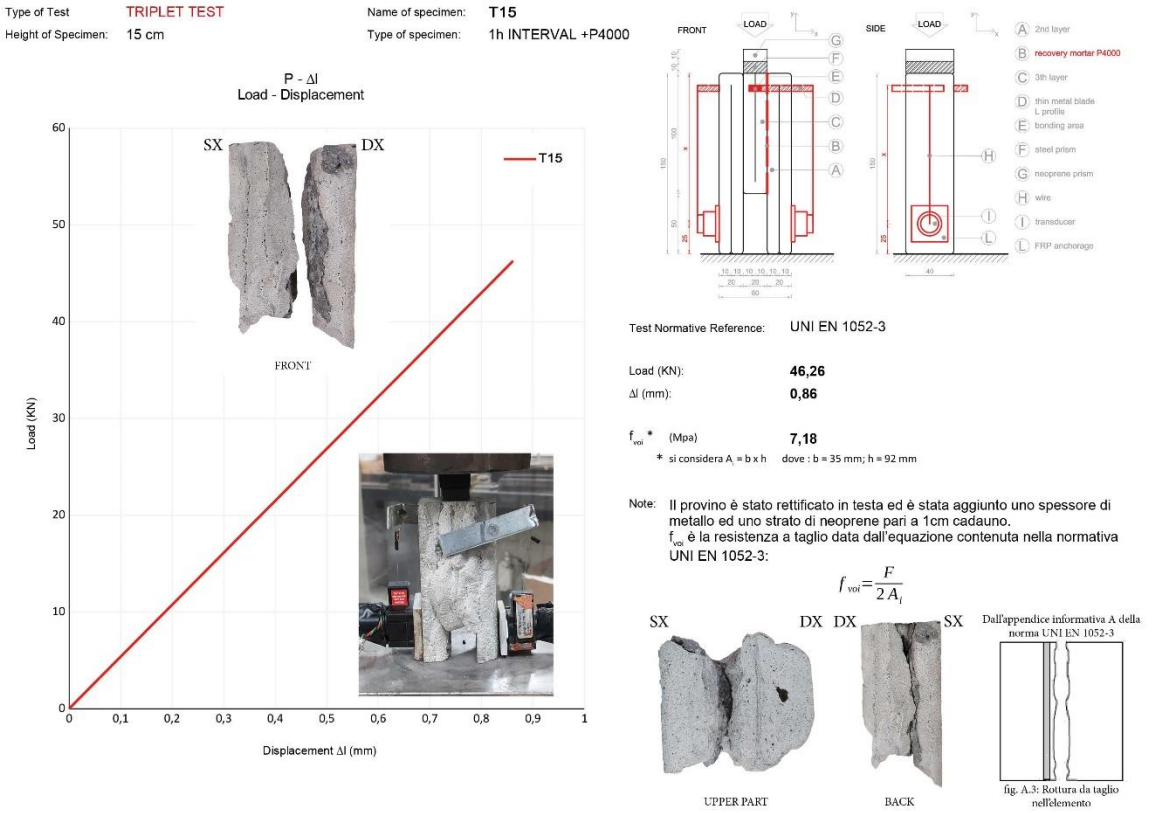


Fig. 4.1.4.41 – Provino T15 – Scheda 1

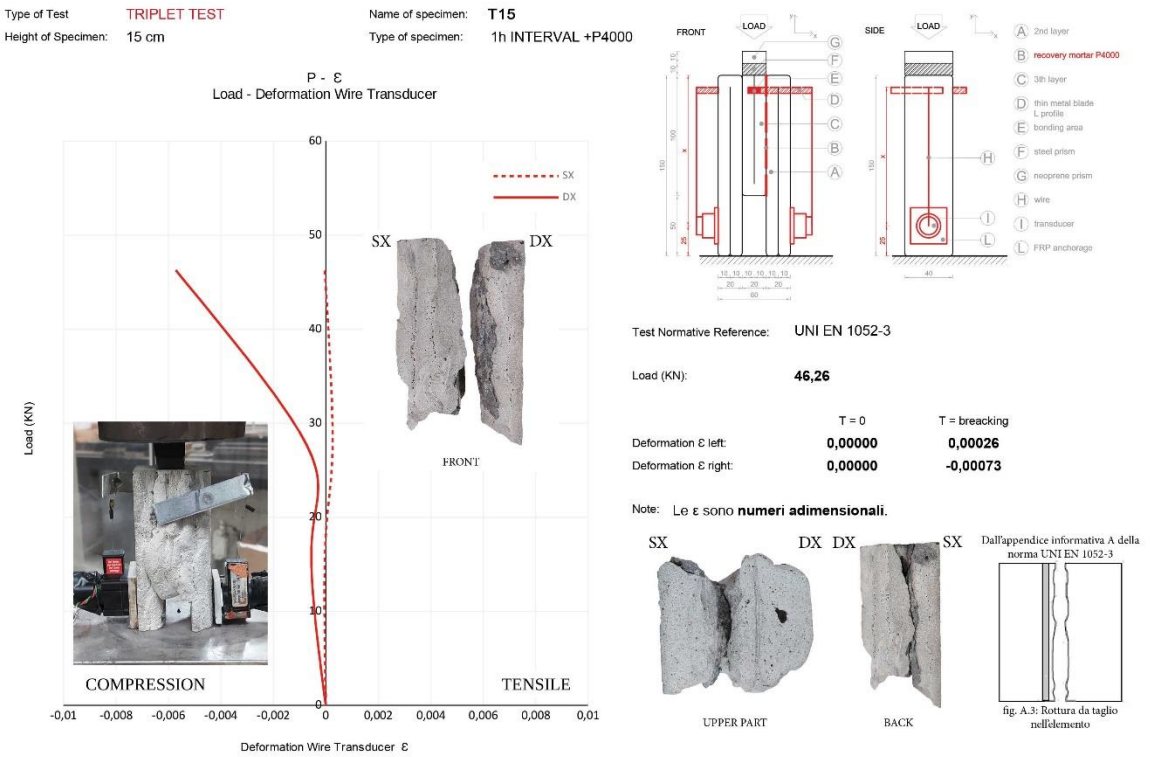


Fig. 4.1.4.42 – Provino T15 – Scheda 2

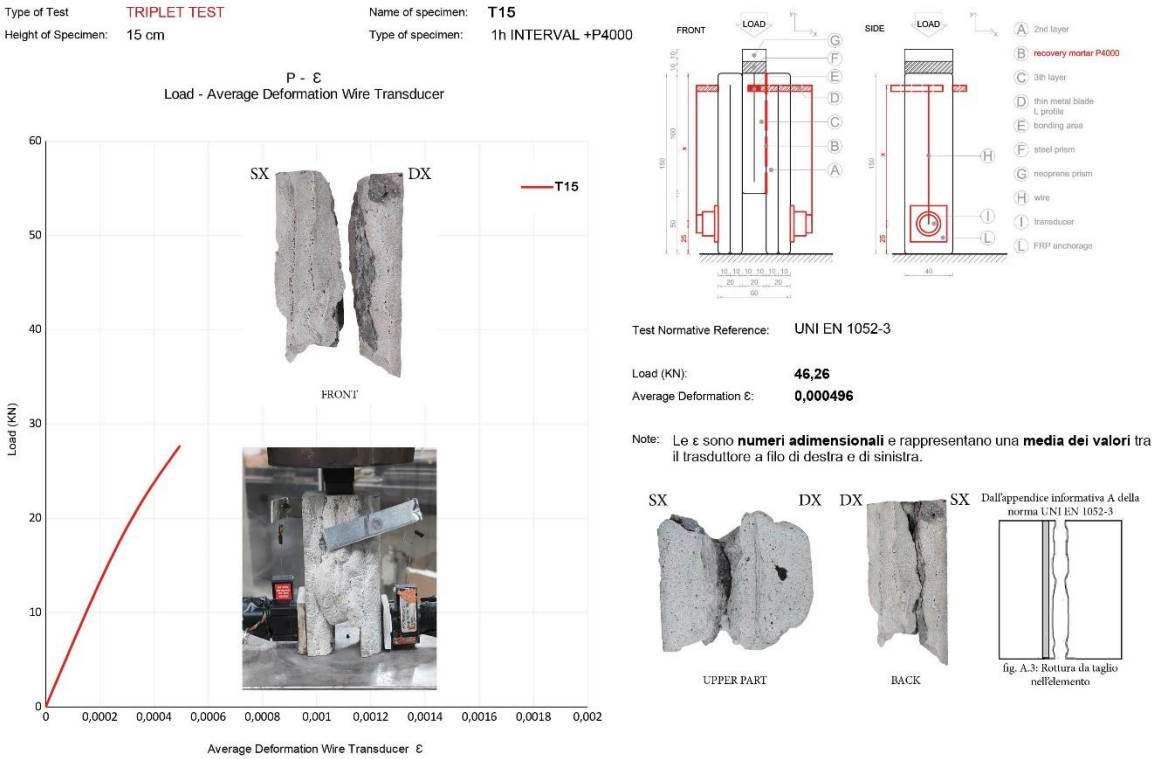


Fig. 4.1.4.43 – Provino T15 – Scheda 3

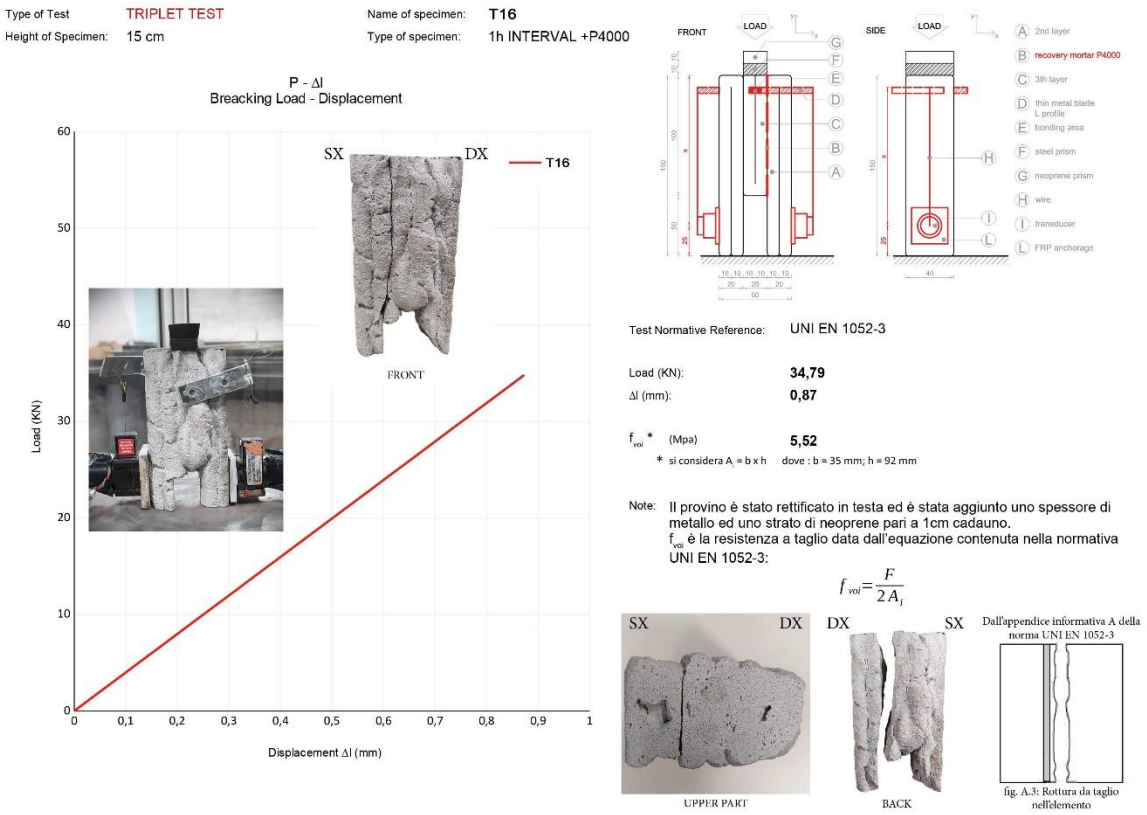


Fig. 4.1.4.44 – Provino T16 – Scheda 1

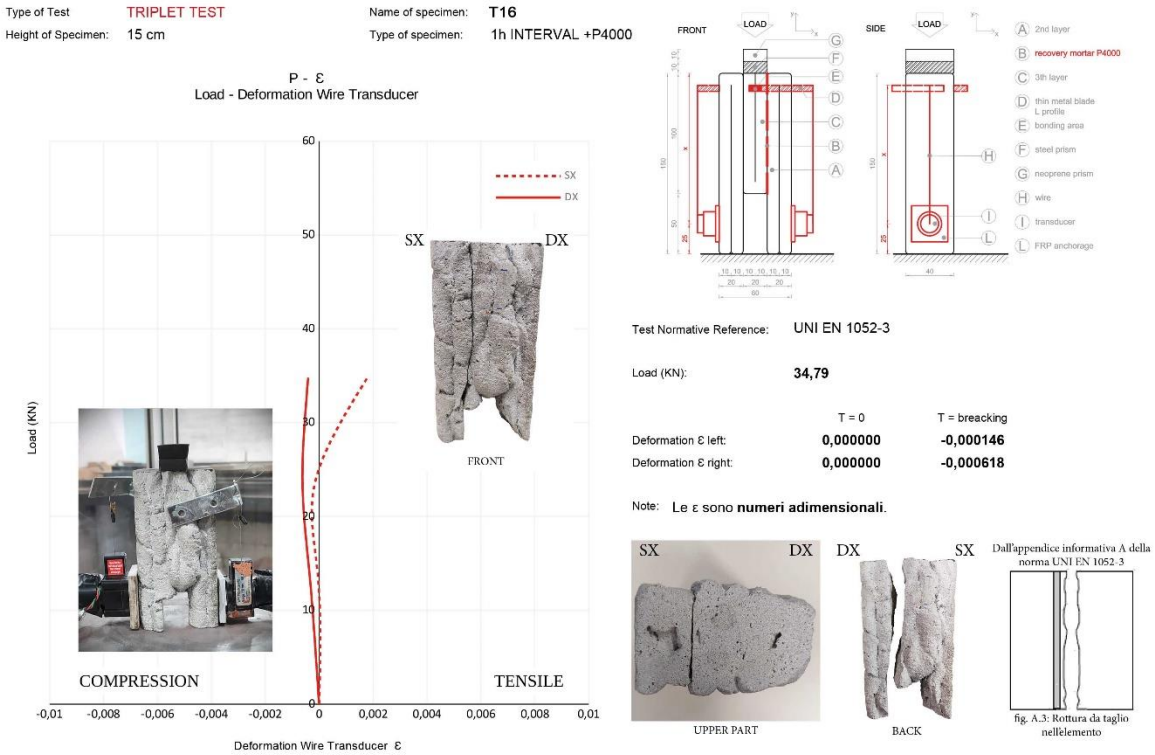


Fig. 4.1.4.45 – Provino T16 – Scheda 2

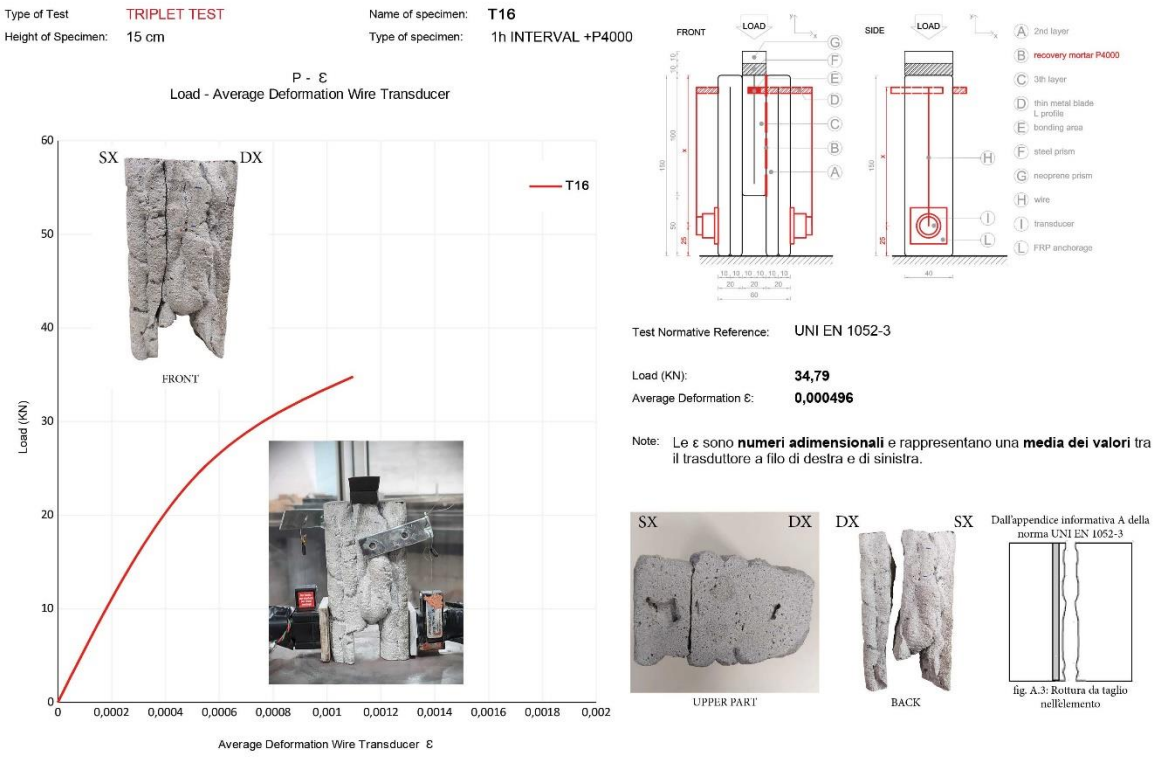


Fig. 4.1.4.46 – Provino T16 – Scheda 3

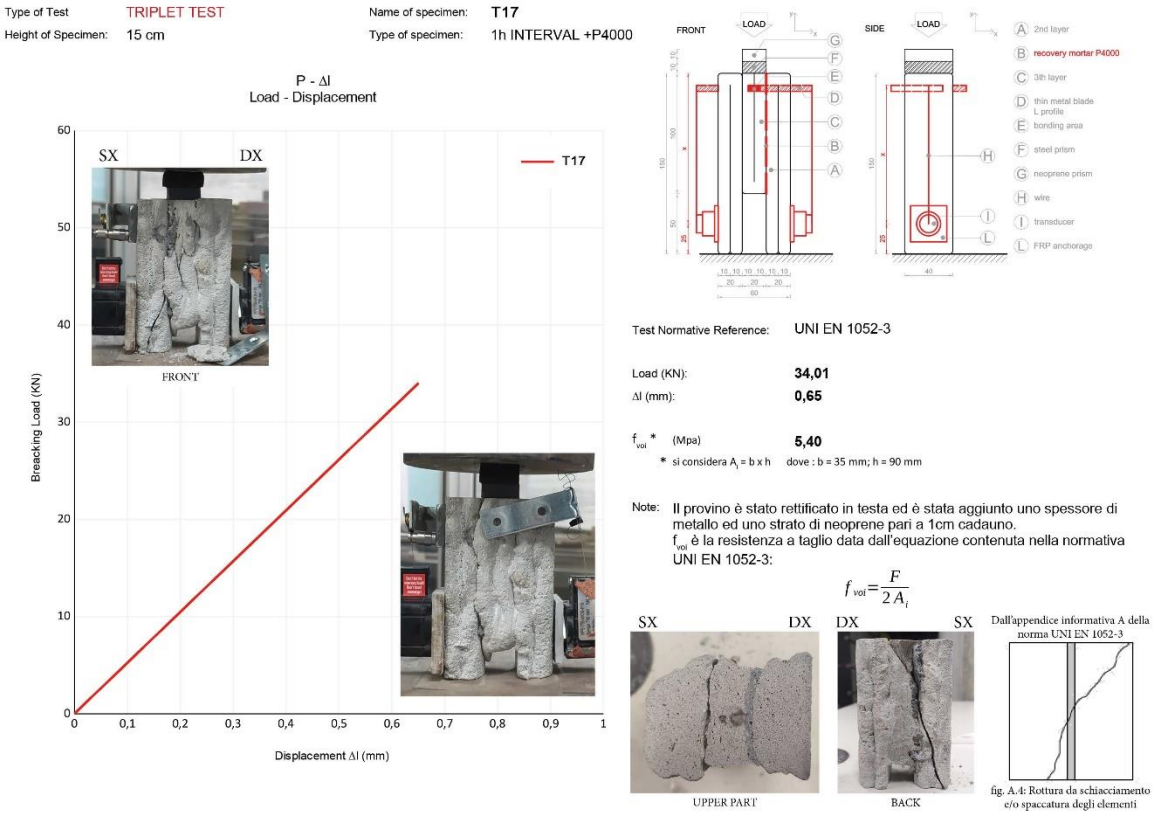


Fig. 4.1.4.47 – Provino T17 – Scheda 1

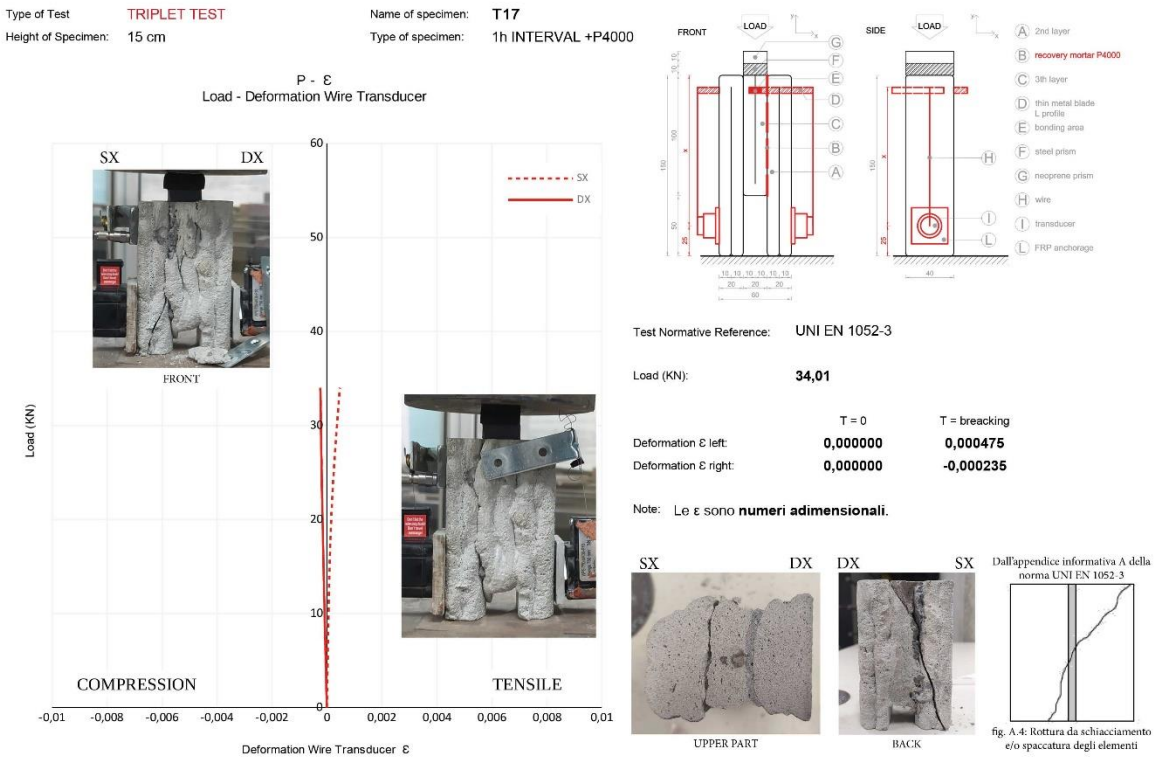


Fig. 4.1.4.48 – Provino T17 – Scheda 2



Fig. 4.1.4.49 – Provino T17 – Scheda 3

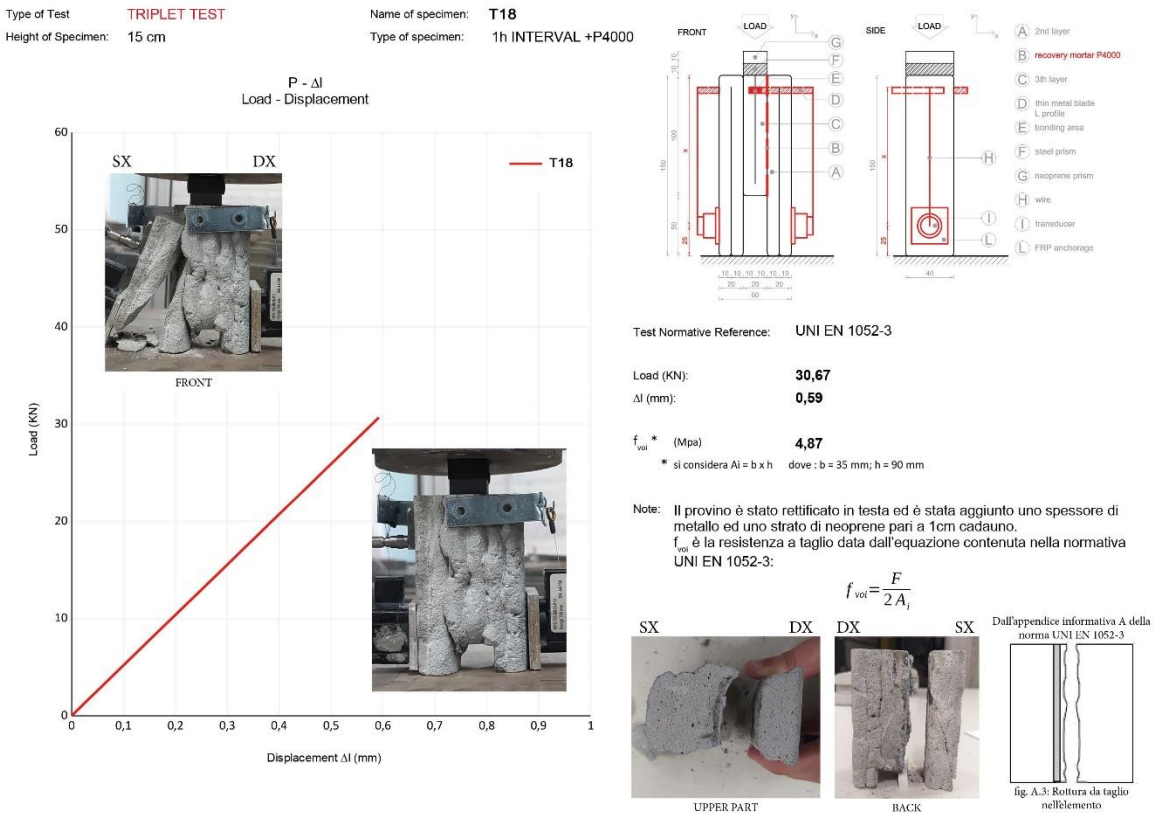


Fig. 4.1.4.50 – Provino T18 – Scheda 1

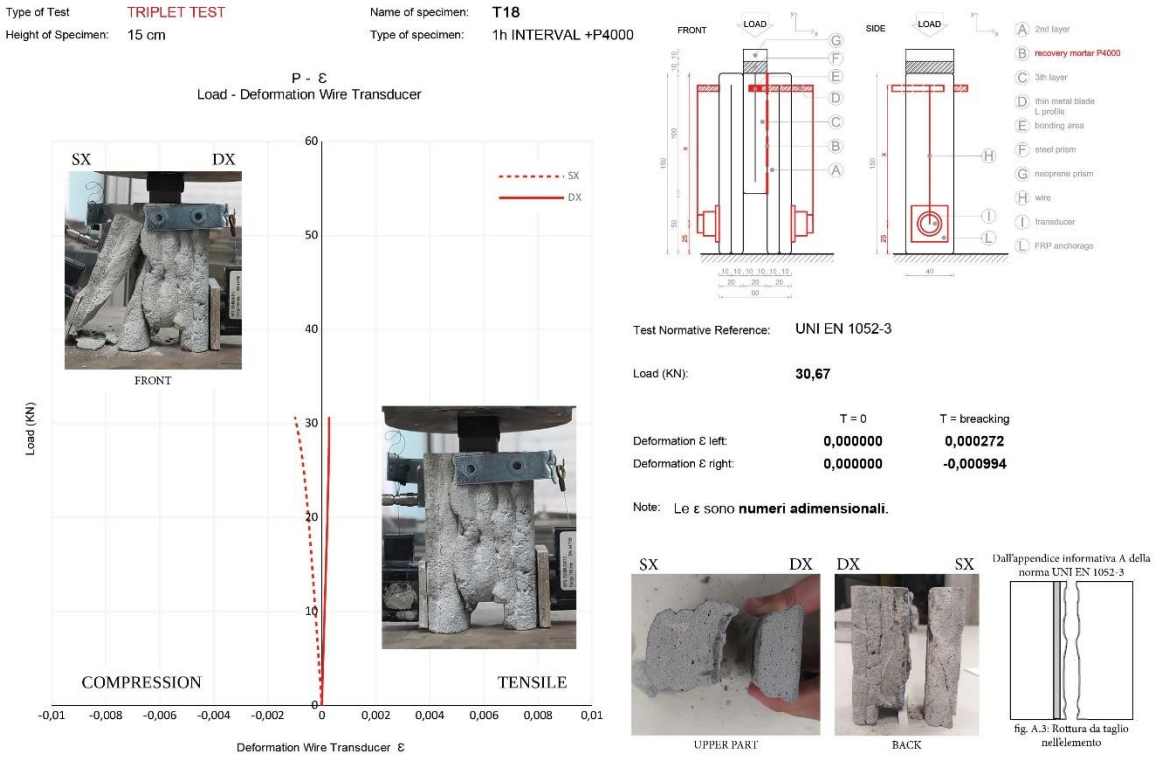


Fig. 4.1.4.51 – Provino T18 – Scheda 2

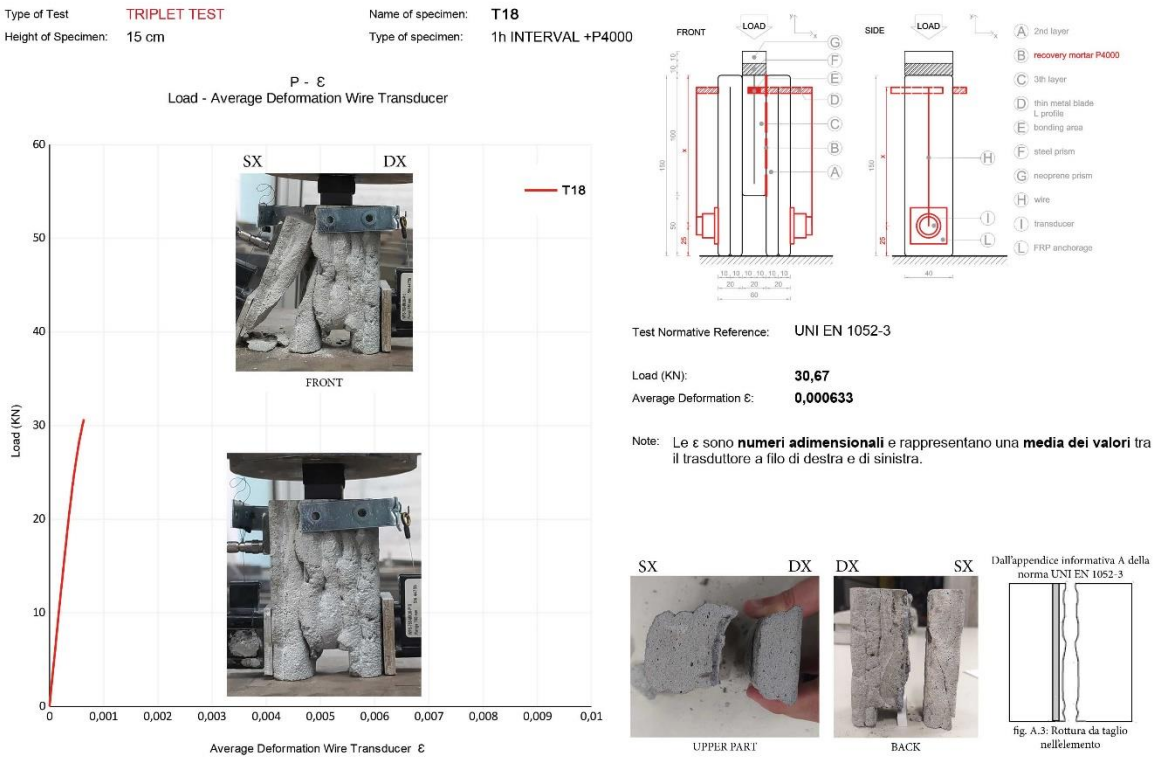


Fig. 4.1.4.52 – Provino T18 – Scheda 3

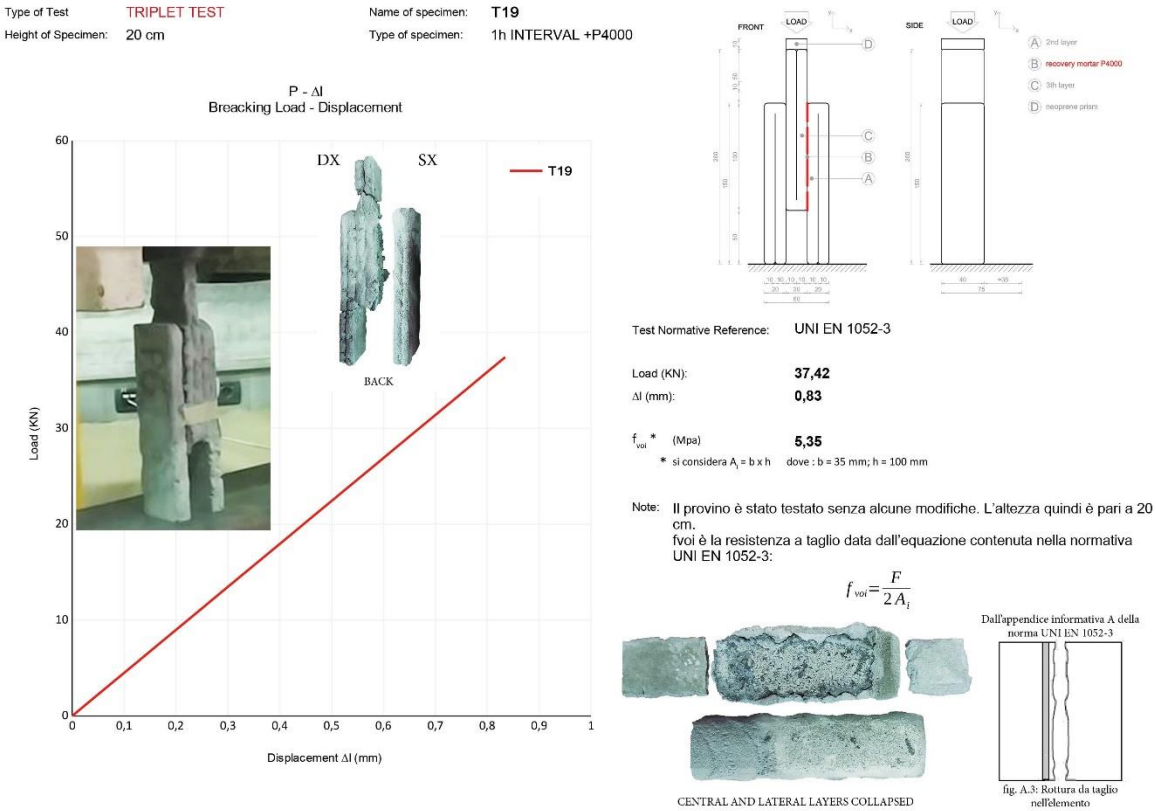


Fig. 4.1.4.53 – Provino T19 – Scheda 1

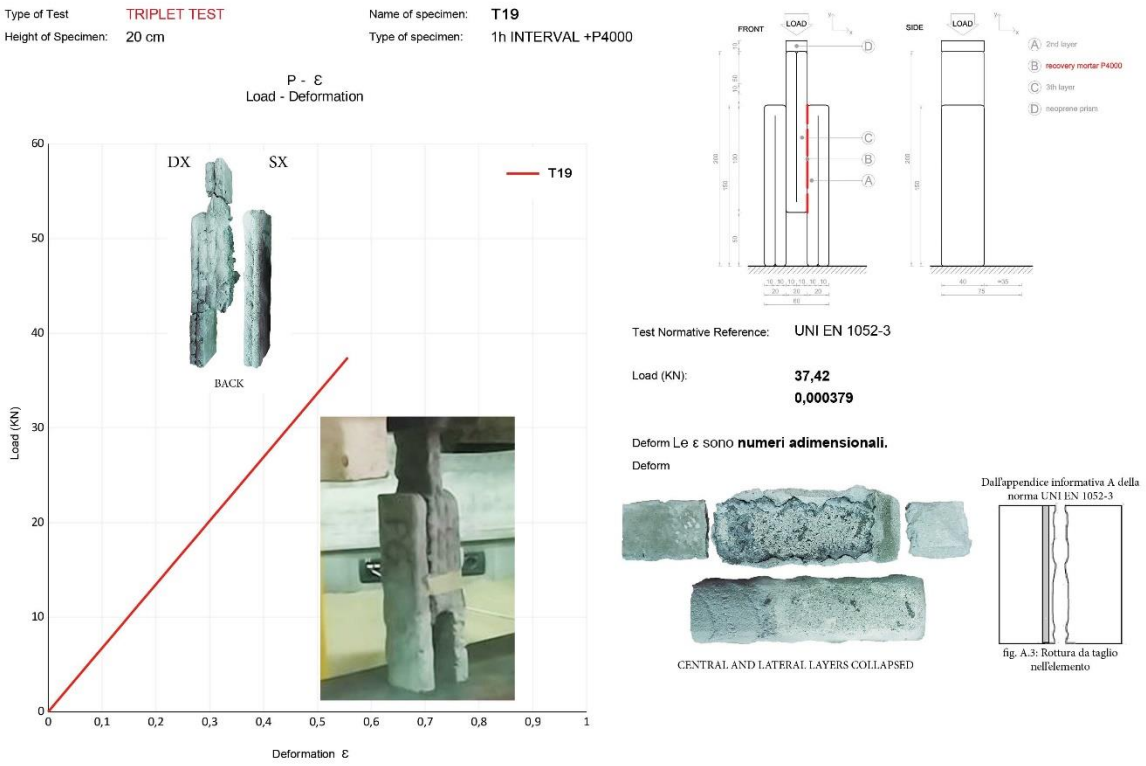


Fig. 4.1.4.54 – Provino T19 – Scheda 2

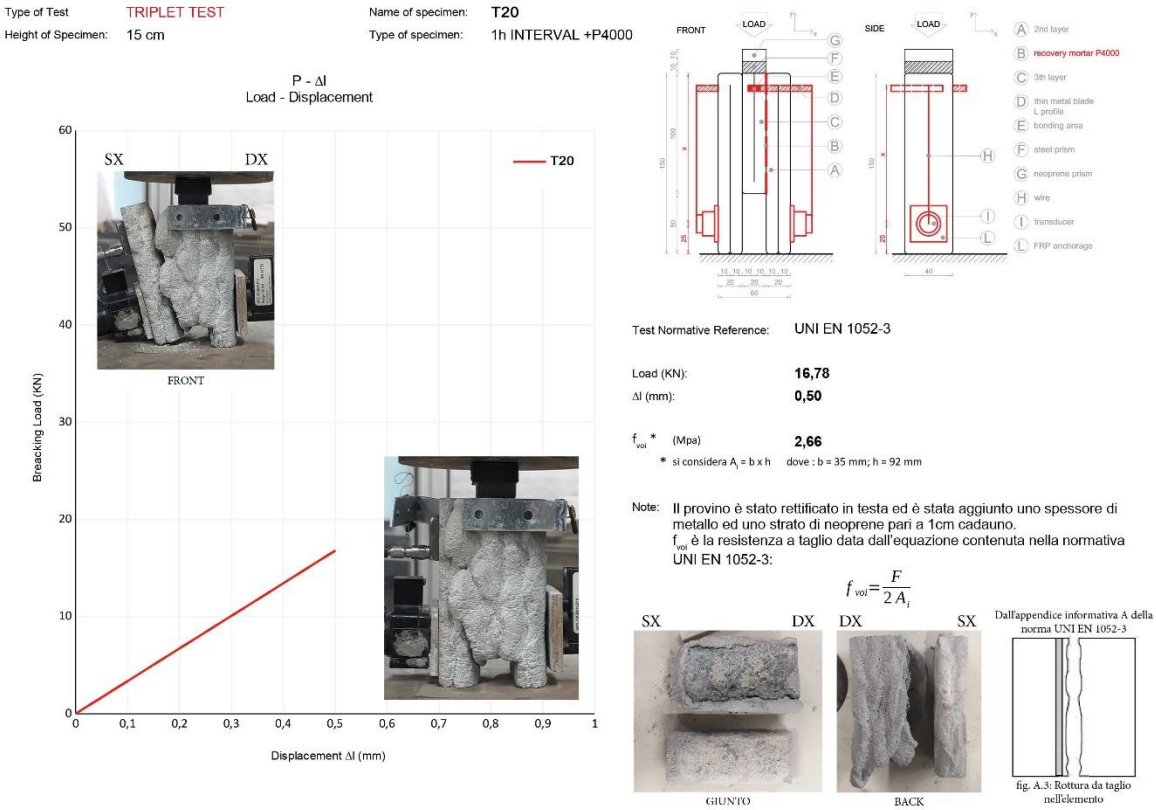


Fig. 4.1.4.55 – Provino T20 – Scheda 1



Fig. 4.1.4.56 – Provino T20 – Scheda 2

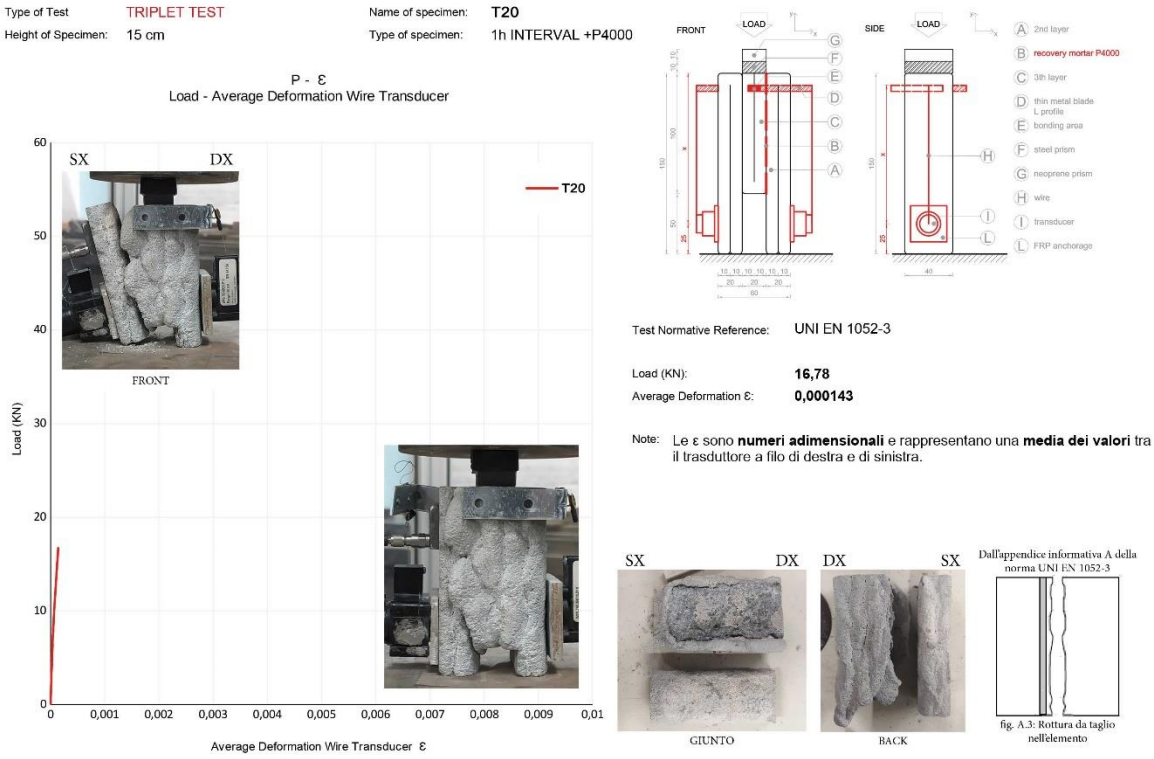


Fig. 4.1.4.57 – Provino T20 – Scheda 3

I dati che sono stati estrapolati si possono dire soddisfacenti. Avendo sottoposto i provini a taglio per attrito con una forza parallela alla linea di stampa, i valori delle resistenze a taglio per attrito risultano alti. Questi dati e la modalità di collasso dei provini sono in linea con quanto indicato dalla normativa. Di seguito sono proposti i grafici riassuntivi per le tre caratteristiche di stampa in cui:

- il primo rappresenta il diagramma di forza-spostamento: la curva ha come asse delle ascisse lo spostamento espresso in millimetri (mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).
- il secondo rappresenta il diagramma di forza-deformazione (media): la curva ha come asse delle ascisse la media delle deformazioni degli estensimetri a filo ε espressa in millimetri/millimetri (mm/mm) e come asse delle ordinate la forza espressa in kilo-newton (KN).

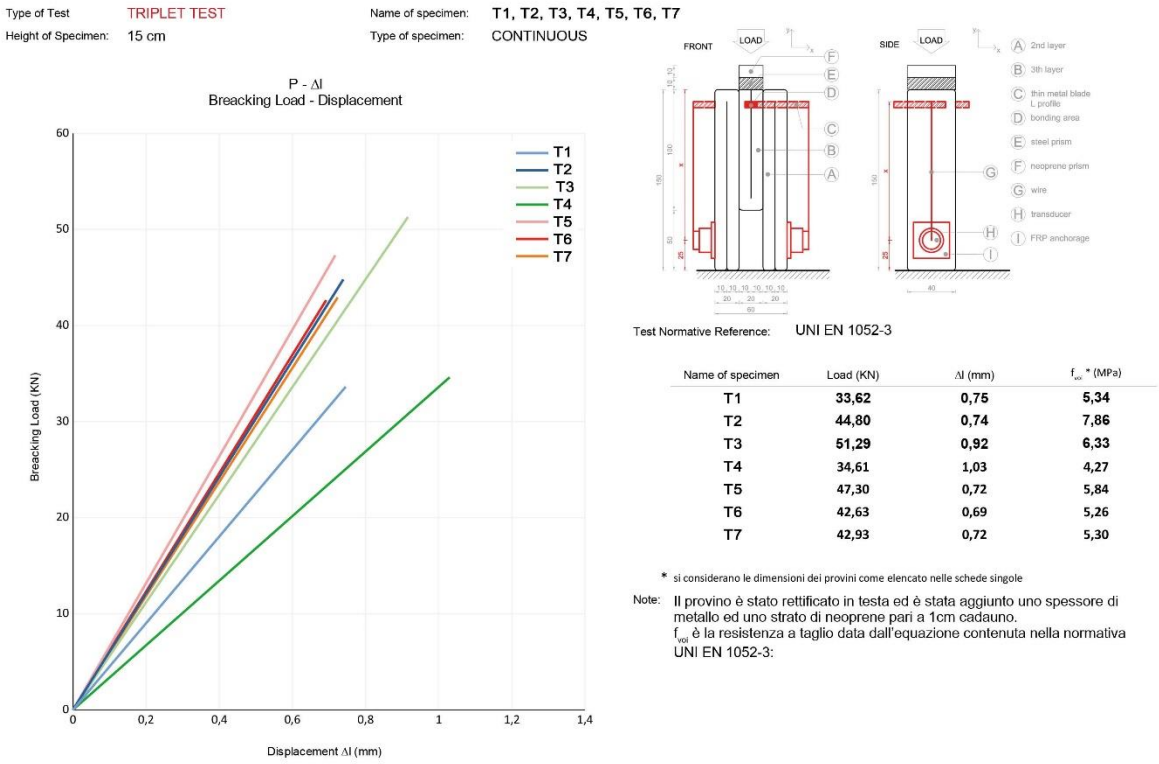


Fig. 4.1.4.57 – Grafico Carico- Spostamento dei test a triplette su provini T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7

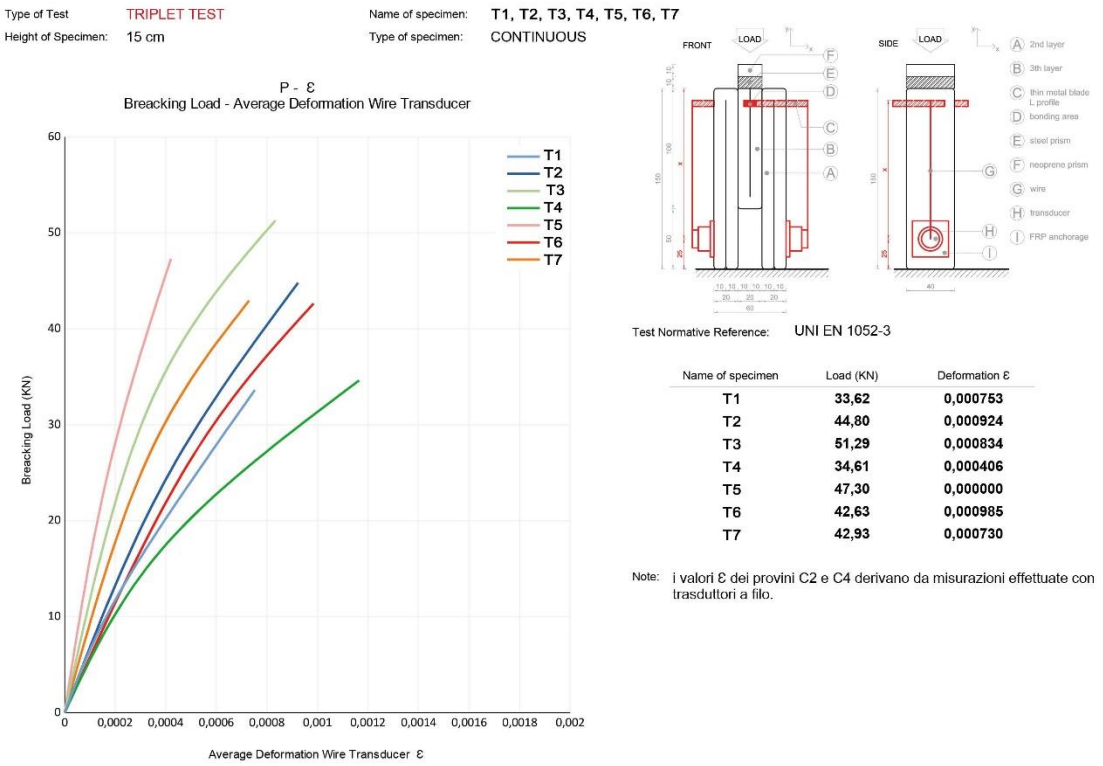


Fig. 4.1.4.58 – Grafico Forza-Deformazione media dei test a triplette su provini T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7

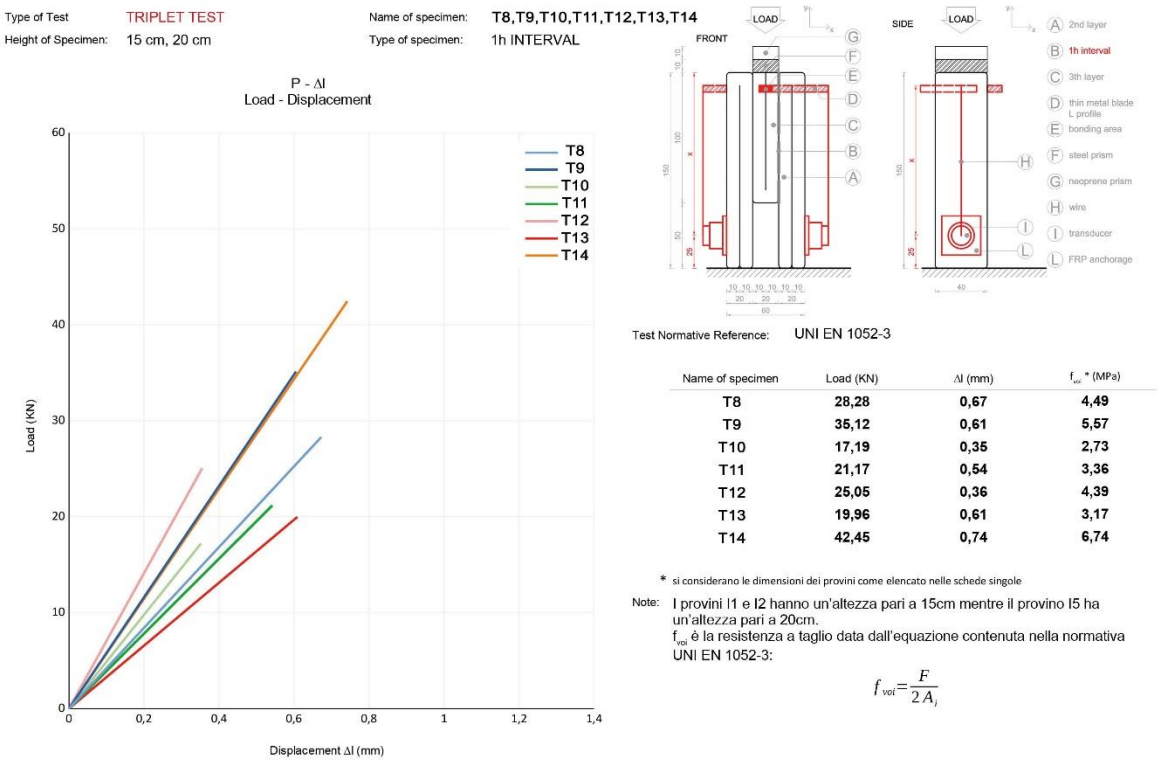


Fig. 4.1.4.58 – Grafico Carico- Spostamento dei test a triplette su provini T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14

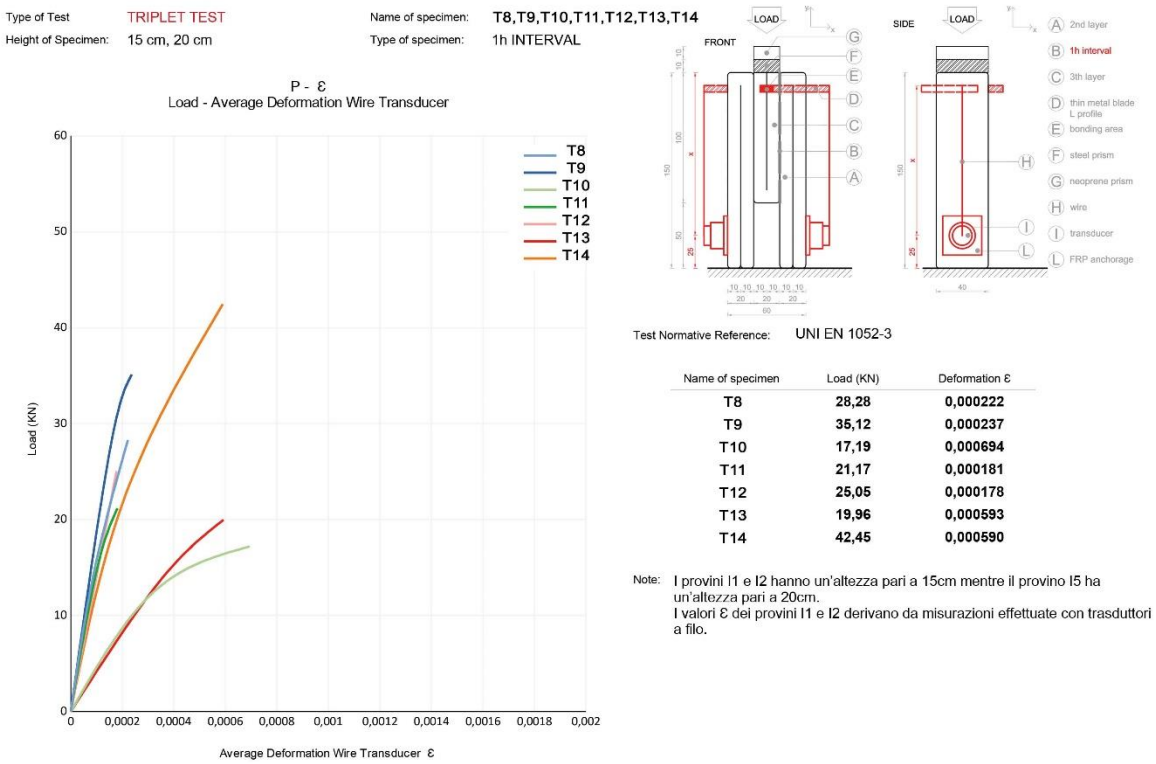


Fig. 4.1.4.59 – Grafico Forza-Deformazione media dei test a triplette su provini T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14

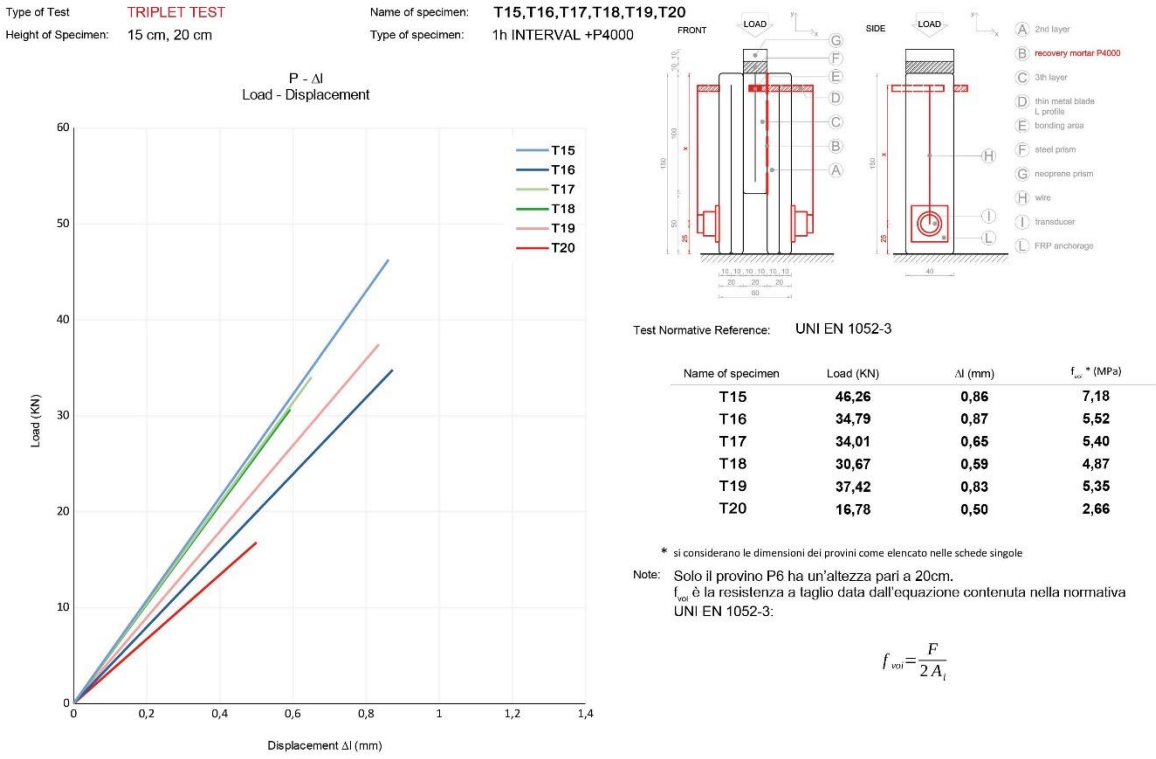


Fig. 4.1.4.60 – Grafico Carico- Spostamento dei test a triplette su provini T15, T16, T17, T18, T19, T20

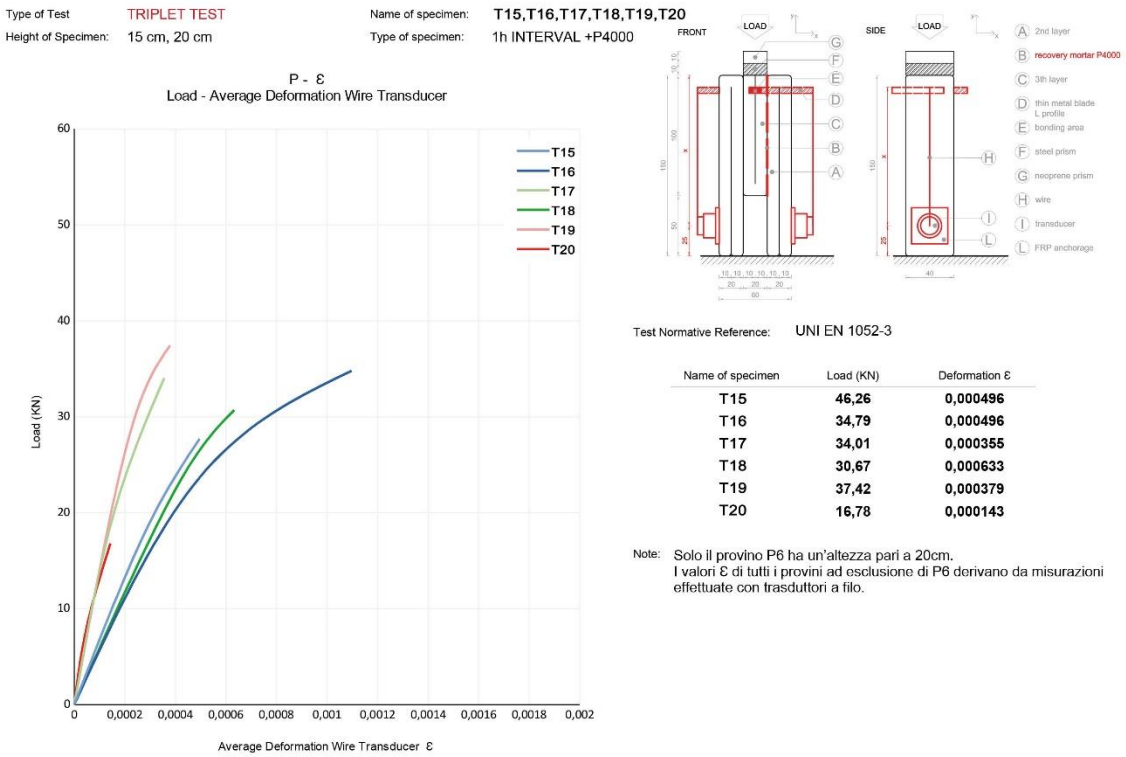


Fig. 4.1.4.61 – Grafico Forza-Deformazione media dei test a triplette su provini T15, T16, T17, T18, T19, T20

I provini T1, T2, T3 hanno una resistenza al taglio media superiore dell'8% rispetto ai campioni T15, T16, T19 e del 27% superiore ai campioni T8, T9, T12. Per studiare più a fondo il meccanismo di taglio, sono stati applicati trasduttori e filo ai lati dei campioni. I dati che emergono rappresentano la resistenza all'attrito dei layer. La deformazione media dei provini T1, T2, T3 è del 69% superiore rispetto ai provini T8, T9, T12 e del 73% inferiore rispetto ai provini T15, T16, T19. Queste differenze macroscopiche evidenziano la differenza nelle connessioni tra gli strati. I valori della resistenza a taglio calcolati in questo studio sono molto simili a quanto indicato in recenti studi (Rahul et al. 2019). Considerando che alcuni test hanno prodotto dati non soddisfacenti, ulteriori provini saranno testati in futuro. L'energia di frattura più alta calcolata è del provino T19 il quale ha un valore simile ma di poco superiore all'energia di frattura dei provini T15, T16 e T2. Possiamo non considerare i valori dell'energia di frattura dei provini T3 e T9 perché molto al di sotto della media calcolata, per la precisione: $G_{f\,T3}$ è del 121% inferiore rispetto al valore medio dell'energia di frattura dei provini realizzati con stampa continua; $G_{f\,T9}$ è del 317% inferiore rispetto al valore medio dell'energia di frattura dei provini realizzati con l'intervallo temporale. Si può infine notare come, a causa della ridotta energia di frattura e dei ridotti valori negli spostamenti, i provini con intervallo temporale risultano più fragili. I provini realizzati con stampa continuo e con la malta di ripresa di getto hanno valori simili sia, nell'energia di frattura (variazione complessiva del 24%) che negli spostamenti (variazione complessiva del 6%) e si possono quindi considerare più rigidi.

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

De Nardi C., A. Cecchi e L. Ferrara. 2018. "Assessing the influence of self-healing capacity of lime-based mortars on brick-mortar interface strength in masonry units" MATEC Web Conf., 199 02015. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819902015

Ding, T., J. Xiao, S. Zou, and J. Yu. 2021. "Flexural properties of 3D printed fibre-reinforced concrete with recycled sand." *Constr. Build. Mater.*, 288: 123077. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123077.

Kaliyavaradhan, S. K., A. Ps, P. Prem, and S. Ghodke. 2022. "Test methods for 3D printable concrete." *Autom. Constr.*, 142: 104529. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104529.

Kocherla, Amarteja, Tippabhotla Kamakshi, e Kolluru Subramaniam. 2021. "In-situ embedded PZT sensor for monitoring 3D concrete printing: application in alkali-activated fly ash-slag geopolymers". *Smart Materials and Structures* 30. https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac3438.

Liu, Ke, Koji Takasu, Jinming Jiang, Kun Zu, e Weijun Gao. 2023. "Mechanical properties of 3D printed concrete components: A review". Built Environment 16: 100292. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100292.

Panda B. 2017. "Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material" http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123

Rahul, A. V., M. Santhanam, H. Meena, and Z. Ghani. 2019. "Mechanical characterization of 3D printable concrete." *Constr. Build. Mater.*, 227: 116710. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710.

Siviero E., R. Cantoni, M. Forin. 1995. Durabilità delle opere in calcestruzzo. Degrado del calcestruzzo, corrosione delle armature, prevenzione, misura della durabilità, sperimentazione e controlli. Volume 7 di Edilizia / Angeli. FrancoAngeli. ISBN 8820491400, 9788820491406

Yu, S., M. Xia, J. Sanjayan, L. Yang, J. Xiao, and H. Du. 2021. "Microstructural characterization of 3D printed concrete." *J. Build. Eng.*, 44: 102948. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102948.

Riferimenti normativi

EN 1052-3:2002/A1:2007: Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength

UNI EN 12390-3 2003 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione

UNI EN 12390-4 2002 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 4: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova

5. Modellazione Numerica FEM

La modellazione numerica a elementi finiti (FEM) è stata eseguita utilizzando il software ANSYS per analizzare i collassi dei provini con superfici aderenti in cui è presente un giunto con un coefficiente d'attrito. La metodologia segue le normative di riferimento pertinenti e cerca di rispecchiare fedelmente le caratteristiche dei giunti osservate nelle prove sperimentali. La modellazione è stata condotta conformemente alle normative specifiche del settore, come ad esempio le norme ASTM o UNI EN relative alle prove di compressione, flessione e triplette. L'adesione a tali normative è cruciale per garantire risultati accurati e affidabili.
La geometria del modello è stata accuratamente riprodotta in base a quanto realizzato in fase di stampa dei provini, tenendo conto delle dimensioni e delle forme rilevanti. Le caratteristiche del materiale inserito nella modellazione ad elementi finiti FEM rispecchiano le caratteristiche del materiale testato in laboratorio.
Le condizioni al contorno sono state impostate in modo da replicare le situazioni di carico e vincoli presenti nelle prove sperimentali. Questo include la considerazione di carichi statici o dinamici, temperature, e altri fattori ambientali che possono influenzare le prestazioni dei giunti.
I risultati della modellazione sono stati confrontati con i dati provenienti da prove sperimentali. La coerenza tra i risultati numerici e le prove sperimentali è stata valutata per garantire l'affidabilità del modello e la sua capacità di predire accuratamente il comportamento dei giunti in condizioni reali.

5.1 Descrizione modello

Come prima operazione nella realizzazione del modello in Ansys si inseriscono tutte le caratteristiche meccaniche del materiale. Tali caratteristiche della malta cementizia provengono dai dati sperimentali estrapolati da test a compressione (seguendo la normativa di riferimento) di cubi casserati ma realizzati con la stessa malta cementizia che compone i provini realizzati con la stampa tridimensionale. Le caratteristiche meccaniche riguardano:

- Densità: rappresenta la massa del materiale per unità di volume ed è espressa in kg/m³ che è pari a 2.161,00 kg/m³;
- Modulo di Young: Misura la rigidezza del materiale e la sua capacità di deformarsi sotto carico ed è espresso in Pascal (Pa) ed è pari a: 36.915,00 Pa;
- Coefficiente di Poisson: Indica la tendenza del materiale a contrarsi o espandersi in direzione trasversale quando viene sottoposto a carico longitudinale. Il coefficiente di Poisson è adimensionale e varia tra 0 e 0.5 e nella nostra sperimentazione è pari 0,18;
- Resistenza a trazione: Rappresenta la massima tensione che il materiale può sopportare prima di rompersi sotto trazione, è misurata in Pascal (Pa) o Mega-Pascal (MPa) ed è pari a 4 Mpa;
- Resistenza a compressione: Rappresenta la massima tensione che il materiale può sopportare prima di rompersi sotto compressione, è misurata in Pascal (Pa) o Mega-Pascal (MPa) ed è pari a 56 Mpa.

Di seguito la tabella riassuntiva estrapolata dal modello FEM:

Properties of Outline Row 3: BASF CONCRETE

	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2161	kg m^-3
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
8	Young's Modulus	36915	MPa
9	Poisson's Ratio	0,18	
10	Bulk Modulus	1,9227E+10	Pa
11	Shear Modulus	1,5642E+10	Pa
12	Field Variables		
13	Temperature	No	
14	Shear Angle	No	
15	Degradation Factor	No	
16	Tensile Yield Strength	0	Pa
17	Compressive Yield Strength	0	Pa
18	Tensile Ultimate Strength	4	MPa
19	Compressive Ultimate Strength	56	MPa
20	Isotropic Thermal Conductivity	0,72	W m^-1 C^-1
21	Specific Heat	780	J kg^-1 C^-1

Fig. 5.1.1: Tabella delle proprietà fisico-meccaniche del materiale inserito in Ansys

Una volta inseriti i dati meccanici del materiale oggetto di studio, si definiscono le geometrie dei provini. Di seguito saranno elencati i cinque modelli che sono stati realizzati per studiare il conglomerato, nell'ordine abbiamo: compressione, flessione su tre punti con provini lunghi 9cm, flessione su tre punti con provini lunghi 17cm, flessione su quattro punti con provini lunghi 21cm e triplette.

Modello FEM a Compressione

I modelli FEM dei cubi testati a compressione sono stati realizzati modellando cinque macro elementi. L'obiettivo è confrontare il grafico uscente dai test sperimentali con il grafico risultante dalla modellazione. Lo strato dov'è presente l'interruzione temporale e l'aggiunta della malta cementizia è tra il secondo e terzo strato stampato, quindi si è deciso di semplificare il modello FEM realizzando cinque macro elementi. (Zhang, 2024)
I cubi realizzati sono di dimensioni uguali a quelli testati: 10x10x10 cm e nella modellazione i cinque strati hanno spessore 2cm che è in linea con quanto realizzato con stampa tridimensionale. Ogni singolo strato ha le seguenti dimensioni 2x10x10cm i quali formano un cubo con le dimensioni da normativa EN UNI 12390-3.
Per avere un parallelismo con i provini sperimentali, i cinque strati sono stati modellati come volumi ben distinti che però si comportano a livello meccanico come un elemento solido unico grazie al coefficiente di attrito inserito tra le facce dei singoli elementi che si toccano. (Zhang, 2024)

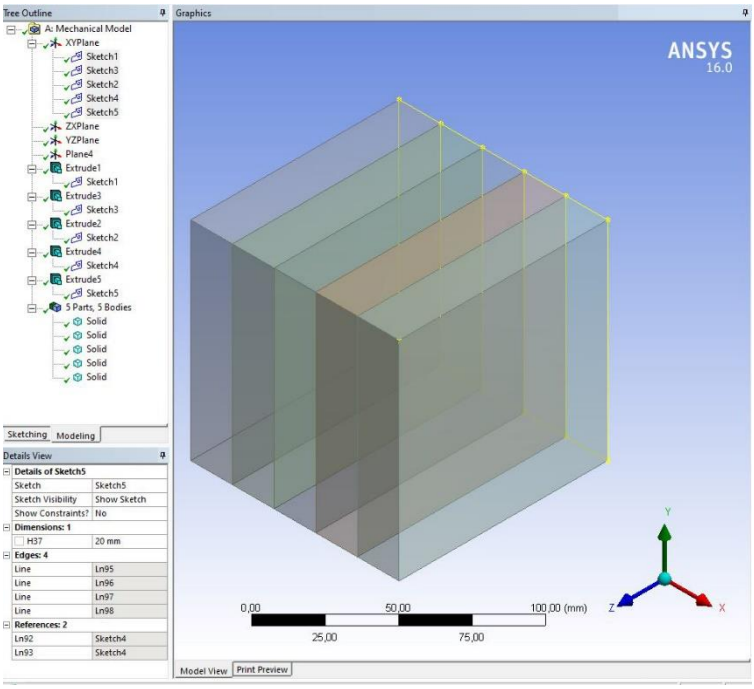


Fig. 5.1.2: Modellazione dei layer componenti il cubo 10x10x10 cm

Inserito il tipo di materiale con le caratteristiche prima elencate, si modella la connessione tra le facce interne. Data la particolarità del provino alle facce è stata applicata una connessione di attrito. Il coefficiente di attrito inserito manualmente ed è pari a 0,9 mentre le condizioni al contorno ed il trim contact sono gestiti dal programma. (Bester, 2019)

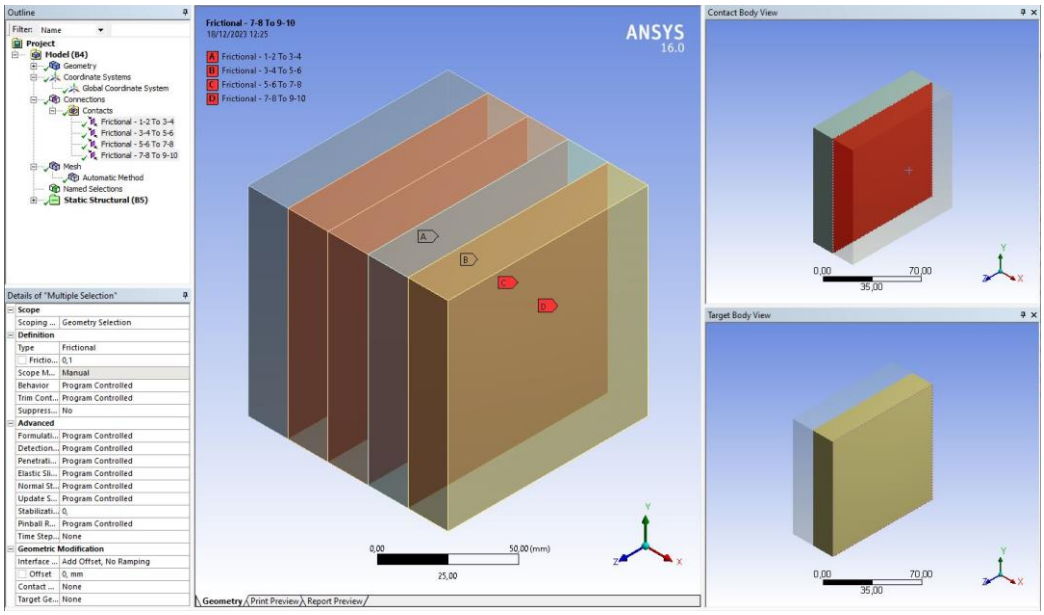


Fig. 5.1.3: Modellazione delle connessioni tra i layer

Le mesh inserite hanno dimensioni di 5mm e la generazione delle stesse è gestita in automatico dal programma.

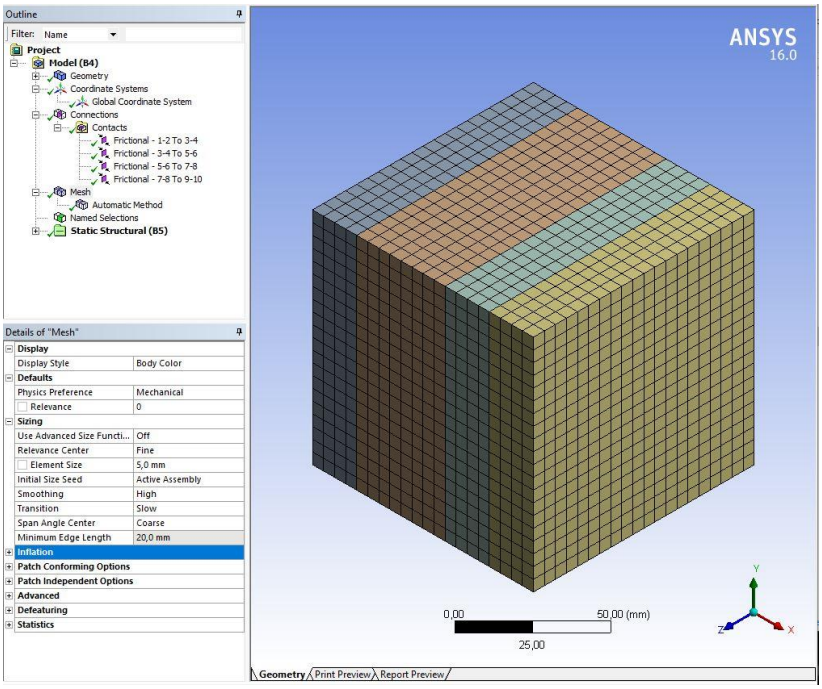


Fig. 5.1.4: Modellazione delle mesh

Contrariamente alla fase sperimentale, per dare la possibilità al modello di generare degli output soddisfacenti, si è dovuto vincolare la base del provino con un vincolo rigido che bloccasse tutte le direzioni e rotazione generate dalle forze sul provino. Per questo motivo alla base dei cinque macroelementi è stato applicato il vincolo di incastro. (Zhang, 2024)

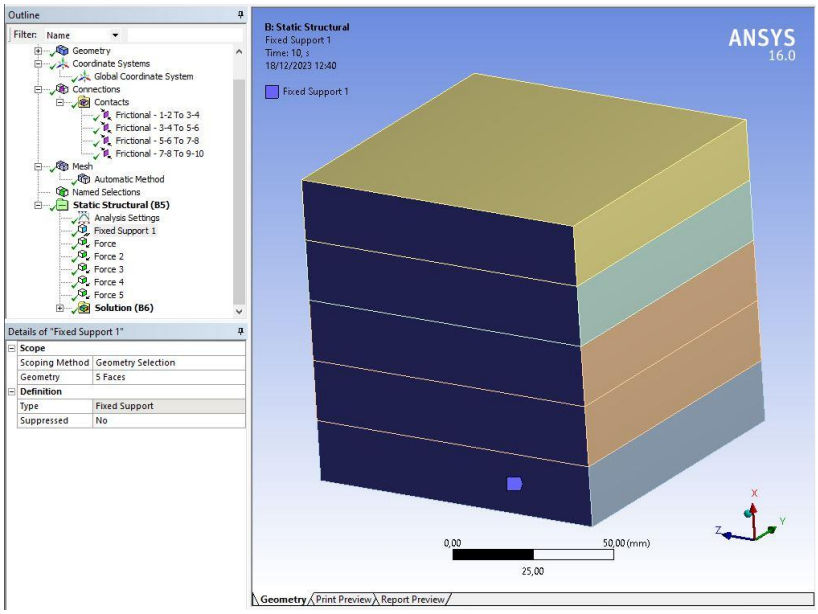


Fig. 5.1.5: Applicazione del vincolo alla base del provino.

Le forze che invece sono state applicate sono cinque (una per macroelemento) e vengono applicate con un andamento rettilineo graduale di 5.000 N fino ad arrivare a 50.000 N che rappresenta la forza sotto la quale i provini sperimentali sono collassati.

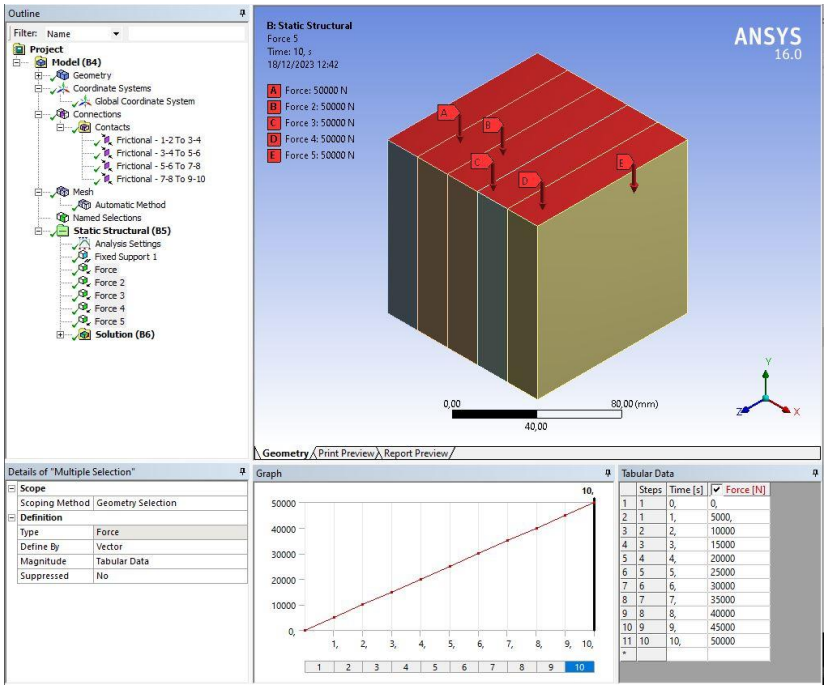


Fig. 5.1.6: Applicazione del carico sul provino.

Da questa modellazione si sono estrapolati digrammi di stress a compressione individuando nell'output della deformazione un diagramma simile a quello dei modelli sperimentali.

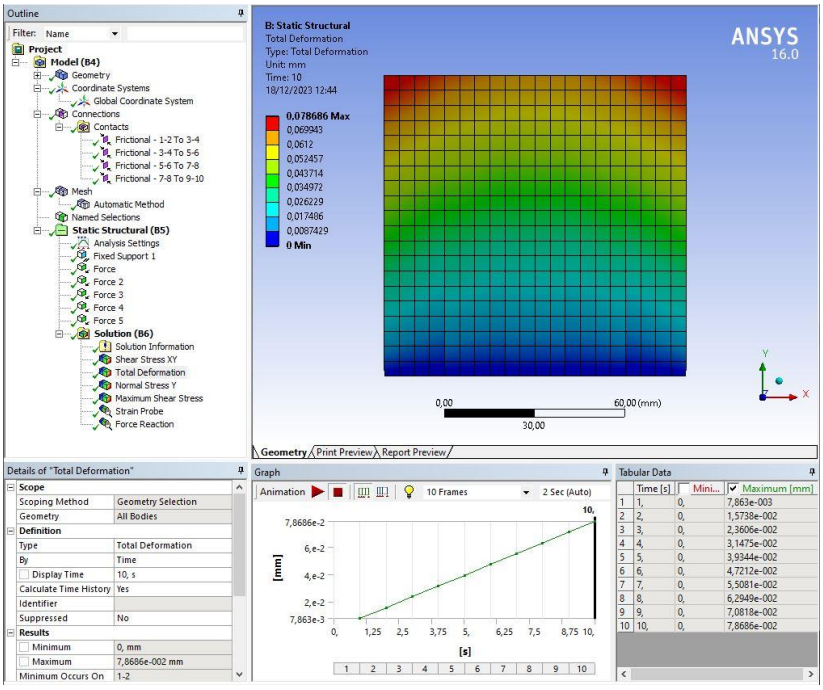


Fig. 5.1.7: Rappresentazione della deformazione sul provino.

Il secondo dato importante è lo "strian prob" che da come output la deformazione ε da correlare ai grafici delle deformazioni estrapolate dai dati degli strain-guages.

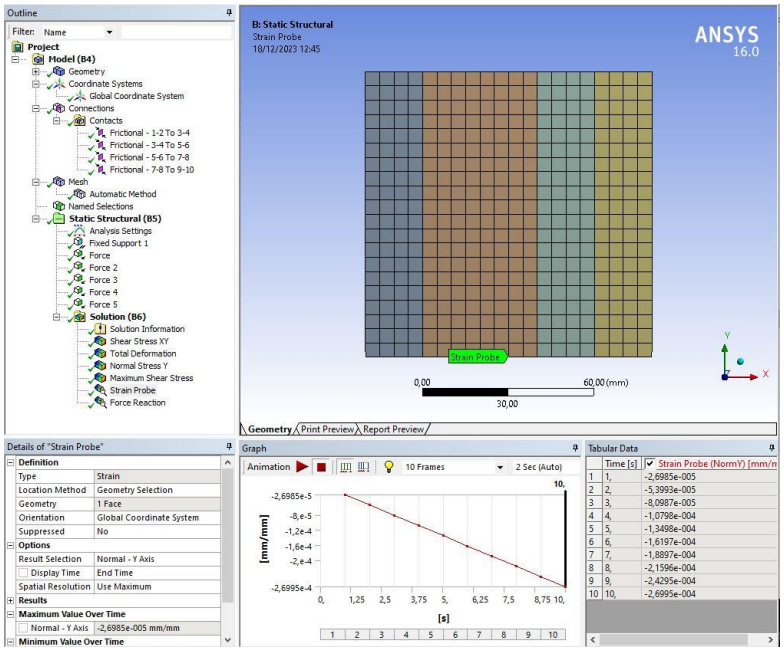


Fig. 5.1.8: Rappresentazione dello Strain Prob.

Modello FEM a Flessione su tre punti

I modelli FEM dei provini testati a flessione su tre punti sono stati realizzati modellando quattro macro elementi. L'obiettivo è confrontare il grafico uscente dai test sperimentali con il grafico risultante dalla modellazione. Lo strato dov'è presente l'interruzione temporale e l'aggiunta della malta cementizia è tra il primo ed il secondo strato stampato, quindi si è deciso di semplificare il modello FEM realizzando quattro macro elementi. (Mader, 2023)

I provini realizzati nel modello FEM sono di dimensioni uguali a quelli testati: 9x4x4 cm e 17x4x4 cm e nella modellazione i quattro strati hanno spessore 1cm che è in linea con quanto realizzato con la stampa tridimensionale. Ogni singolo strato ha le seguenti dimensioni 1x4x9cm e 1x4x17cm che insieme generano i provini con dimensioni consone alla normativa UNI EN 12390-4 2002.

Per avere un parallelismo con i provini sperimentali, i quattro strati sono stati divisi a loro volta a metà in corrispondenza della linea di forza. Così facendo si ottengono otto volumi disposti a coppie di due. Le unioni dei singoli volumi creano un volume unico che, a livello meccanico, si comporta come un elemento solido unico grazie al coefficiente di attrito inserito tra le facce dei singoli elementi che si toccano. (Mader, 2023)

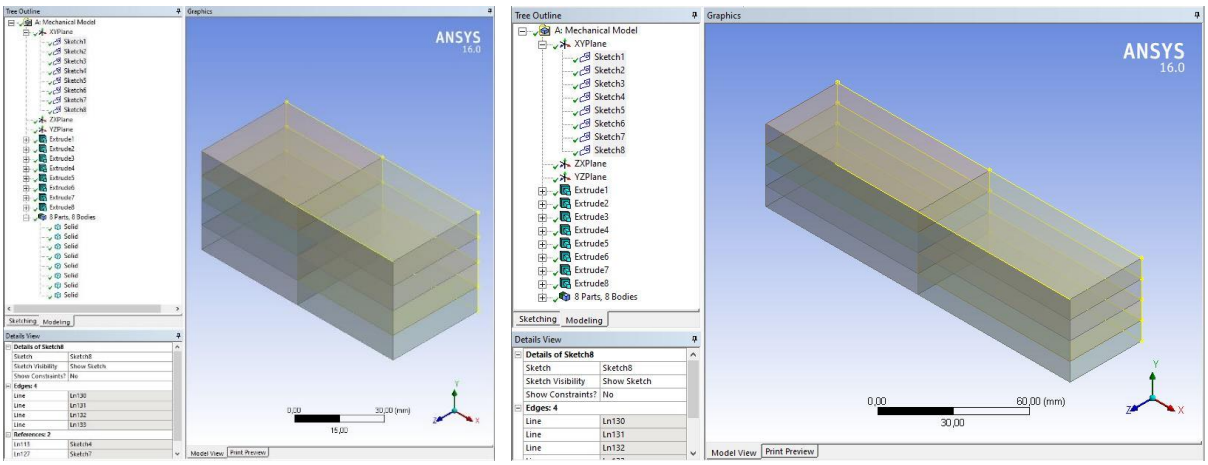


Fig. 5.1.9: Geometria dei provini 4x4x9cm *Fig. 5.1.10: Geometria dei provini 4x4x17cm*

Inserito il tipo di materiale con le caratteristiche prima elencate, si modella la connessione tra le facce interne. Data la particolarità del provino alle facce è stata applicata una connessione di attrito. Il coefficiente di attrito inserito manualmente ed è pari a 0,9 mentre le condizioni al contorno ed il "trim contact" sono gestiti dal programma. Si è volutamente inserito un coefficiente di attrito alto in quanto l'elemento si comporta come un unico solido. (Mader, 2023)

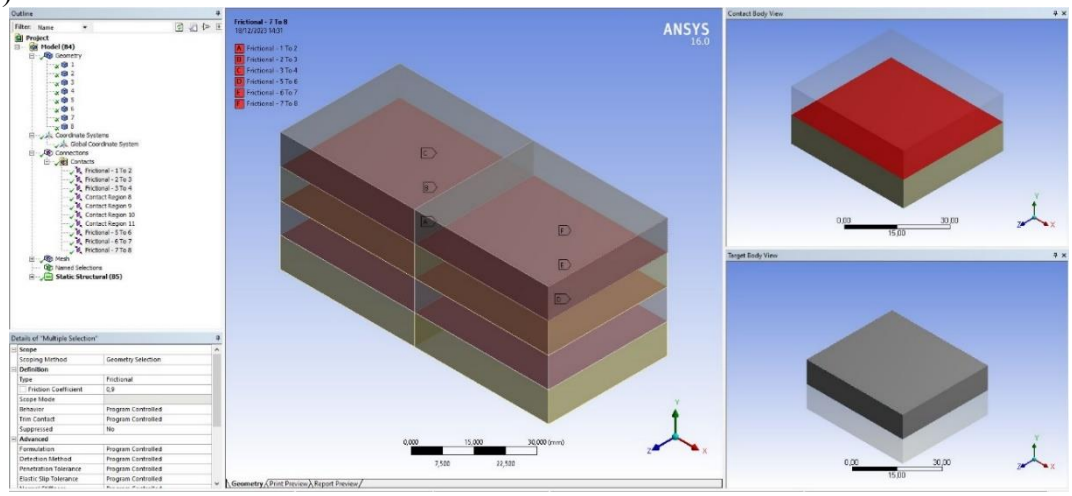


Fig. 5.1.11: Connessioni tra le superfici lungo il piano xz su provini 4x4x9cm

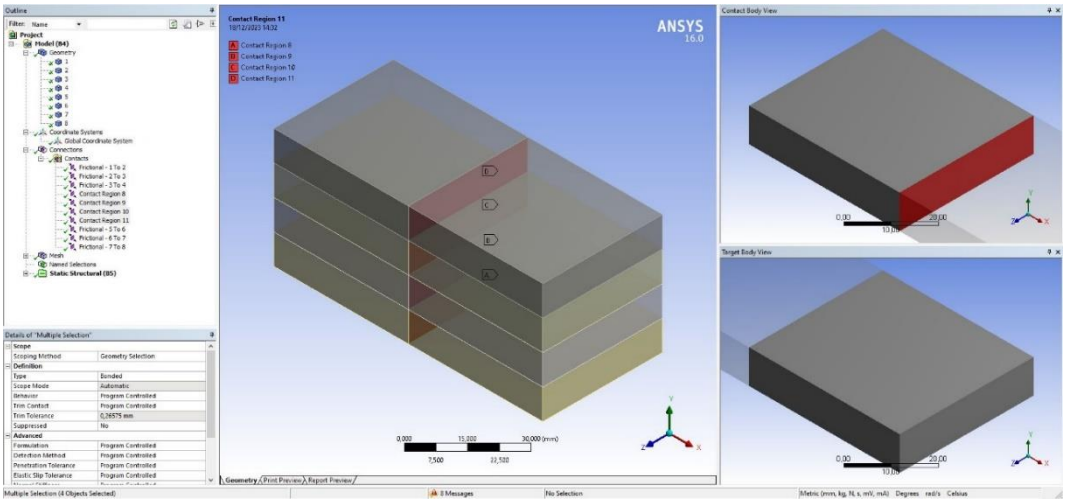


Fig. 5.1.12: Connessioni tra le superfici lungo il piano yz su provini 4x4x9cm

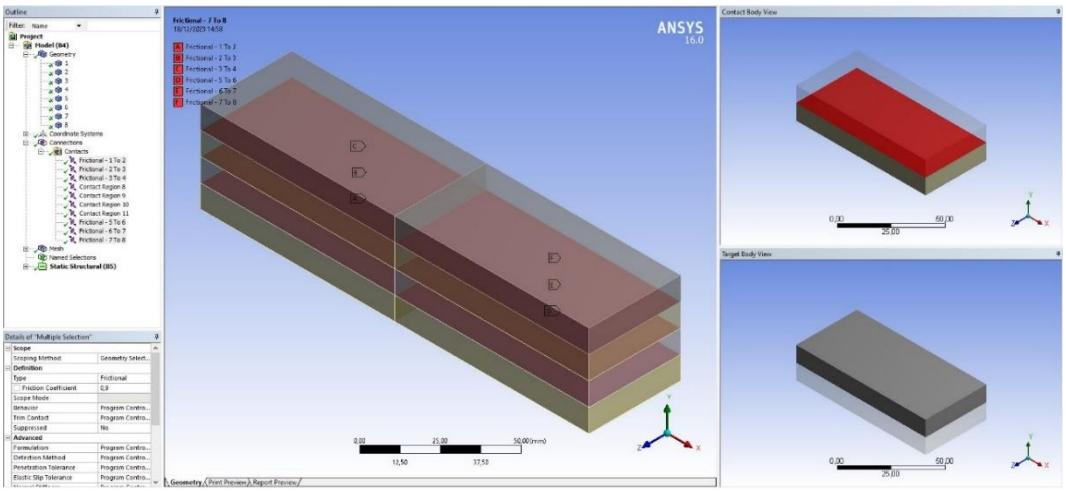


Fig. 5.1.13: Connessioni tra le superfici lungo il piano xz su provini 4x4x17cm

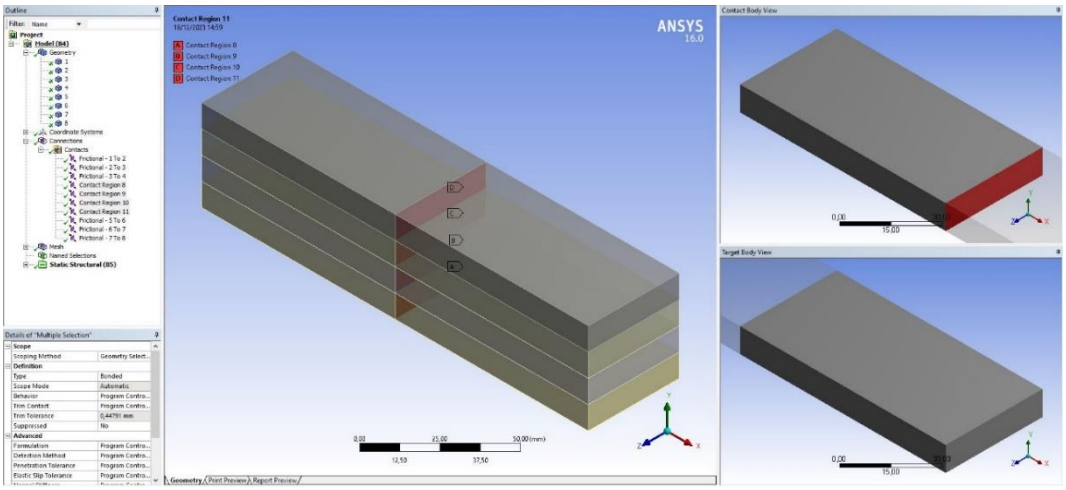


Fig. 5.1.14: Connessioni tra le superfici lungo il piano yz su provini 4x4x17cm

Le mesh inserite hanno dimensioni di 5mm e la generazione delle stesse è gestita in automatico dal programma.

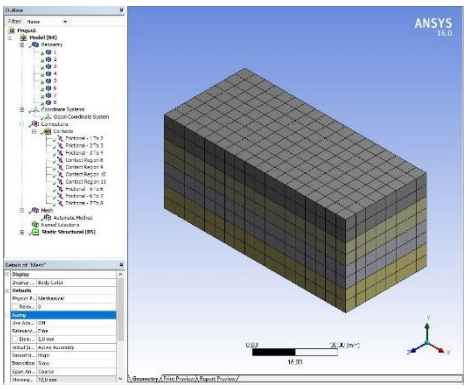


Fig. 5.1.15: Mesh, provini 4x4x9cm

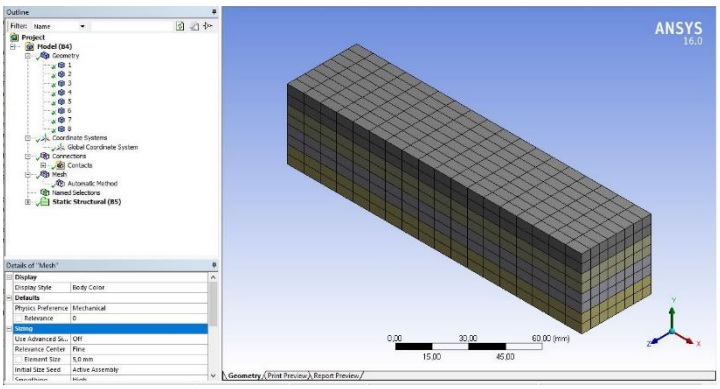


Fig. 5.1.16: Mesh, provini 4x4x17cm

Contrariamente alla fase sperimentale, per dare la possibilità al modello di generare degli output soddisfacenti, si è dovuto vincolare la base del provino con un vincolo rigido che bloccasse tutte le direzioni e rotazione generate dalle forze sul provino. Per questo motivo alla base dei cinque macroelementi è stato applicato il vincolo di cerniera.

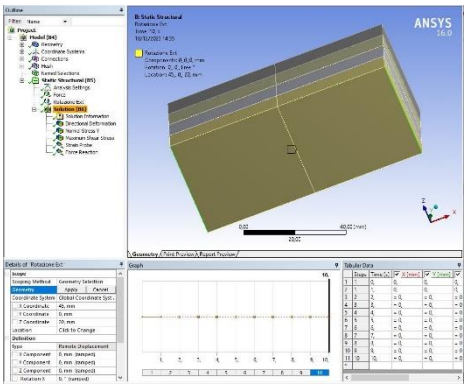


Fig. 5.1.17: Vincoli tipo cerniera, provini 4x4x9cm

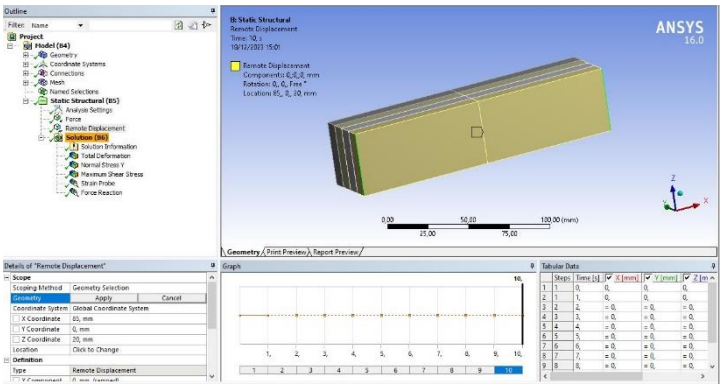


Fig. 5.1.18: Vincoli tipo cerniera, provini 4x4x17cm

Le forze che invece sono state applicate sono cinque (una per macroelemento) e vengono applicate con un andamento rettilineo graduale di 5.000 N fino ad arrivare a 50.000 N che rappresenta la forza sotto la quale i provini sperimentali sono collassati.

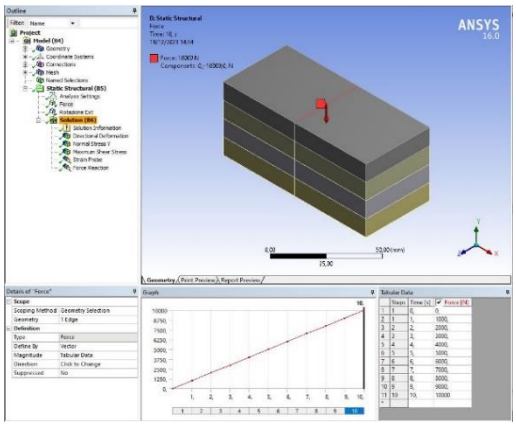


Fig. 5.1.19: Forza applicata, provini 4x4x9cm

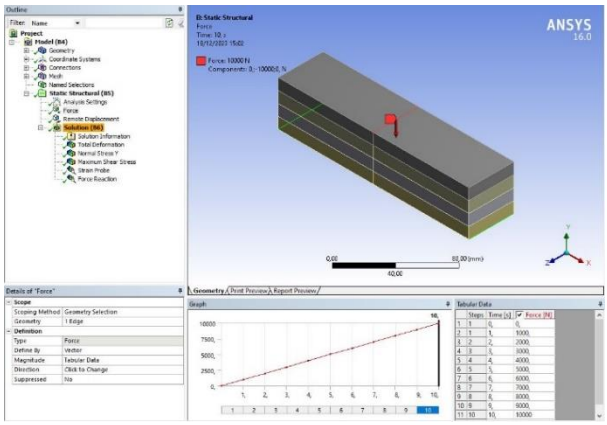


Fig. 5.1.20: Forza applicata, provini 4x4x17cm

Da questa modellazione si sono estrapolati digrammi di deformazione a flessione individuando nell'output dello stress a taglio sul piano xy un diagramma simile a quello dei modelli sperimentali.

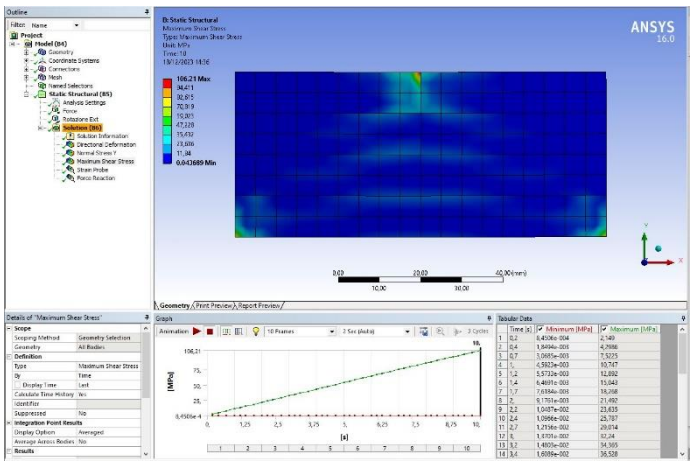


Fig. 5.1.21: Stress a taglio sul piano xy, provini 4x4x9cm

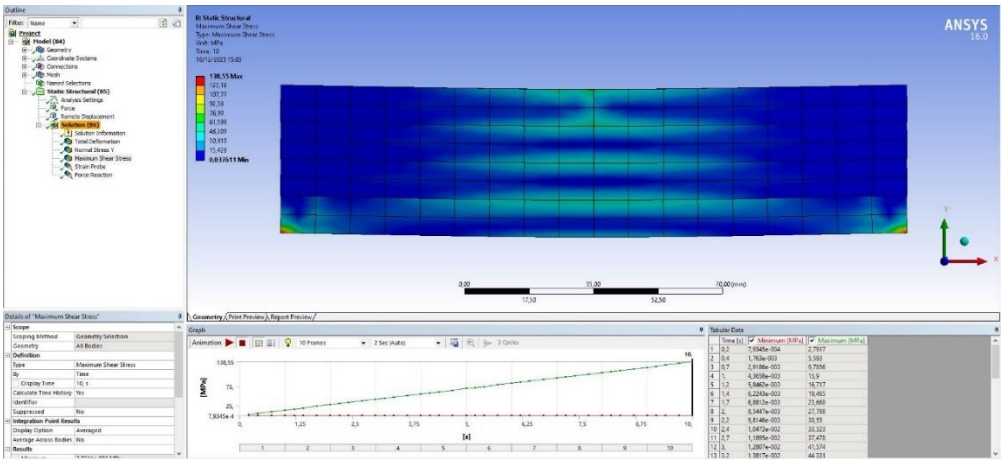


Fig. 5.1.22: Stress a taglio sul piano xy, provini 4x4x17cm

Il secondo dato importante è lo “strain prob” che da come output la deformazione ε da correlare ai grafici delle deformazioni estrapolate dai dati degli strain-guages.

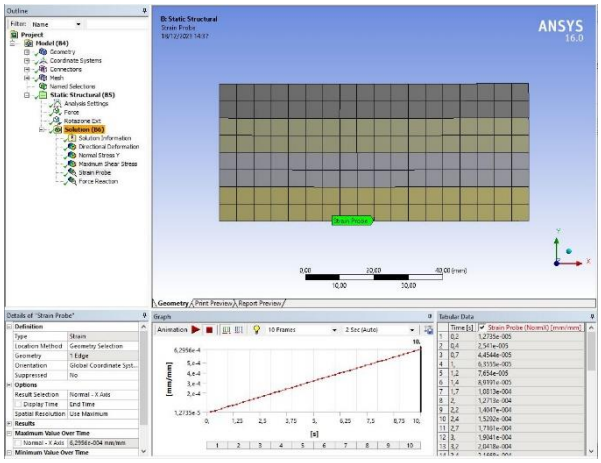


Fig. 5.1.23: Strain Prob, provini 4x4x9cm

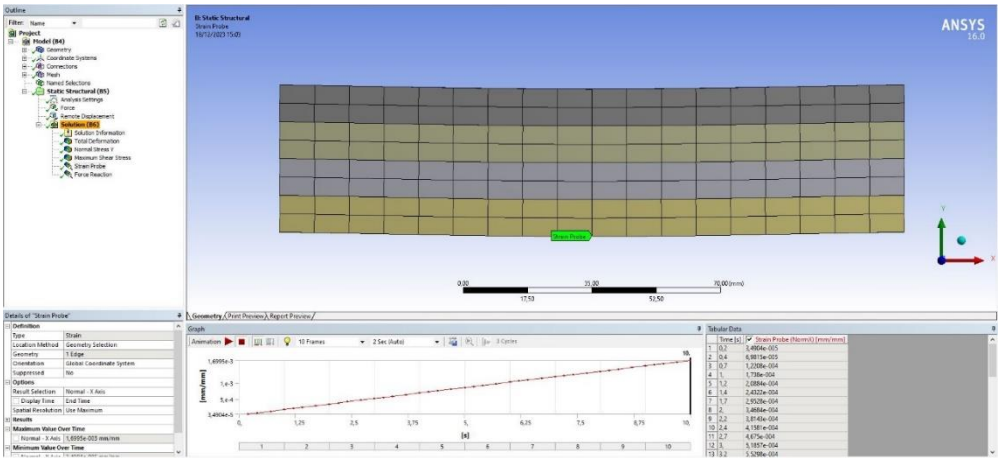


Fig. 5.1.24: Strain Prob, provini 4x4x17cm

Modello FEM a Flessione su quattro punti

I modelli FEM dei provini testati a flessione su quattro punti sono stati realizzati modellando quattro macro elementi. L’obiettivo è confrontare il grafico uscente dai test sperimentali con il grafico risultante dalla modellazione. Lo strato dov’è presente l’interruzione temporale e l’aggiunta della malta cementizia è tra il primo ed il secondo strato stampato, quindi si è deciso di semplificare il modello FEM realizzando quattro macro elementi. (Fu, 2022)
I provini realizzati nel modello FEM sono di dimensioni uguali a quelli testati secondo la normativa UNI EN 12390-4 2002: 21x4x4 cm e nella modellazione i quattro strati hanno spessore 1cm che è in linea con quanto realizzato con la stampa tridimensionale. Ogni singolo strato ha le seguenti dimensioni 1x4x21cm.
Per avere un parallelismo con i provini sperimentali, i quattro strati sono stati divisi a loro volta in tre blocchi con pari dimensioni. Così facendo si ottengono dodici volumi disposti a terzetti. Le unioni dei singoli volumi creano un volume unico che, a livello meccanico, si comporta come un elemento solido unico grazie al coefficiente di attrito inserito tra le facce dei singoli elementi che si toccano.

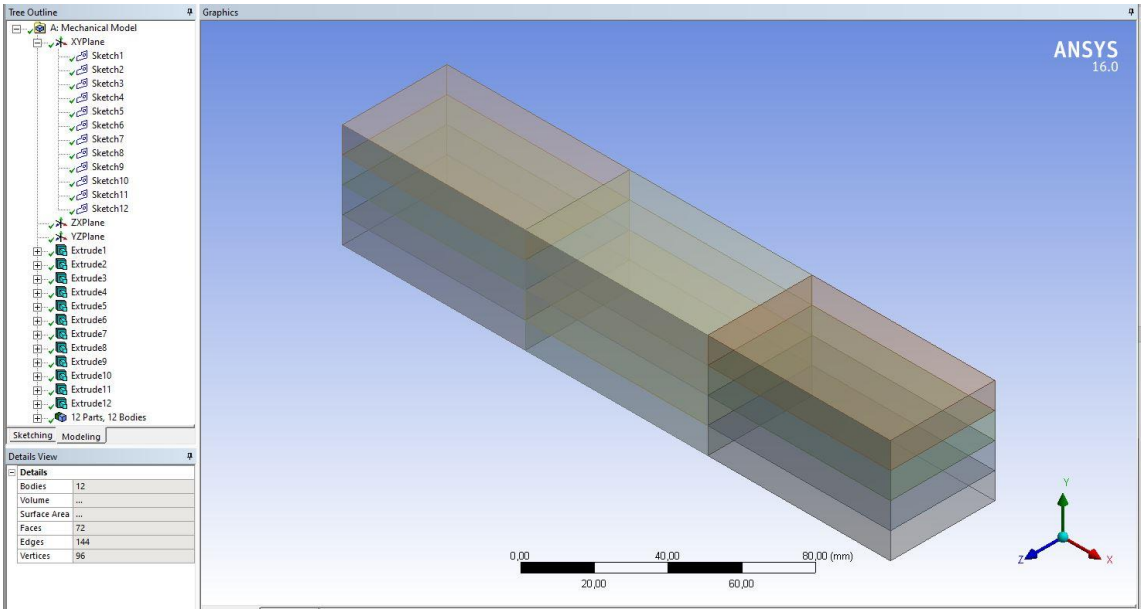


Fig. 5.1.25: Geometria provini 4x4x21cm

Inserito il tipo di materiale con le caratteristiche prima elencate, si modella la connessione tra le facce interne. Data la particolarità del provino alle facce è stata applicata una connessione di attrito. Il coefficiente di attrito inserito manualmente ed è pari a 0,9 mentre le condizioni al contorno ed il "trim contact" sono gestiti dal programma. Si è volutamente inserito un coefficiente di attrito alto in quanto l'elemento si comporta come un unico solido. (Fu, 2022)

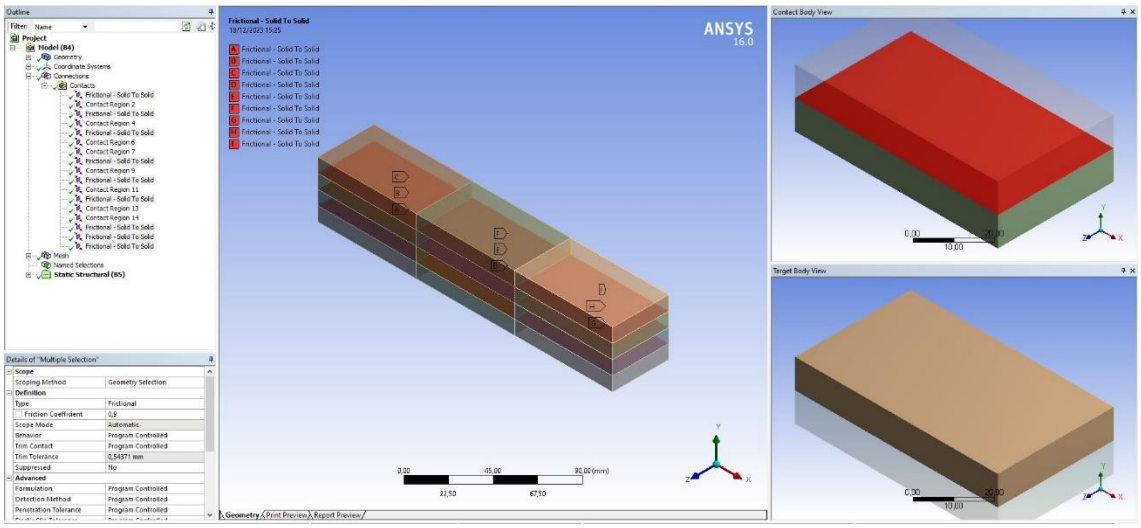


Fig. 5.1.26: Connessione tra superfici sul piano xz, provini 4x4x21cm

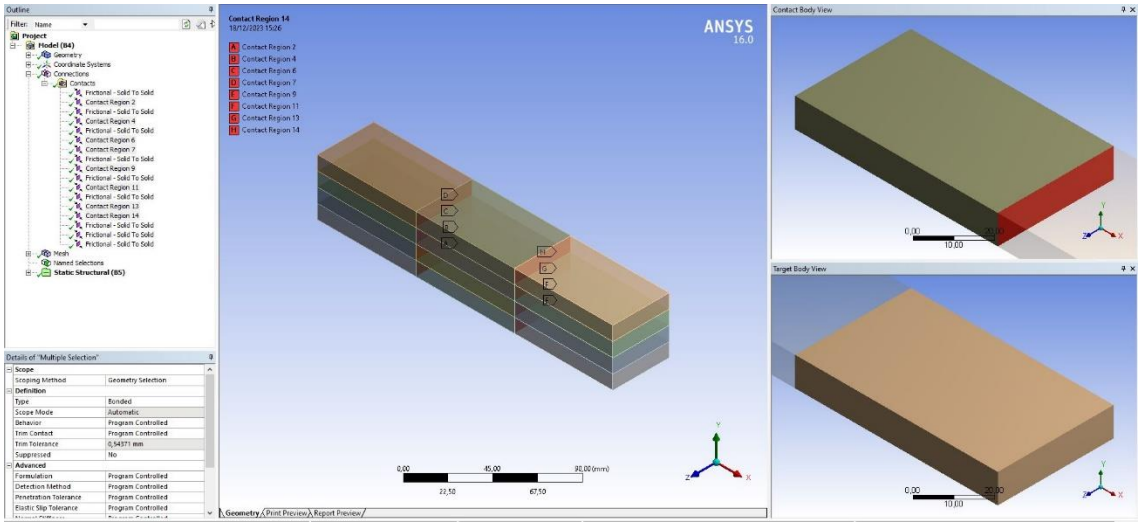


Fig. 5.1.27: Connessione tra superfici sul piano yz, provini 4x4x21cm

Le mesh inserite hanno dimensioni di 5mm e la generazione delle stesse è gestita in automatico dal programma.

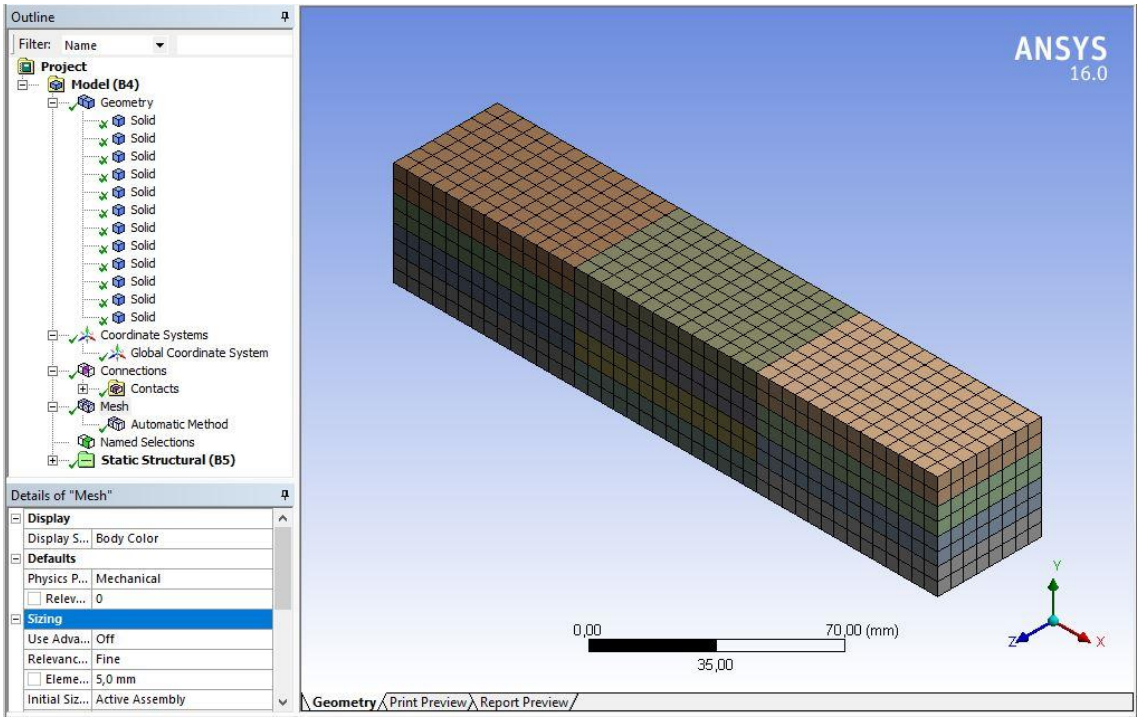


Fig. 5.1.28: Mesh, provini 4x4x21cm

Contrariamente alla fase sperimentale, per dare la possibilità al modello di generare degli output soddisfacenti, si è dovuto vincolare la base del provino con un vincolo rigido che bloccasse tutte le direzioni e rotazione generate dalle forze sul provino. Per questo motivo alla base dei cinque macroelementi è stato applicato il vincolo di incastro. (Fu, 2022)

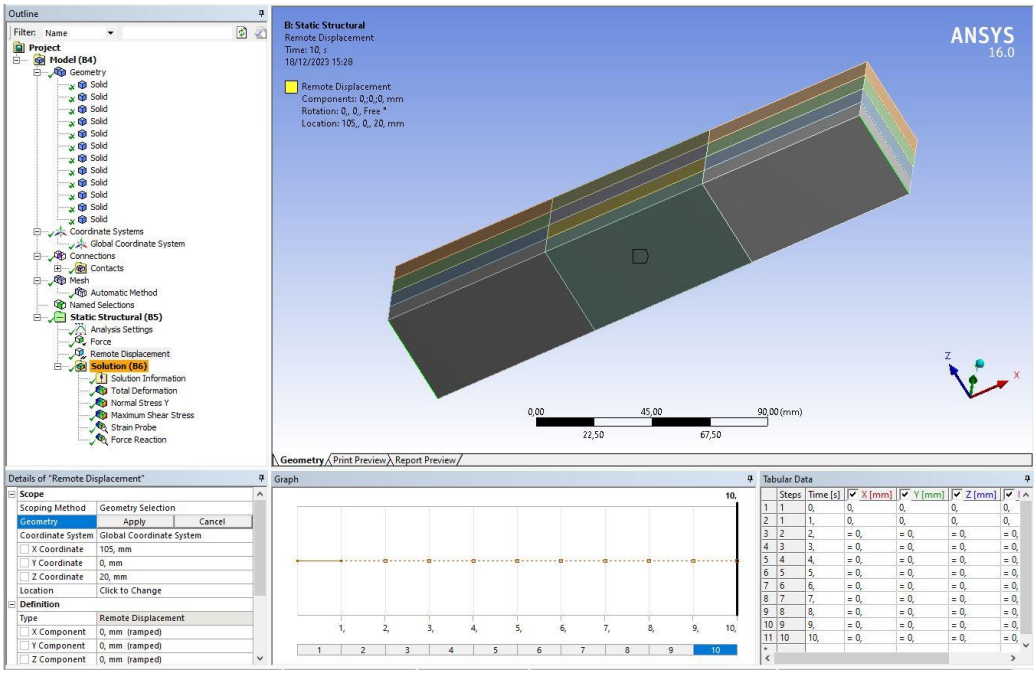


Fig. 5.1.29: Vincoli di tipo cerniera, provini 4x4x21cm

Contrariamente dalla prova sperimentale, al modello è stata associata una forza distribuita su tutta la superfice dell'elemento centrale. La forza ha un andamento rettilineo graduale di 1.000 N fino ad arrivare a 10.000 N che rappresenta la forza sotto la quale i provini sperimentali sono collassati.

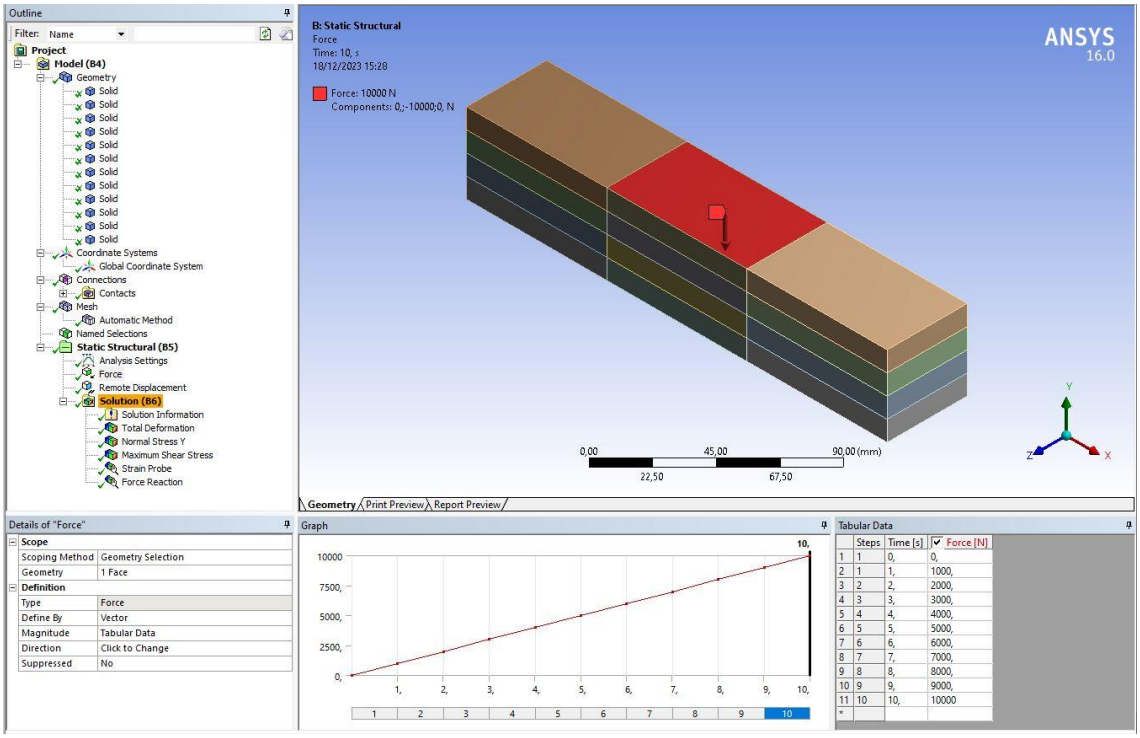


Fig. 5.1.30: Forza applicata in mezzeria, provini 4x4x21cm

Da questa modellazione si sono estrapolati digrammi di deformazione a flessione individuando nell'output dello stress a taglio sul piano xy un diagramma simile a quello dei modelli sperimentali.

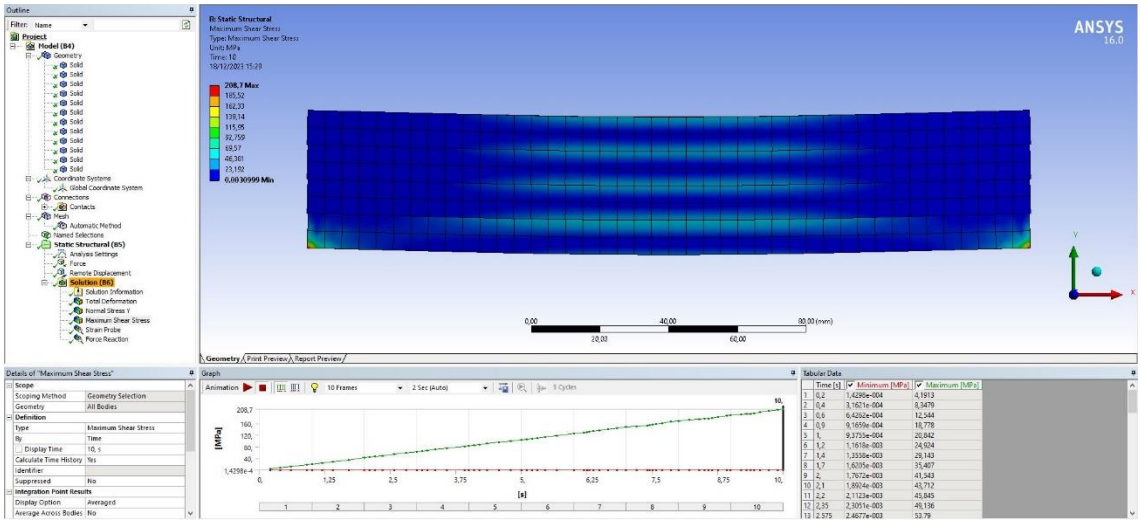


Fig. 5.1.31: Stress a taglio sul piano xy, provini 4x4x21cm

Il secondo dato importante è lo "strain prob" che da come output la deformazione ε da correlare ai grafici delle deformazioni estrapolate dai dati degli strain-guages.

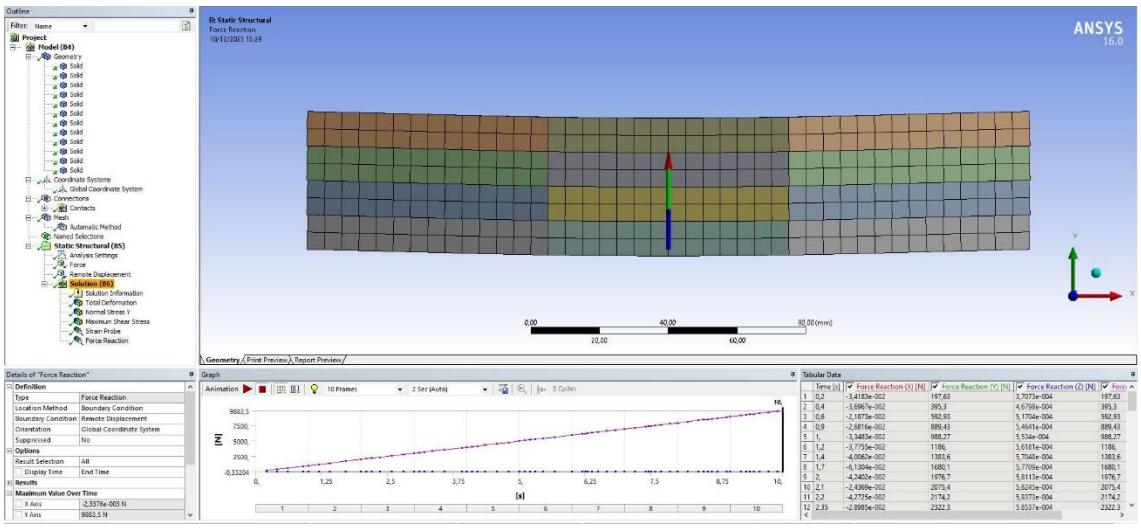


Fig. 5.1.32: Strain Prob, provini 4x4x21cm

Modello FEM a Triplette

I modelli FEM delle triplette testate a taglio per attrito sono stati realizzati modellando tre macro elementi. L'obiettivo è confrontare il grafico uscente dai test sperimentali con il grafico risultante dalla modellazione. Lo strato dov'è presente l'interruzione temporale e l'aggiunta della malta cementizia è tra il secondo e terzo strato stampato, quindi si è deciso di semplificare il modello FEM realizzando tre macro elementi. (De Nardi, 2018)

Le triplette modellate sono di dimensioni uguali a quelli testati (i quali seguono la normativa EN 1052-3:2002/A1:2007): 6x4x15 cm e nella modellazione i tre strati "conci" hanno spessore 2cm che è in linea con quanto realizzato con stampa tridimensionale. Ogni singolo elemento (concio) ha le seguenti dimensioni 2x4x15cm. Per avere un parallelismo con i provini sperimentali, i tre macro-elementi sono stati modellati come volumi ben distinti che però si comportano a livello meccanico come un elemento solido unico grazie al coefficiente di attrito inserito tra le facce dei singoli elementi che si toccano. (De Nardi, 2018)

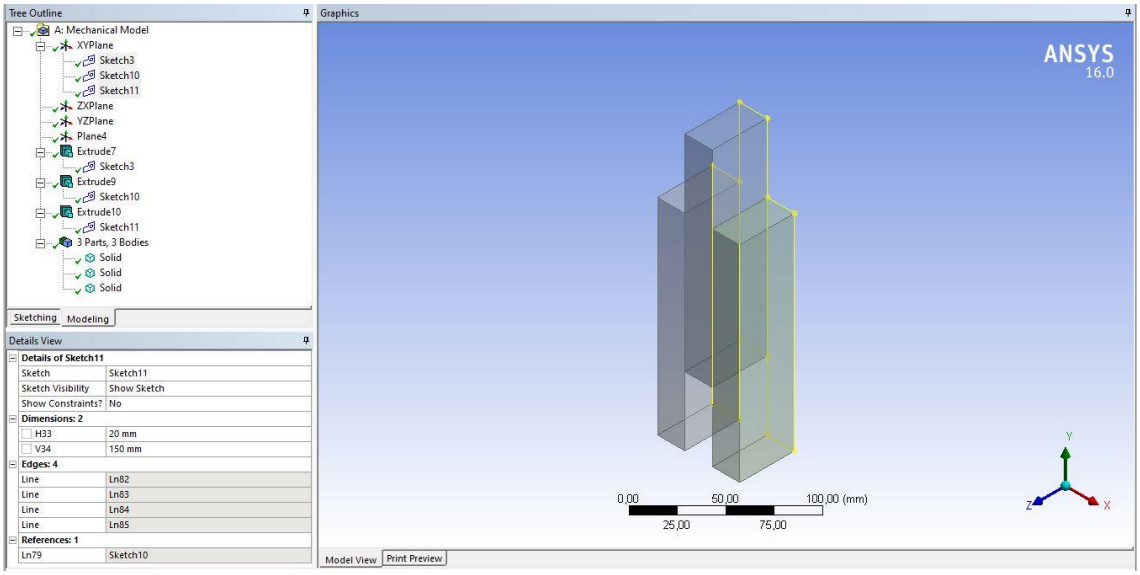


Fig. 5.1.33: Geometria delle triplette 6x4x15cm

Inserito il tipo di materiale con le caratteristiche prima elencate, si modella la connessione tra le facce interne. Data la particolarità del provino alle facce è stata applicata una connessione di attrito. Il coefficiente di attrito inserito manualmente ed è pari a 0,9 mentre le condizioni al contorno ed il trim contact sono gestiti dal programma. (Hua, 2023)

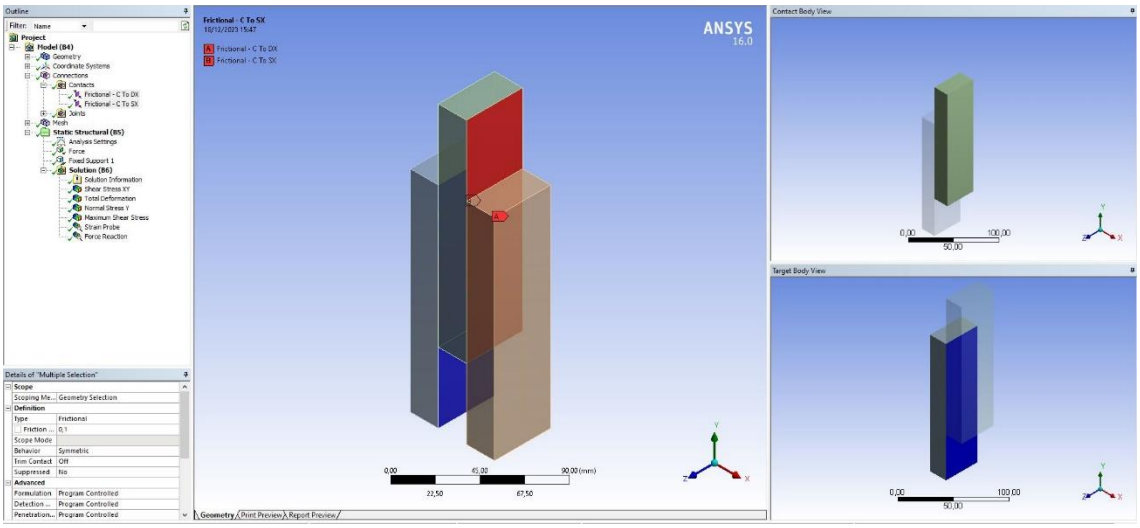


Fig. 5.1.34: Connessione tra superfici sul piano yz, triplette 6x4x15cm

Le mesh inserite hanno dimensioni di 5mm e la generazione delle stesse è gestita in automatico dal programma.

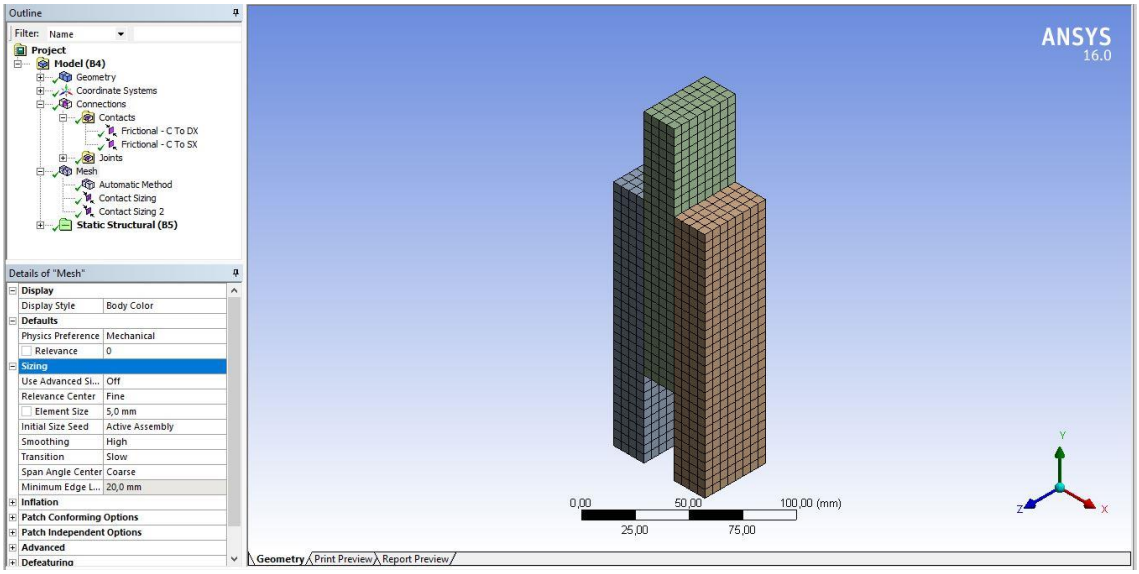


Fig. 5.1.35: Mesh, triplette 6x4x15cm

Contrariamente alla fase sperimentale, per dare la possibilità al modello di generare degli output soddisfacenti, si è dovuto vincolare la base del provino con un vincolo rigido che bloccasse tutte le direzioni e rotazione generate dalle forze sul provino. Per questo motivo alla base dei cinque macroelementi è stato applicato il vincolo di incastro. (Hua, 2023)

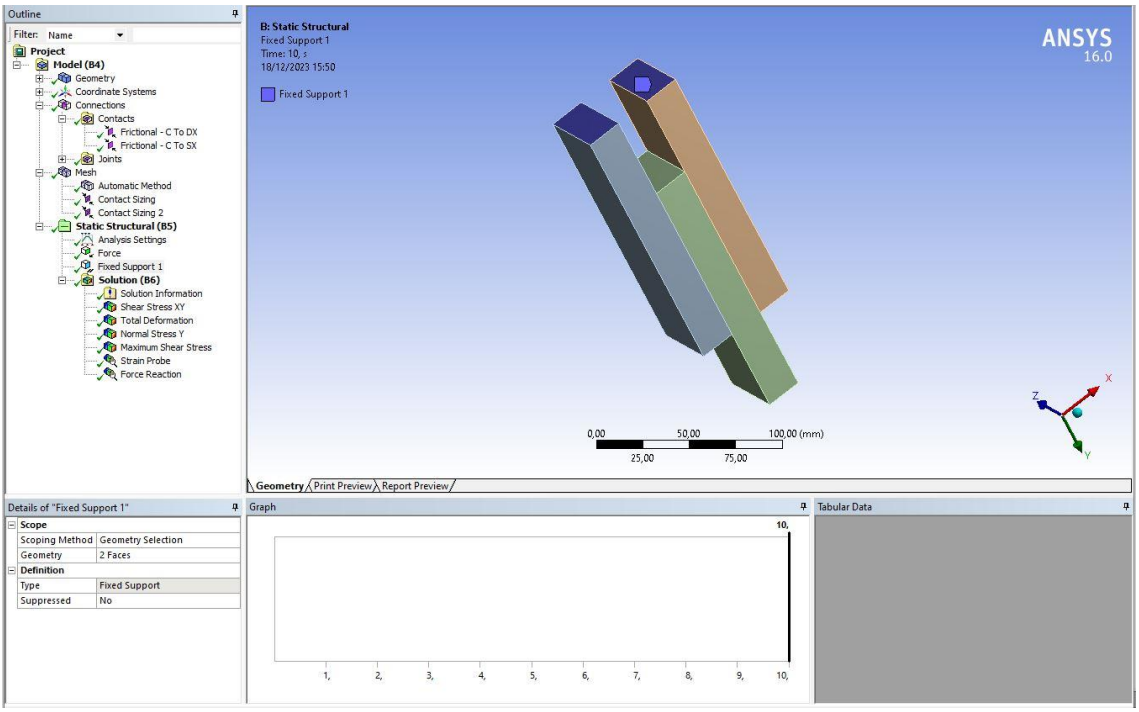


Fig. 5.1.36: Vincoli di tipo a incastro, triplette 6x4x15cm

Le forze che invece sono state applicate sono cinque (una per macroelemento) e vengono applicate con un andamento rettilineo graduale di 5.000 N fino ad arrivare a 50.000 N che rappresenta la forza sotto la quale i provini sperimentali sono collassati.

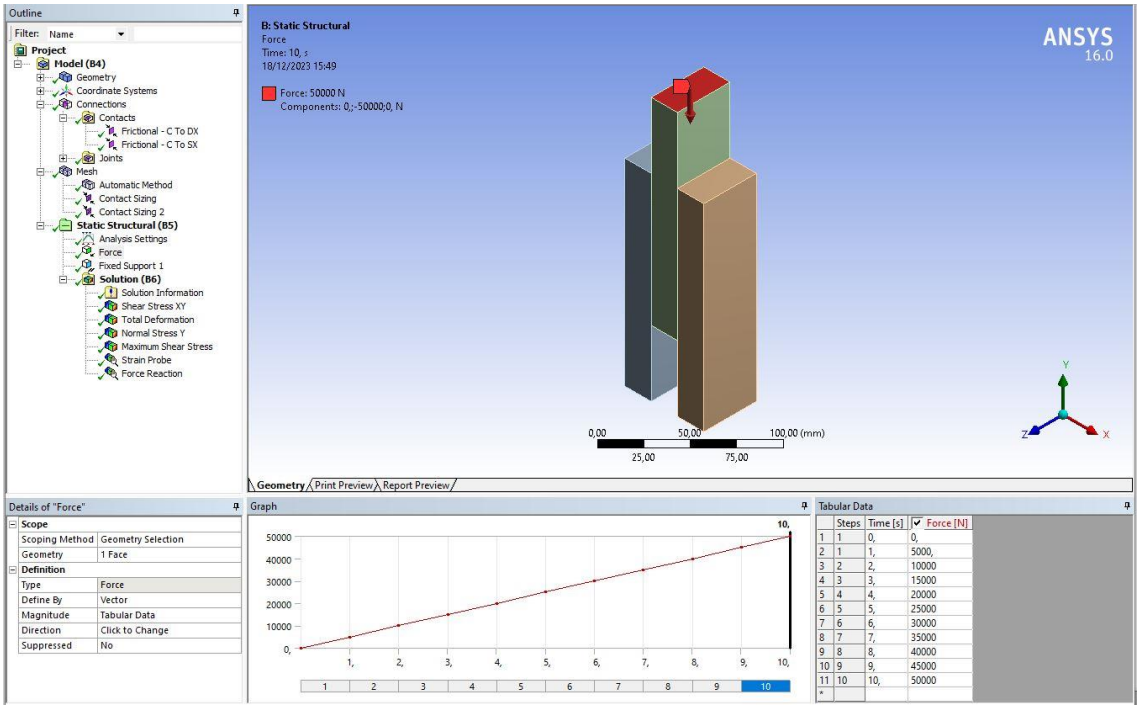


Fig. 5.1.37: Forza applicata, triplette 6x4x15cm

Da questa modellazione si sono estrapolati digrammi di stress a compressione individuando nell'output della deformazione un diagramma simile a quello dei modelli sperimentali.

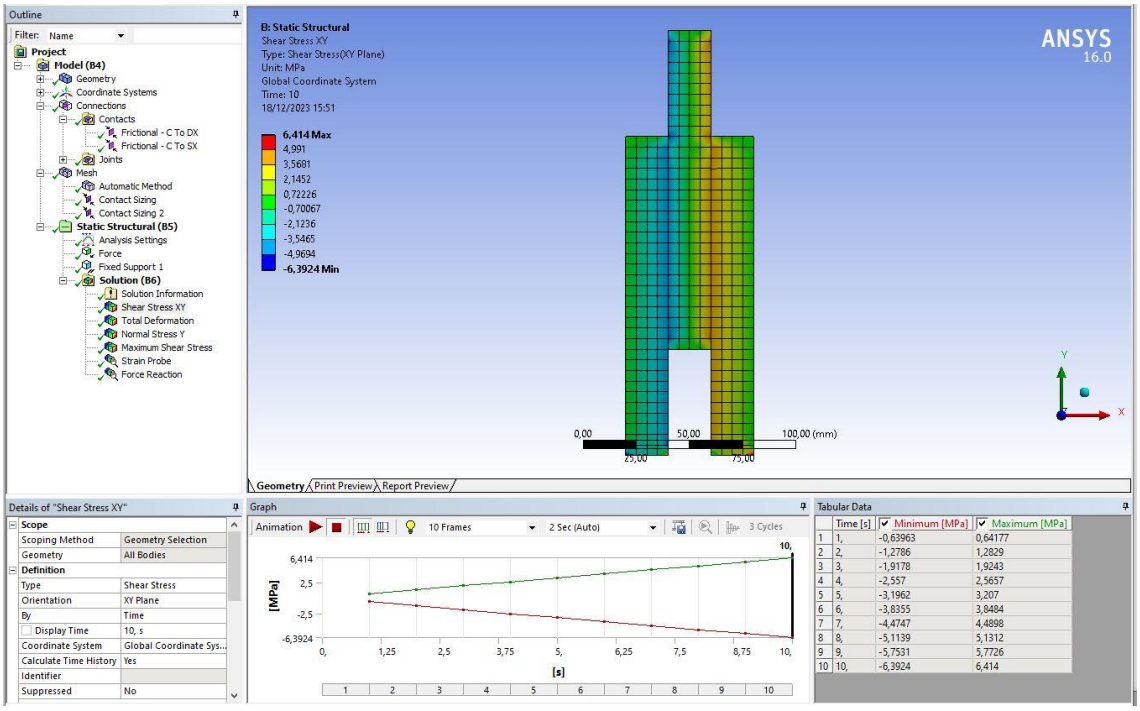


Fig. 5.1.38: Deformazione a taglio sul piano xy, triplette 6x4x15cm

Il secondo dato importante è lo "strain prob" che da come output la deformazione ε da correlare ai grafici delle deformazioni estrapolate dai dati degli strain-guages. (Bretini, 2022)

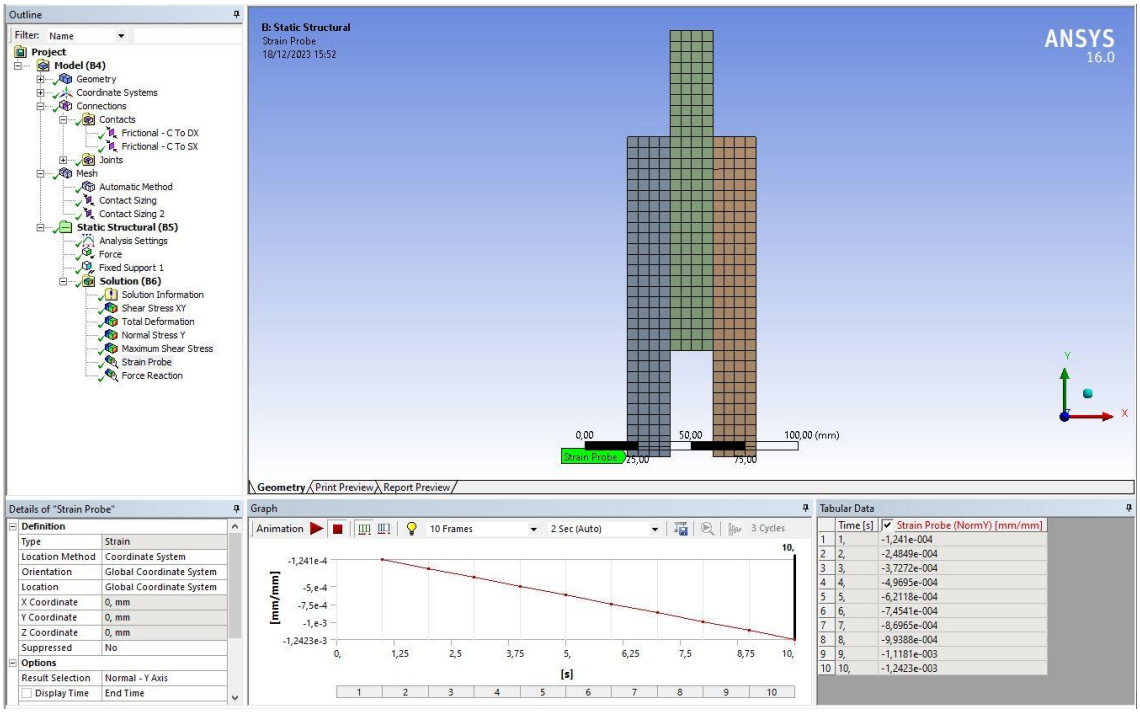


Fig. 5.1.39: Strain prob, triplette 6x4x15cm

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

Bretini A., Moro S., Russo S. 2022. *"Adhesion analysis between Concrete layers generated by a 3D Printing."* Key Engineering Materials, 916, 115-122. https://doi.org/10.4028/p-7sjq14

De Nardi C., A. Cecchi e L. Ferrara. 2018. "Assessing the influence of self-healing capacity of lime-based mortars on brick-mortar interface strength in masonry units" MATEC Web Conf., 199 02015. DOI: https://doi.org/10.1051/matecconf/201819902015

Fu J., H. Haeri, V. Sarfarazi, K. Asgari, e M. Fatehi Marji. 2022. "The shear behaviors of concrete-gypsum specimens containing double edge cracks under four-point loading conditions". *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 119: 103361. https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103361.

Hua T., A. Lin, W. J. D. Poh, C. De Hui, A. Wong, H. Zhang, Y. Z. Chan, W. Liu, e L. Zhao. 2023. "D-printed concrete shear keys: Design and experimental study". *Developments in the Built Environment* 15: 100180. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100180.

Liu, Haoran, Tao Ding, Jianzhuang Xiao, e Viktor Mechtcherine. «Buildability prediction of 3D–printed concrete at early-ages: A numerical study with Drucker–Prager model». *Additive Manufacturing* 55 (1 luglio 2022): 102821. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102821.

Zhang K., W. Lin, Q. Zhang, D. Wang e S. Luo. 2024. "Evaluation of anisotropy and statistical parameters of compressive strength for 3D printed concrete" *Construction and Building Materials* 440: 137417. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137417.

Bester F., A. Van Den Heever, M. Kruger, P. J., Zeranka, S., e Van Zijl G. P. A. G. 2019. "Benchmark structures for 3D concrete printing." *Proceedings of the fib Symposium* (pp. 305-312).

Mader T., M. Schreter-Fleischhacker, O. Shkundalova, M. Neuner, e G. Hofstetter. 2023. "Constitutive modeling of orthotropic nonlinear mechanical behavior of hardened 3D printed concrete" *Acta Mechanica* 234, fasc. 11: 5893–5918. https://doi.org/10.1007/s00707-023-03706-z.

Riferimenti normativi

EN 1052-3:2002/A1:2007: Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength

UNI EN 12390-3 2003 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione

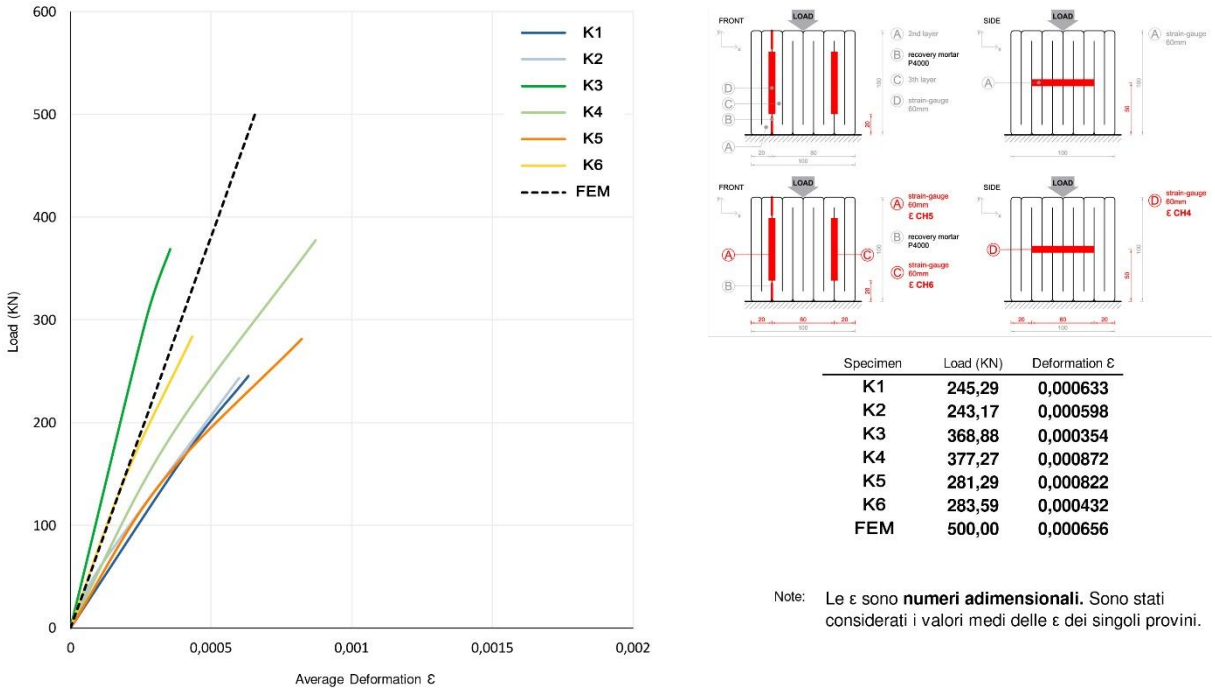
UNI EN 12390-4 2002 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 4: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova

6. Conclusioni

6.1 Confronto tra test sperimentali e modelli FEM

Compressione

La modellazione FEM riproduce esattamente le prove sperimentali eseguite, con la direzione del carico parallela alla direzione di stampa del composito cementizio.



Specimen	Load (KN)	Deformation ε
K1	245,29	0,000633
K2	243,17	0,000598
K3	368,88	0,000354
K4	377,27	0,000872
K5	281,29	0,000822
K6	283,59	0,000432
FEM	500,00	0,000656

Note: Le ε sono **numeri adimensionali.** Sono stati considerati i valori medi delle ε dei singoli provini.

Fig. 6.1.1: Grafico Carico – Deformazione puntuale, provini cubici 10x10x10cm

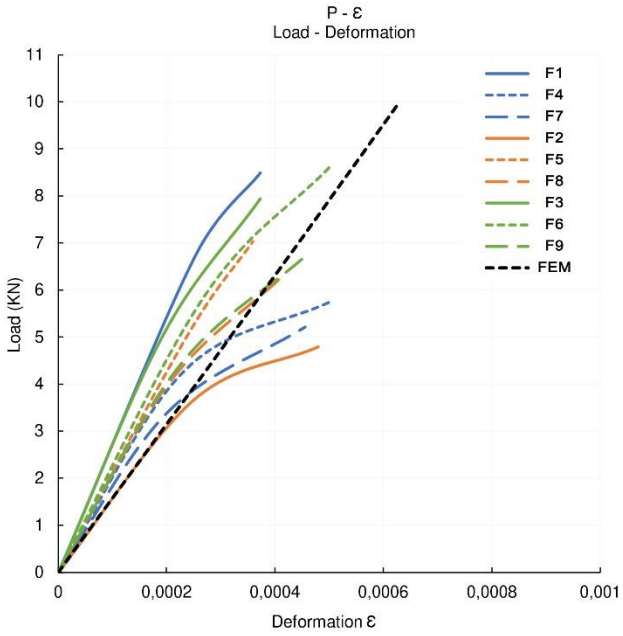
I test sperimentali a compressione hanno dato risultati soddisfacenti in quanto in linea con quanto estrapolato dal modello ad elementi finiti FEM. Durante la sperimentazione in laboratorio il provino che si è dimostrato più performante perché a parità di deformazione è collassato ad una forza superiore rispetto agli altri è il K4 (forza pari a 377 KN) mentre quello che è collassato ad una forza drasticamente inferiore è il K1. Se consideriamo come riferimento il modello FEM abbiamo, un provino cubico di lato 10 cm che ad una forza di 500KN subisce una deformazione media pari a 0,066%. (grafico fig. 6.1.1). L'andamento della curva rispecchia il comportamento rigido del materiale e rappresenta il punto di riferimento per tutti gli altri provini. Eseguendo un confronto dei risultati sperimentali con la modellazione FEM abbiamo che:

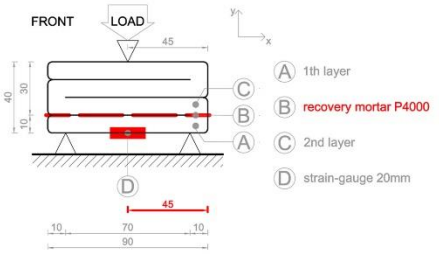
- I provini realizzati con stampa continua, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di molto inferiore (in media 50%);
- I provini realizzati con intervallo temporale, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza inferiore di poco (in media 30%);
- I provini realizzati con intervallo temporale e l'aggiunta della malta per la ripresa di getto, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di molto inferiore (in media 45%);

Si è dunque riscontrata una discreta aderenza tra risultati sperimentali e numerici per i provini K3 e K6 (grafico fig. 6.1.1). Questo risultato si ritiene soddisfacente in quanto bisogna considerare la congenita aleatorietà meccanica del tipo di materiale innovativo, oltre agli aspetti di viscosità, di qualità dell'adesione tra i layer e di porosità del materiale cementizio.

Flessione su tre punti. Lunghezza provini: 9cm

Sia durante la sperimentazione che durante la modellazione FEM, le prove sono state progettate considerando la linea di carico perpendicolare alla direzione di stampa.





Test Normative Reference: UNI EN 12390-5

Name of specimen	Load (KN)	Deformation ε
F1	8,49	0,000373
F2	5,75	0,000503
F3	5,22	0,000456
F4	4,79	0,000480
F5	7,03	0,000359
F6	6,30	0,000414
F7	7,94	0,000373
F8	8,63	0,000503
F9	6,71	0,000456
FEM	10,00	0,000630

Note: Le ε sono **numeri adimensionali.**

Fig. 6.1.2: Grafico Carico – Deformazione, provini flessione 4x4x9

I modelli FEM hanno fornito risultati soddisfacenti con i test sperimentali. Durante la sperimentazione in laboratorio il provino che si è dimostrato più performante perché a parità di deformazione è collassato ad una forza superiore rispetto agli altri è il F1 (8,49 KN) mentre quello che è collassato ad una forza di molto inferiore è l'F3 (grafico fig. 6.1.2). Se consideriamo come riferimento il modello FEM abbiamo un provino a forma di parallelepipedo di dimensioni 4x4x9 cm che ad una forza di 10KN subisce una deformazione media pari a 0,000630. (grafico fig. 6.1.2). L'andamento della curva rispecchia il comportamento rigido del materiale e rappresenta il punto di riferimento per tutti gli altri provini. Comparando i risultati sperimentali con la modellazione FEM abbiamo che:

- I provini realizzati con stampa continua, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di poco inferiore (28%);
- I provini realizzati con intervallo temporale, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di poco inferiore (25%);
- I provini realizzati con intervallo temporale e l'aggiunta della malta per la ripresa di getto, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di pochissimo inferiore (15%);

La collimazione tra risultati sperimentali e risultati numerici si ritiene complessivamente soddisfacente. Nella modellazione FEM il coefficiente di attrito è stato sottostimato per indagare la condizione più sfavorevole possibile. Ad eccezione dei provini F2, F4 e F7, tutti gli altri dimostrano un andamento in linea e superiore con quanto indicato dal modello FEM.

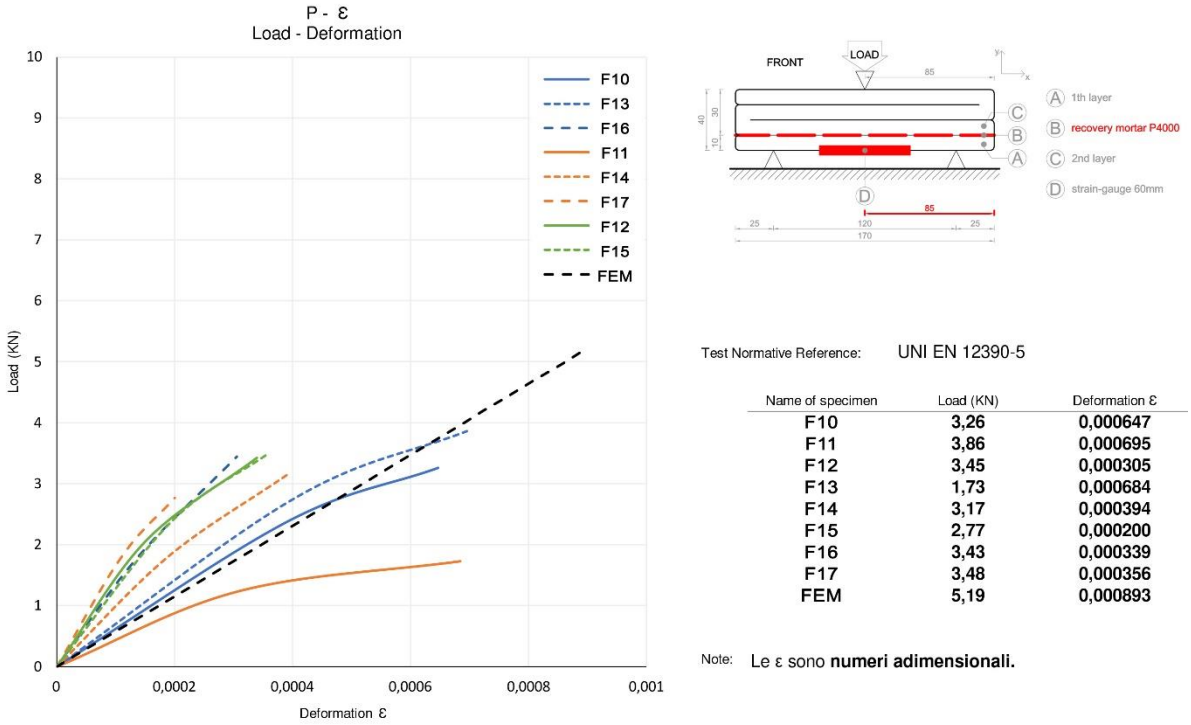
Flessione su tre punti. Lunghezza provini: 17cm

Sia la sperimentazione che la modellazione FEM hanno tenuto conto della direzione del carico perpendicolare alla direzione di stampa del materiale 3D.

Il modello FEM ha fornito risultati soddisfacenti in quanto in linea con i risultati sperimentali. Durante la sperimentazione in laboratorio il provino che è collassato ad una forza superiore rispetto agli altri è il F11 (3,86 KN) mentre quello che è collassato ad una forza di molto

inferiore è il F13 (1,73 KN). Se consideriamo come riferimento il modello FEM abbiamo un provino a forma di parallelepipedo di dimensioni 4x4x17 cm che ad una forza di 5,19KN subisce una deformazione media pari a 0,000893. (grafico fig. 6.1.3). L'andamento della curva rispecchia il comportamento rigido del materiale e rappresenta il punto di riferimento per tutti gli altri provini. Eseguendo un confronto dei risultati sperimentali con la modellazione FEM abbiamo che:

- I provini realizzati con stampa continua, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di pochissimo inferiore (7%) ad esclusione del provino F11;
- I provini realizzati con intervallo temporale, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di molto inferiore (40%);
- I provini realizzati con intervallo temporale e l'aggiunta della malta per la ripresa di getto, a parità di deformazione con la modellazione FEM, collassano ad una forza di molto inferiore (40%);



Name of specimen	Load (KN)	Deformation ε
F10	3,26	0,000647
F11	3,86	0,000695
F12	3,45	0,000305
F13	1,73	0,000684
F14	3,17	0,000394
F15	2,77	0,000200
F16	3,43	0,000339
F17	3,48	0,000356
FEM	5,19	0,000893

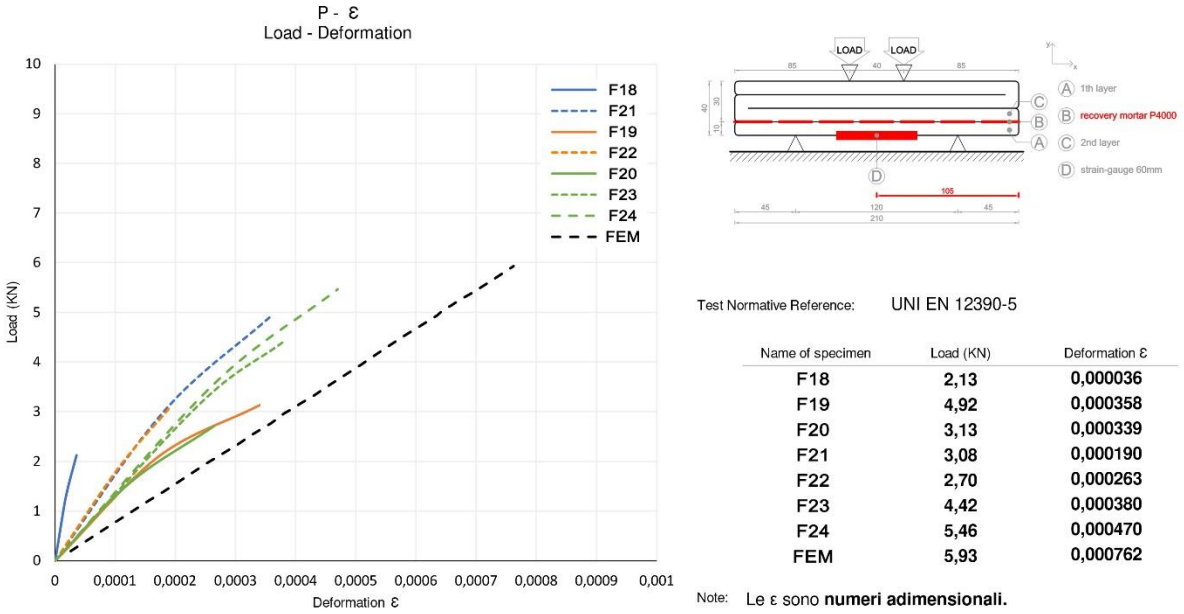
Fig. 6.1.3: Grafico Carico – Deformazione, provini flessione 4x4x17

La collimazione tra risultati sperimentali e risultati numerici si ritiene complessivamente soddisfacente. Nella modellazione FEM il coefficiente di attrito è stato sottostimato per indagare la condizione più sfavorevole possibile. Ad eccezione dei provini F11 e F14, tutti gli altri dimostrano un andamento in linea o superiore con quanto indicato dal modello FEM. (grafico fig. 6.1.3)

Flessione su quattro punti. Lunghezza provini: 21cm

Sia durante la sperimentazione che durante la modellazione FEM, le prove sono state progettate per testare i provini a flessione con la linea di carico perpendicolare alla direzione di stampa.
I test sperimentali a flessione su tre punti hanno dato risultati soddisfacenti in quanto in linea con quanto estrapolato dal modello ad elementi finiti FEM. Durante la sperimentazione in laboratorio il provino che è collassato ad una forza superiore rispetto agli altri è il F24 (5,46

KN) mentre quello che è collassato ad un carico più basso è il F21C-1 con un carico di 2,13 KN.



Name of specimen	Load (KN)	Deformation ε
F18	2,13	0,000036
F19	4,92	0,000358
F20	3,13	0,000339
F21	3,08	0,000190
F22	2,70	0,000263
F23	4,42	0,000380
F24	5,46	0,000470
FEM	5,93	0,000762

Fig. 6.1.4: Grafico Carico – Deformazione, provini flessione 4x4x21

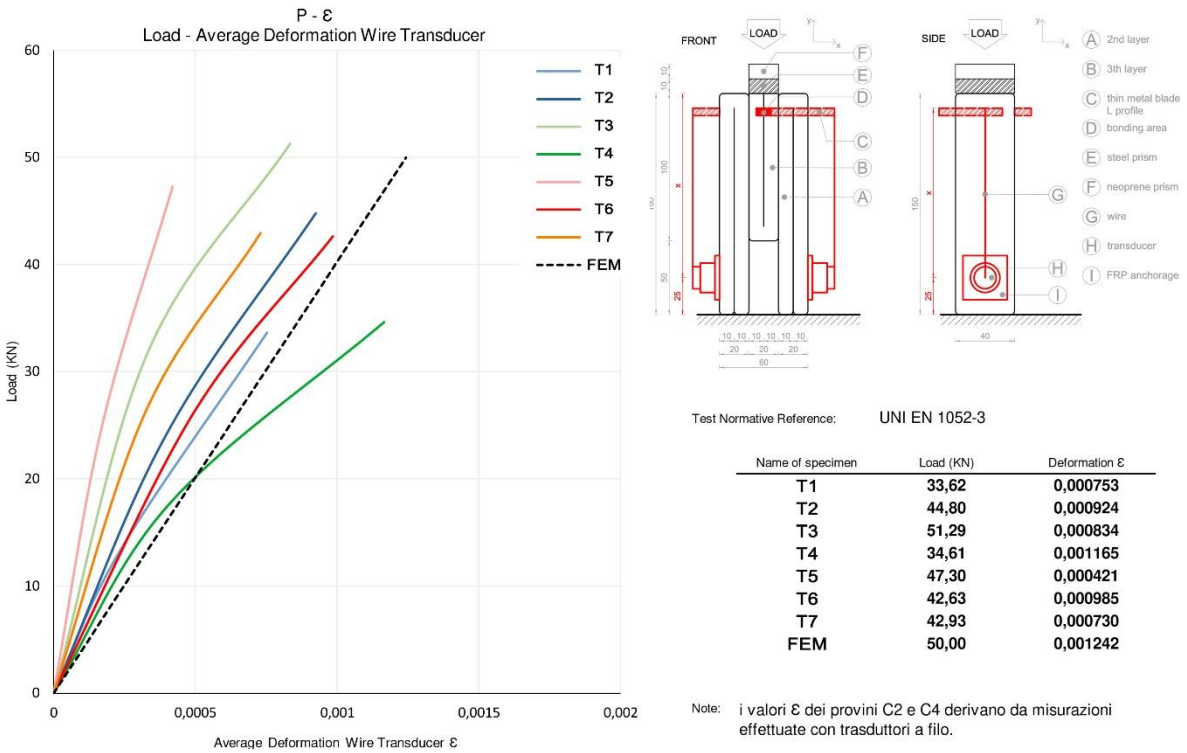
Se consideriamo come riferimento il modello FEM abbiamo un provino a forma di parallelepipedo di dimensioni 4x4x21 cm che ad una forza di 5,93KN subisce una deformazione media pari a 0,000762. (grafico fig. 6.1.4). L'andamento della curva rispecchia il comportamento rigido del materiale e rappresenta il punto di riferimento per tutti gli altri provini. Eseguendo un confronto dei risultati sperimentali con la modellazione FEM emerge che:

- Non tutti i provini hanno dimostrato una curva con andamento molto più rigido rispetto alla curva ricavata dalla modellazione FEM. Questa disparità è da individuare nelle caratteristiche del coefficiente di attrito inserito nella modellazione FEM il quale risulta sottostimato.
- Possiamo non considerare i dati provenienti dal provino F18 in quanto collassato ad una forza troppo bassa ad una deformazione minima dimostrando un'alta fragilità. Come vedremo nel paragrafo successivo, questi dati risentono anche della fluidità e viscosità del materiale, nonché della sua porosità.
- Si evidenzia un interessante aumento della resistenza a flessione nei provini realizzati con intervallo temporale e in quelli realizzati con l'aggiunta della malta per la ripresa di getto. Il cambio di materiale e il suo conseguente coefficiente di attrito ne modificano le prestazioni migliorandole.

Possiamo dire che i risultati evidenziano un accettabile agreement tra dati sperimentali e dati numerici

Triplette: stampa continua

Sia durante la sperimentazione che durante la modellazione FEM, le prove sono state progettate per testare i provini a taglio per attrito con la linea di carico parallela alla direzione di stampa.



Name of specimen	Load (KN)	Deformation ε
T1	33,62	0,000753
T2	44,80	0,000924
T3	51,29	0,000834
T4	34,61	0,001165
T5	47,30	0,000421
T6	42,63	0,000985
T7	42,93	0,000730
FEM	50,00	0,001242

Fig. 6.1.5: Grafico Carico – Deformazione, provini a stampa continua triplette 4x6x15

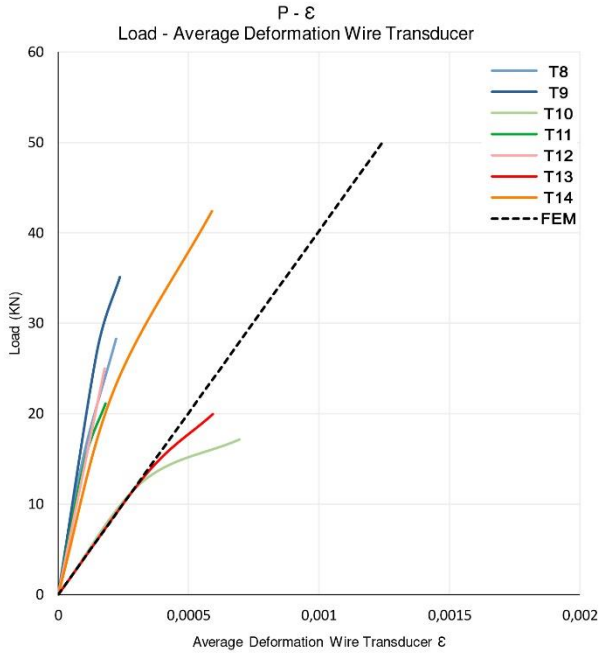
La modellazione FEM ha indicato prestazioni assimilabili a quelle ottenute dai test sperimentali. Durante la sperimentazione in laboratorio il provino che è collassato ad una forza superiore rispetto agli altri è il C4 (51,29 KN) mentre quello che è collassato ad una forza inferiore è il C2 con carico pari a 33,62 KN. Se consideriamo come riferimento il modello FEM abbiamo un provino a forma di tripletta di dimensioni 4x6x15 cm che ad una forza di 50 KN subisce una deformazione pari a 0,12%. (grafico fig. 6.1.5). L'andamento della curva rispecchia il comportamento del materiale e rappresenta il punto di riferimento per tutti gli altri provini. Eseguendo un confronto dei risultati sperimentali con la modellazione FEM emerge che:

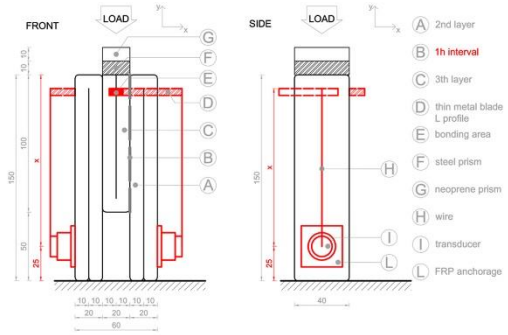
- Non tutti i provini hanno dimostrato una curva con andamento molto più rigido rispetto alla curva ricavata dalla modellazione FEM. Questa disparità è da individuare nelle caratteristiche del coefficiente di attrito inserito nella modellazione FEM il quale risulta sottostimato. Inoltre dobbiamo considerare che questa tipologia di test è indicato solo per i blocchi in muratura (o lapidei) collegati tra loro mediante uno strato di malta.
- Possiamo non considerare i dati provenienti dal provino T4 in quanto collassato ad una forza troppo bassa se rapportata alla deformazione a cui è collassato con rottura completa, dimostrando un'alta fragilità. Come vedremo nel paragrafo successivo, questi dati risentono anche della fluidità e viscosità del materiale, nonché della sua porosità.
- Analizzando i dati con le foto dei collassi (v. schede da pag. 106 a pag. 112) emerge che i provini che hanno dato risultati più soddisfacenti sono quelli che durante la stampa sono stati generati con una corretta fluidità e viscosità. Realizzati con questa corretta esecuzione, i provini T3 e T7 hanno reagito alle sollecitazioni non come sei layer uniti ma come un unico blocco compatto. Ecco che la rigidità del provino aumenta migliorandone le caratteristiche meccaniche.

La concordanza della modellazione numerica rispetto a quella sperimentale è accettabile

Triplette: intervallo temporale di un'ora tra il secondo e terzo strato

Durante la sperimentazione le prove sono state progettate per testare i provini a taglio per attrito con la linea di carico parallela alla direzione di stampa, tenendo ben presente che tra il secondo e terzo strato è presente un intervallo temporale di un'ora. La modellazione numerica ha simulato esattamente quella fisica.





Test Normative Reference: UNI EN 1052-3

Name of specimen	Load (KN)	Deformation ε
T8	28,28	0,000222
T9	35,12	0,000237
T10	17,19	0,000694
T11	21,17	0,000181
T12	25,05	0,000178
T13	19,96	0,000593
T14	42,45	0,000590
FEM	50,00	0,001242

Note: I provini I1 e I2 hanno un'altezza pari a 15cm mentre il provino I5 ha un'altezza pari a 20cm.
I valori ε dei provini I1 e I2 derivano da misurazioni effettuate con trasduttori a filo.

Fig. 6.1.6: Grafico Carico – Deformazione, provini a stampa con intervallo temporale triplette 4x6x15

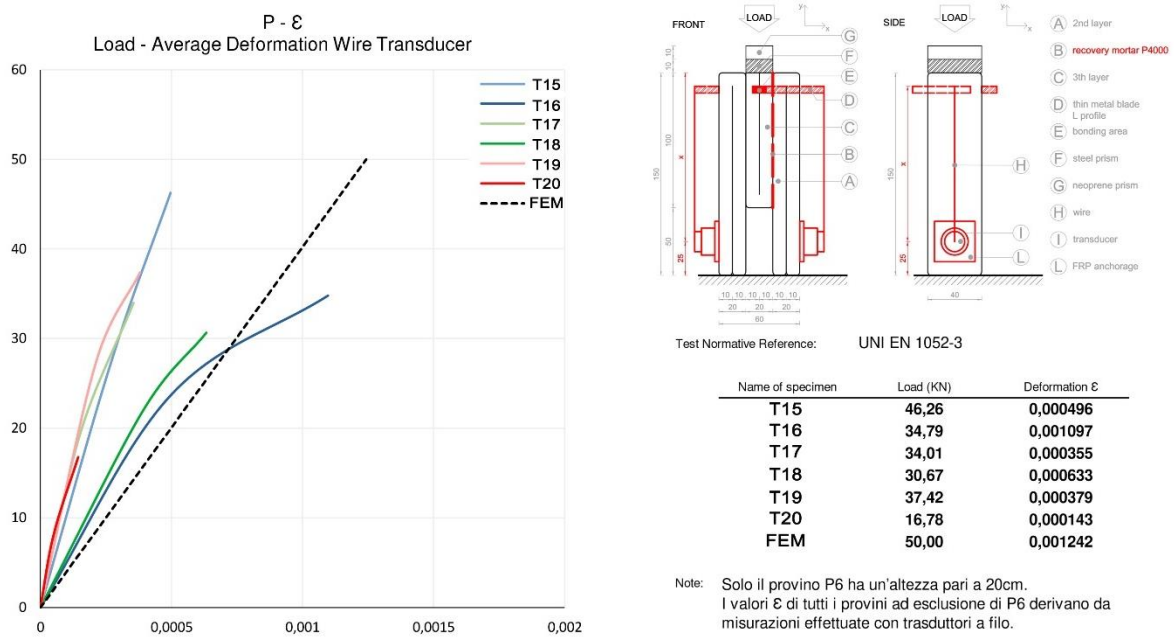
Il modello ad elementi finiti ha fornito risultati coerenti con i test sperimentali preliminari. Durante la sperimentazione in laboratorio il provino collassato ad una forza superiore è il T14 (42,45 KN) mentre quello che è collassato ad una forza minore è il T10 con un carico di 17,19 KN. Se consideriamo come riferimento il modello FEM abbiamo un provino a forma di tripletta di dimensioni 4x6x15 cm che ad una forza di 50 KN subisce una deformazione media pari a 0,12%. (grafico fig. 6.1.6). L'andamento della curva rispecchia il comportamento del materiale e rappresenta il punto di riferimento per tutti gli altri provini. Eseguendo un confronto dei risultati sperimentali con la modellazione FEM emerge che:

- Ad esclusione dei provini T10 e T13 che, seppur avendo un andamento in linea con la modellazione FEM, sono collassati con deformazioni in linea con quanto indicato dalla modellazione ma ad un carico di molto inferiore, gli altri provini hanno evidenziato un comportamento molto più rigido a parità di carico.
- I collassi dei provini a sinistra della linea che indica il FEM (grafico fig. 6.1.6) sono di molto più rigidi del provino realizzato ad elementi finiti. Questo lo si evince in quanto a parità di carico hanno una deformazione di molto inferiore. Infine, su tutti i provini, i collassi si generano in corrispondenza dei due layer collegati tramite intervallo temporale. (v. schede da pag. 112 a pag. 124)
- Anche qui, emerge che i provini che hanno dato risultati più soddisfacenti sono quelli che durante la stampa sono stati generati con una corretta fluidità e viscosità. Realizzati con questa corretta esecuzione, i provini T9 e T14 hanno dato risultati più soddisfacenti con risultati di gran lunga superiori se paragonati al modello FEM.

La concordanza della modellazione numerica rispetto a quella sperimentale è accettabile

Triplette: intervallo temporale di un'ora tra il secondo e terzo strato e aggiunta di malta additivata

Durante la sperimentazione le prove sono state progettate per testare i provini a taglio per attrito con la linea di carico parallela alla direzione di stampa, tenendo ben presente che tra il secondo e terzo strato è presente un intervallo temporale con aggiunta di malta per la ripresa di getto additiva con P4000. La modellazione numerica ha simulato esattamente quella fisica.



Name of specimen	Load (KN)	Deformation ε
T15	46,26	0,000496
T16	34,79	0,001097
T17	34,01	0,000355
T18	30,67	0,000633
T19	37,42	0,000379
T20	16,78	0,000143
FEM	50,00	0,001242

Note: Solo il provino P6 ha un'altezza pari a 20cm.
I valori ε di tutti i provini ad esclusione di P6 derivano da misurazioni effettuate con trasduttori a filo.

Fig. 6.1.7: Grafico Carico – Deformazione, provini a stampa con P4000 triplette 4x6x15

Il modello ad elementi finiti ha fornito risultati coerenti con i test sperimentali preliminari. Durante la sperimentazione in laboratorio il provino collassato ad una forza superiore è il T15 (46,26 KN) mentre quello che è collassato ad una forza minore è il T21 con carico pari a 16,78 KN. Se consideriamo come riferimento il modello FEM abbiamo un provino a forma di tripletta di dimensioni 4x6x15 cm che ad una forza di 50 KN subisce una deformazione media pari a 0,12%. (grafico fig. 6.1.7). L'andamento della curva rispecchia il comportamento del materiale e rappresenta il punto di riferimento per tutti gli altri provini. Eseguendo un confronto dei risultati sperimentali con la modellazione FEM emerge che:

- Ad esclusione dei provini T16 e T18 che, seppur avendo un andamento in linea con la modellazione FEM, sono collassati con deformazioni in linea con quanto indicato dalla modellazione ma ad un carico di molto inferiore, gli altri provini hanno evidenziato un comportamento molto più rigido a parità di carico. Possiamo non considerare anche il provino T20 in quanto collassato ad una forza di molto più bassa rispetto agli altri provini seppure con una deformazione in linea con quelli più perforanti.
- I collassi dei provini a sinistra della linea che indica il FEM (grafico fig. 6.1.7) sono di molto più rigidi del provino realizzato ad elementi finiti. Questo lo si evince in quanto a parità di carico hanno una deformazione di molto inferiore. Infine, su tutti i provini, i collassi si generano in corrispondenza dei due layer collegati tramite la malta additivata per la ripresa di getto. (v. schede da pag. 112 a pag. 124) Questo è un dato molto importante che ci indica come questa specifica malta migliori la coesione di layer le cui connessioni sono state interrotte da un intervallo temporale.
- Anche qui, emerge che i provini che hanno dato risultati più soddisfacenti sono quelli che durante la stampa sono stati generati con una corretta fluidità e viscosità. Realizzati

con questa corretta esecuzione, i provini T15 e T19 hanno dato risultati più soddisfacenti con risultati di gran lunga superiori se paragonati al modello FEM.

La concordanza della modellazione numerica rispetto a quella sperimentale è accettabile

6.2 Tipi di collasso nel calcestruzzo stampato 3D

In generale i collassi evidenziati durante le prove sono in linea con quanto indicato nella normativa (UNI EN 12390-3 2003, EN UNI 12390-5, EN UNI 1052-3). Analizzando nel dettaglio i collassi dei provini, emergono quelle che sono le criticità del materiale:

- Viscosità o fluidità della malta cementizia;
- Qualità dell'adesione tra i layer;
- Porosità del materiale cementizio.

Nei provini a soggetti ai test di compressione non sono stati evidenziati casi di eccessiva viscosità della malta cementizia, difatti i sei cubi stampati dimostravano già nella fase di stampa un'ottima fluidità con deformazioni nulle. Le deformazioni che si evidenziano in fase di stampa sono la eccessiva fluidità del materiale che porta ad una forma del cubo molto appiattita. Considerando che ogni strato stampato dovrebbe essere alto 1 cm, i cubi realizzati avevano un errore sotto la soglia del millimetro. In fase di collasso i provini hanno assunto un andamento piramidale (come evidenziato in fig. 6.2.1) che evidenzia ancor di più la buona riuscita della stampa tridimensionale e il corretto dosaggio degli elementi chimici che compongono la malta cementizia.

La qualità dei layer, che ricordiamo dipende dalla fluidità della malta cementizia, è risultata ottima e questo lo si può dedurre da come il provino è collassato. Il corpo centrale del provino è rimasto integro mentre (come evidenziato durante la modellazione FEM) i punti più sollecitati sono quelli che stanno a ridosso delle quattro facce libere. (fig. 6.2.2)

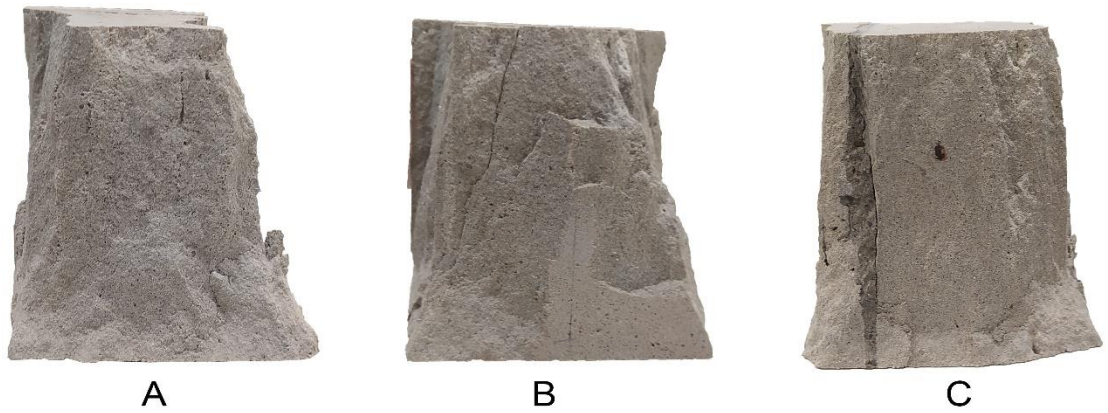


Fig. 6.2.1: Andamento del collasso per le tipologie di provini testati a compressione. A) provino con stampa continua; B) provino con intervallo temporale; C) provino con P4000

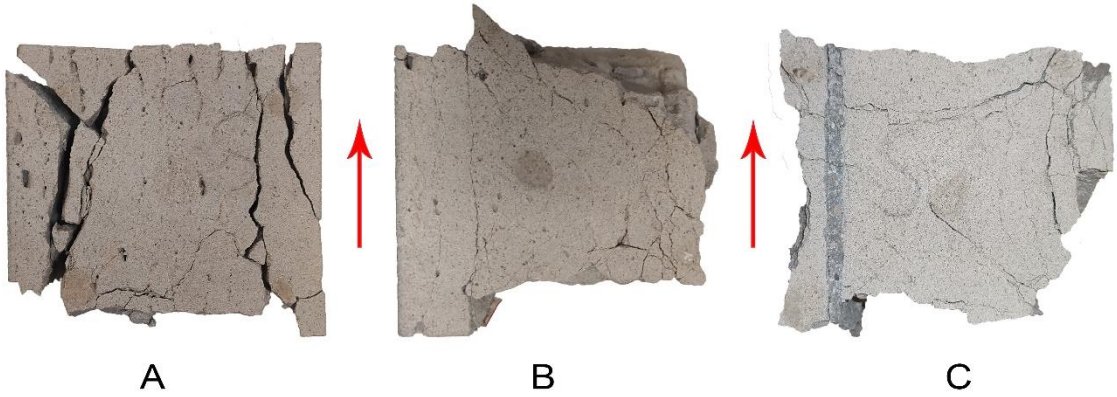


Fig. 6.2.2: Distacco dei layer per le tipologie di provini testati a compressione. In rosso la direzione di stampa. A) provino con stampa continua; B) provino con intervallo temporale; C) provino con P4000

La porosità della malta cementizia nei provini soggetti a compressione è in linea con quanto indicato in bibliografia. La presenza di aria è ridotta al minimo e questo risultato è possibile sia in fase preliminare di mescolamento ma soprattutto in fase di miscela all'interno della stampante 3D. La malta cementizia viene pompata dal serbatoio e stampata tramite l'ugello. Prima di arrivare all'ugello, la malta cementizia scorre all'interno del tubo di collegamento in cui è presente un'elica che miscela ulteriormente il conglomerato diminuendone la porosità. Anche la porosità è comunque vincolata alla fluidità del materiale. In ogni caso come evidenziato in figura 6.2.3 si evidenziano delle bolle d'aria più o meno grandi della dimensione del millimetro o mezzo millimetro che influiscono negativamente nella direzione della fessura che porta poi al collasso.



Fig. 6.2.3: Porosità presente per le tre tipologie di provini testati a compressione.

Nei provini a soggetti ai test di flessione sono stati evidenziati casi di eccessiva viscosità della malta cementizia, difatti i provini stampati dimostravano già nella fase di stampa un'elevata viscosità con deformazioni visibili anche ad occhio nudo. Le deformazioni che si sono evidenziate sono l'eccessiva viscosità la quale ha portato la formazione di vuoti all'interno della malta cementizia. Considerando che ogni strato stampato dovrebbe essere alto 1 cm e privo di vuoti (sia interni che sulla superficie) i provini realizzati al più avevano una superficie disomogenea caratterizzata da vuoti e pieni (fig. 6.2.4). In fase di collasso i provini caratterizzati da una eccessiva viscosità hanno registrato dei valori di forza e deformazione molto bassi. Al contrario, i provini realizzati con una corretta fluidità della malta cementizia, hanno dato risultati soddisfacenti in fase di collasso. Quest macro differenza tra viscosità e

fluidità del materiale in fase di stampa la si denota anche in fase fessurativa. I provini con una buona fluidità hanno fessure di collasso per flessione che seguono l'andamento degli strati di stampa. Al contrario, i provini con un'alta viscosità presentano fessure al collasso per flessione rettilinee che seguono la linea di forza. La qualità dei layer, che ricordiamo dipende dalla fluidità della malta cementizia, è risultata ottima per i provini con una corretta fluidità, pessima per i provini con elevata viscosità.



Fig. 6.2.4: Viscosità della malta cementizia in provini per flessione.



Fig. 6.2.5: Differenze tra i collassi di malta cementizia con alta viscosità (A) e malta cementizia con corretta fluidità (B)

La porosità della malta cementizia nei provini con buona fluidità soggetti a flessione è in linea con quanto indicato in bibliografia. La presenza di aria è ridotta al minimo e questo risultato è possibile sia in fase preliminare di mescolamento ma soprattutto in fase di miscela all'interno della stampante 3D. La malta cementizia viene pompata dal serbatoio e stampata tramite l'ugello. Prima di arrivare all'ugello, la malta cementizia scorre all'interno del tubo di collegamento in cui è presente una elica che miscela ulteriormente il conglomerato diminuendone la porosità. Anche la porosità è comunque vincolata alla fluidità del materiale.



Fig. 6.2.6: Porosità presente per le tipologie di provini testati a flessione

Nei provini soggetti ai test di triplette sono stati evidenziati casi simili a quelli dei provini a flessione. Nello specifico anche qui sono stati evidenziati casi di eccessiva viscosità della malta cementizia con difetti già presenti in fase di stampa. Le deformazioni che si sono evidenziate sono l'eccessiva viscosità la quale ha portato la formazione di vuoti all'interno della malta

cementizia (fig. 6.2.6). In fase di collasso i provini caratterizzati da una eccessiva viscosità hanno registrato dei valori di forza e deformazione molto bassi. Al contrario, i provini realizzati con una corretta fluidità della malta cementizia, hanno dato risultati soddisfacenti in fase di collasso. Questa macro differenza tra viscosità e fluidità del materiale in fase di stampa la si denota anche in fase fessurativa. Per provini realizzati con stampa continua e caratterizzati da una buona fluidità del materiale hanno un collasso tipico di un elemento unico, viceversa a causa dell'elevata viscosità, i provini hanno subito un collasso in cui è evidente il distaccamento dei layer (fig. 6.2.7). Per provini realizzati con intervallo temporale nella stampa e caratterizzati da una buona fluidità del materiale hanno un collasso tipico di un elemento unico, viceversa a causa dell'elevata viscosità, i provini hanno subito un collasso in cui è evidente il distaccamento dei layer (fig. 6.2.8).
La qualità dei layer, che ricordiamo dipende dalla fluidità della malta cementizia, è risultata ottima per i provini con una corretta fluidità, pessima per i provini con elevata viscosità.



Fig. 6.2.7: Viscosità della malta cementizia in provini per triplette

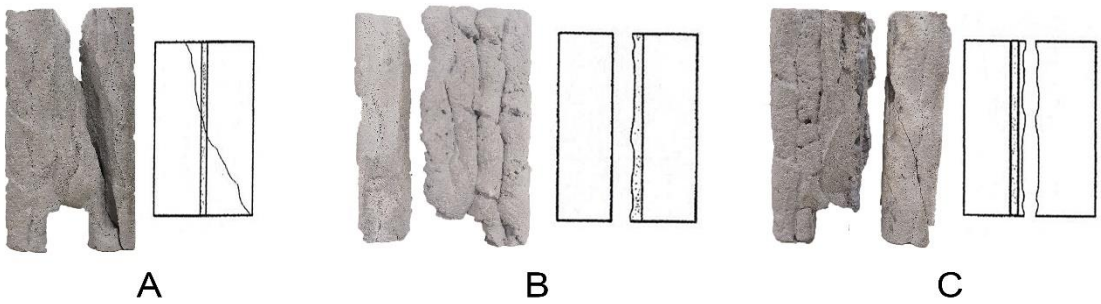


Fig. 6.2.8: Differenze tra i collassi di malta cementizia con differente viscosità e tipologia di stampa. A) continua; B) intervallo temporale; C) con P4000

La porosità della malta cementizia nei provini con buona fluidità soggetti a triplette è in linea con quanto indicato in bibliografia. La presenza di aria è ridotta al minimo e questo risultato è possibile sia in fase preliminare di mescolamento ma soprattutto in fase di miscela all'interno della stampante 3D. La malta cementizia viene pompata dal serbatoio e stampata tramite l'ugello. Prima di arrivare all'ugello, la malta cementizia scorre all'interno del tubo di collegamento in cui è presente una elica che miscela ulteriormente il conglomerato diminuendone la porosità. Anche la porosità è comunque vincolata alla fluidità del materiale.

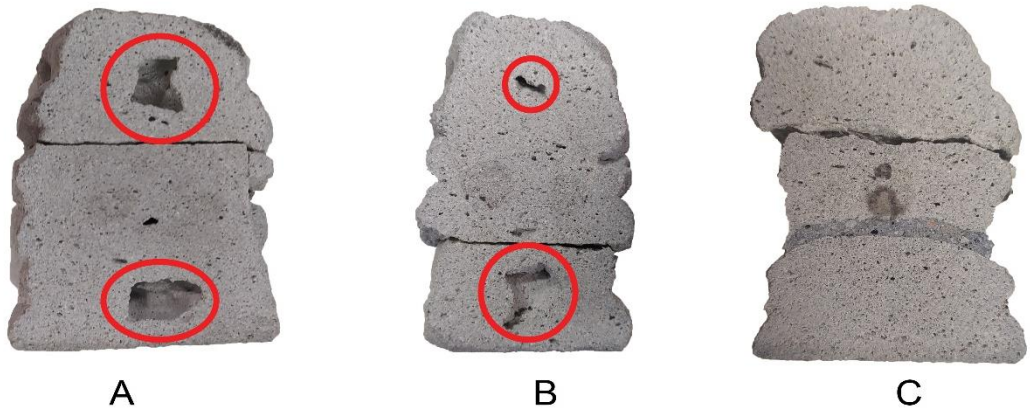


Fig. 6.2.9: Porosità presente per le tipologie di provini testati a triplette

6.3 coefficiente di attrito: muratura vs calcestruzzo.

Il tema dominante che ha condizionato la ricerca sia sperimentale che in fase di modellazione FEM è rappresentato dal coefficiente di attrito del materiale. In bibliografia è presente il coefficiente di attrito del calcestruzzo con l'acciaio (per ovvie ragioni legate all'aderenza delle barre filettate in acciaio al conglomerato cementizio) ma non tra calcestruzzo e calcestruzzo. In letteratura è anche presente il coefficiente di attrito tra il concio in muratura e la malta oppure tra un concio realizzato in calcestruzzo e la malta.
Come emerge dalla ricerca non esiste un coefficiente di attrito ben definito tra calcestruzzo e calcestruzzo e questo è il motivo per cui in primis sono stati realizzati test simili ai test triplette sulla muratura ed in secondo luogo perché in fase di modellazione FEM non sono stati inseriti valori che richiamano coefficienti di attrito della muratura o tra neoprene e calcestruzzo (per cui valori pari a 0,1) (Biondini) ma coefficienti di attrito molto alti che rendessero il comportamento del materiale simile al comportamento che ha il calcestruzzo armato precompresso (valori di coefficiente di attrito pari a 0,6 o 0,9).
Nella muratura, in assenza di valutazioni più accurate, il coefficiente di attrito locale μ può essere assunto pari a 0,577 (corrispondente ad un angolo di attrito di 30°); ciò porta a valori del coefficiente di attrito equivalente μ variabili da circa 0,4 (per murature con buona tessitura) a 0,2 (per murature con blocchi scarsamente ammorsati).(NTC 2018) Invece, secondo alcune ricerche sull'adesione tra due elementi in calcestruzzo prefabbricato, i valori minimi di attrito tra le due superfici variano in un range compreso tra 0,05 e 0,15 (Biondini).
Per quanto riguarda i valori di attrito pari a 0,9, si fa riferimento alle NTC 2018 in cui, nel capitolo relativo ai calcestruzzi armati, nel paragrafo 7.4.4.5.1 "Verifiche di resistenza (RES)" nella verifica a scorrimento nelle zone dissipative si indica come coefficiente di attrito calcestruzzo-calcestruzzo sotto azioni cicliche un valore pari a 0,6. Il coefficiente di attrito #mu (alla Coulomb) dipende dalle condizioni della superficie dei materiali a contatto (e cioè ruvidezza) e nel calcestruzzo armato precompresso ha valori tra calcestruzzo e acciaio compresi tra 0,05 e 1,20 e dipende dalle dimensioni delle barre d'acciaio e dalla qualità della malta cementizia. (Santarella) (Fig. 6.3.1)

$\mu\eta$	$(1-e^{-\mu\eta})$	$\mu\eta$	$(1-e^{-\mu\eta})$	$\mu\eta$	$(1-e^{-\mu\eta})$	$\mu\eta$	$(1-e^{-\mu\eta})$
0,05	0,049	0,30	0,259	0,70	0,503	1,40	0,753
0,10	0,095	0,35	0,295	0,80	0,551	1,60	0,798
0,15	0,139	0,40	0,330	0,90	0,593	2,00	0,865
0,20	0,181	0,50	0,393	1,00	0,632	2,50	0,918
0,25	0,221	0,60	0,451	1,20	0,699	3,00	0,950

Fig. 6.3.1: Coefficienti di attrito acciaio-calcestruzzo in elementi prefabbricati

A livello nazionale non esiste un coefficiente di attrito tra calcestruzzo e calcestruzzo ma se ci spostiamo oltre oceano, l'American Concrete Institute nel Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19), alla tabella 22.9.4.2 indica i coefficienti di attrito tra calcestruzzo e calcestruzzo. (fig. 6.3.2)

Table 22.9.4.2—Coefficients of friction

Contact surface condition	Coefficient of friction μ[1]	
Concrete placed monolithically	1.4λ	(a)
Concrete placed against hardened concrete that is clean, free of laitance, and intentionally roughened to a full amplitude of approximately 1/4 in.	1.0λ	(b)
Concrete placed against hardened concrete that is clean, free of laitance, and not intentionally roughened	0.6λ	(c)
Concrete placed against as-rolled structural steel that is clean, free of paint, and with shear transferred across the contact surface by headed studs or by welded deformed bars or wires.	0.7λ	(d)

[1]λ = 1.0 for normalweight concrete. For lightweight concrete, λ is calculated as given in 19.2.4, but shall not exceed 0.85.

Fig. 6.3.2: Coefficienti di attrito acciaio-calcestruzzo in elementi prefabbricati

Nello specifico abbiamo una tabella che indica i coefficienti di attrito tra calcestruzzo e calcestruzzo e tra calcestruzzo e acciaio (che non è di nostro interesse). In questa tabella si parla di calcestruzzo con peso normato che corrisponde alla tipologia da noi utilizzata per questi test seppure il calcestruzzo è composta da aggregati finissimi. Detto ciò, possiamo considerare una λ pari a 1 e possiamo collocare i nostri provini, o meglio, il calcestruzzo stampato 3D in una fascia tra la seconda e terza casistica. Il calcestruzzo che esce dall'estrusore ha accurati indici di fluidità e viscosità, inoltre è privo di latte di calcestruzzo (la patina composta da un'alta concentrazione d'acqua sulla superficie) e se presenta porosità sono al di sotto della soglia del millimetro. In ambienti controllati con macchinari all'avanguardia, il 3DPC ha delle qualità molto al di sopra del calcestruzzo casserato.
Per la nostra ricerca, nella modellazione FEM, si è considerato un valore di coefficiente di attrito pari a 0,9 ed i risultati ottenuti sperimentalmente sono ben al di sopra di quanto atteso dalla modellazione ad elementi finiti.
Infine, secondo quanto indicato nello studio Tanner, 2008, l'attrito dovuto al taglio e μ sono ampiamente utilizzati per una varietà di connessioni critiche nella costruzione del

calcestruzzo prefabbricato. L'autore presenta modifiche nel calcolo matematico relative all'attrito di taglio e al calcolo di μ. Inoltre modifica di poco i valori di λ, dove:

- λ = 1,0 per calcestruzzo normale
- λ = 0,85 per calcestruzzo leggero sabbiato
- λ = 0,75 per calcestruzzo completamente leggero

Quindi μ = 1,4λ, 1,0λ, 0,7λ o 0,6λ, a seconda dell'interfaccia della fessura.

In conclusione, il coefficiente di attrito considerato per la modellazione FEM è coerente con quanto indicato in altri studi. Nel caso in cui il coefficiente inserito fosse troppo basso (valori compresi tra 0 e 0,5) il modello andrebbe al collasso evidenziando spostamenti irreali. (fig.6.3.3) Viceversa se si considerano valori compresi tra 1 e 1,5, per la conformazione e modellazione FEM dei provini, il prototipo si comporta come un blocco unico ed emergono problemi nella modellazione geometrica costringendo l'operatore ad eliminare le connessioni. (fig. 6.3.4)

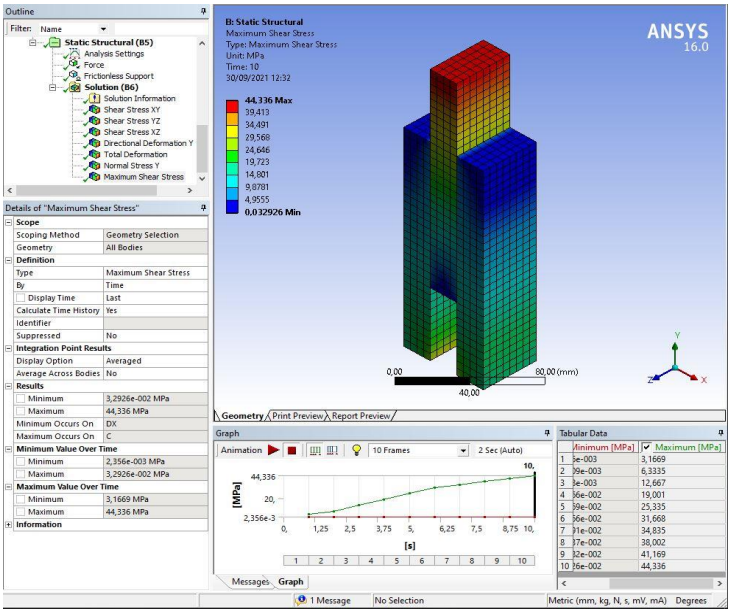


Fig. 6.3.3: Modellazione FEM con coefficienti di attrito di valori compresi tra 0 e 0,5

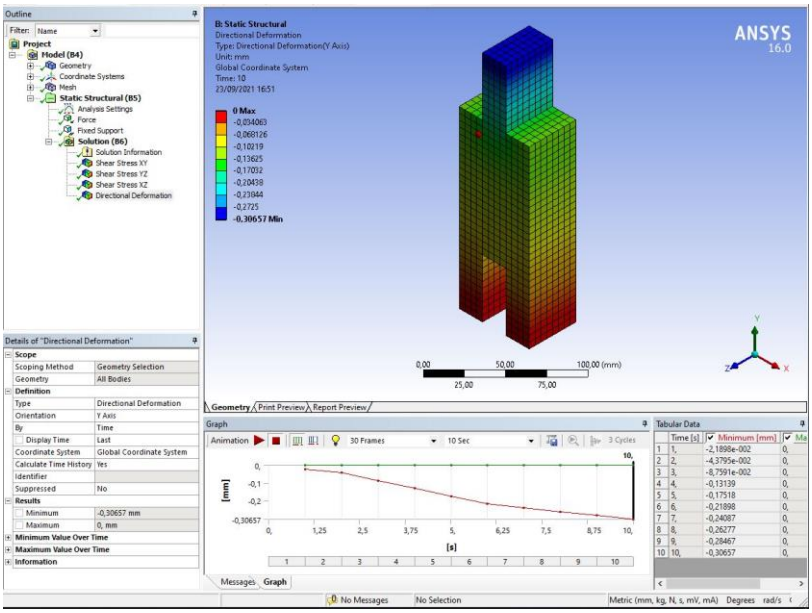


Fig. 6.3.2: Modellazione FEM con coefficienti di attrito di valori compresi tra 1 e 1,5

Bibliografia

Riferimenti bibliografici

Biondini F., A. Titi, e G. Toniolo, "Prestazioni sismiche di strutture prefabbricate con connessioni trave-pilastro ad attrito".

van den Heever, M., F. Bester, J. Kruger, and G. van Zijl. 2022. "Numerical modelling strategies for reinforced 3D concrete printed elements." *Addit. Manuf.*, 50: 102569. https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102569.

Nguyen-Van, V., S. Li, J. Liu, K. Nguyen, and P. Tran. 2023. "Modelling of 3D concrete printing process: A perspective on material and structural simulations." *Addit. Manuf.*, 61: 103333. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103333.

Park, K., A. Memari, M. Hojati, M. Zahabi, S. Nazarian, and J. Duarte. 2020. "Experimental Testing and Finite Element Modeling of 3D-Printed Reinforced Concrete Beams."

Rizzieri, G., L. Ferrara, and M. Cremonesi. 2023. "Numerical simulation of the extrusion and layer deposition processes in 3D concrete printing with the Particle Finite Element Method." *Comput. Mech.* https://doi.org/10.1007/s00466-023-02367-y.

Santarella L. "*Cemento Armato la Tecnica e la Statica"*. HOEPLI EDITORE, 1998.

Tanner, J. A. 2008. "Using an effective coefficient of friction." *PCI journal*.

Xiao, J., H. Liu, and T. Ding. 2021. "Finite element analysis on the anisotropic behavior of 3D printed concrete under compression and flexure." *Addit. Manuf.*, 39: 101712. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101712.

Riferimenti normativi

ACI Committee. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.

EN 1052-3:2002/A1:2007: Methods of test for masonry. Part 3: Determination of initial shear strength

NTC 2018: D.M. 17 Gennaio 2018 Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». GU Serie Generale n.42 del 20-02-2018 - Suppl. Ordinario n. 8

UNI EN 12390-3 2003 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione

UNI EN 12390-4 2002 Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 4: Resistenza alla compressione - Specifiche per macchine di prova

7. Applicazioni Future

Ad oggi, la stampa 3D viene utilizzata nel campo dell'industria per i più svariati obiettivi: dalle componentistiche per l'aviazione (Karkun, 2022) all'ingegneria edile (Rollakanti, 2022), per realizzare oggetti di design (Xiao, 2022) a vere e proprie case (Mohd, 2018).



Fig. 7.1.1: dieci case stampate in 3D realizzate in 24 ore per £ 2.970 ciascuna dalla società di costruzioni Winsun nel 2014

In campo edile la stampa 3D ha fatto enormi sviluppi in ambito di ricerca, soprattutto negli ultimi anni in quanto ad una più approfondita ricerca in campo ingegneristico, si sono approfondite anche tematiche quali fisico-chimiche, architettoniche, meccaniche, normative.
Questi impulsi hanno portato alle più svariate applicazioni della stampa 3D nelle costruzioni dove facilità di esecuzione ed efficienza rappresentano la combinazione essenziale.
Il settore delle costruzioni si sta avvicinando alla stampa 3D in calcestruzzo per la produzione di componenti architettonici o edilizi. Si prevede che il settore delle costruzioni modificherà drasticamente gli attuali metodi di lavorazione e forse porterà a tecnologie dirompenti (3DPC), con conseguenti variazioni significative nel settore delle costruzioni. In tutto il mondo, il settore delle costruzioni e le iniziative di ricerca si stanno concentrando sulle tecnologie di costruzione automatizzate. Sono state sviluppate diverse tecnologie per la stampa 3D di elementi in calcestruzzo e il loro utilizzo nei progetti edilizi è in aumento. La crescita della stampa 3D non è limitata alla Terra; sta anche guadagnando terreno come mezzo per costruire habitat spaziali. La stampa 3DPC consente la costruzione di forme libere senza la necessità di costose casseforme, il che presenta diversi vantaggi rispetto al metodo tradizionale di colata del calcestruzzo in una cassaforma.



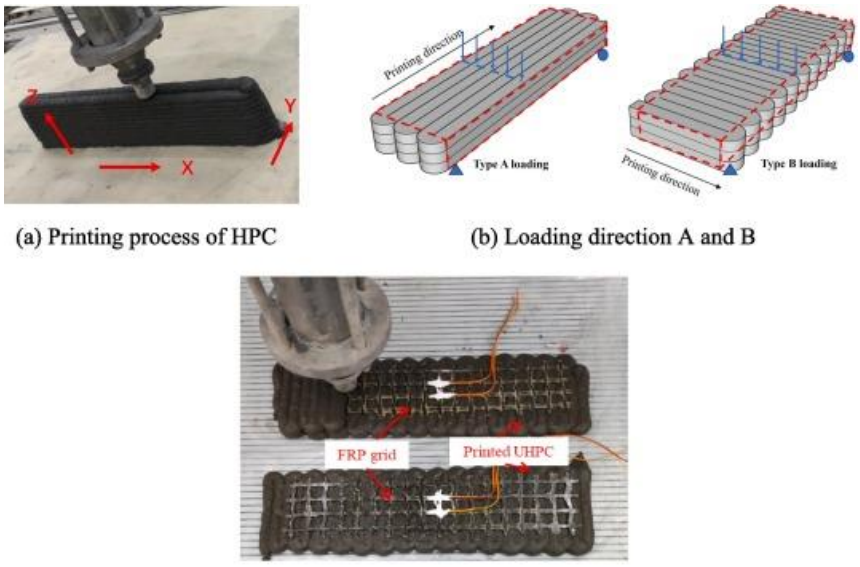
Fig. 7.1.2: esempio di cantierizzazione con 3DPC

Negli ultimi anni sono state create diverse tecnologie e le tecniche e le procedure che sono state testate includono la produzione in loco e fuori sede di componenti edilizi che impiegano robot industriali, sistemi a portale e veicoli autonomi vincolati.
Ad oggi si studiano anche l'impatto nelle componenti tecniche, socioeconomiche e ambientali della stampa 3D di strutture in calcestruzzo al fine di fornire una panoramica completa della

tecnologia, delle applicazioni, delle sfide e delle future opportunità di ricerca e mercato nel settore delle costruzioni. Principalmente ci sta spingendo su più fronti:

- Case realizzate con meccanismo di stampa tridimensionale e conglomerato cementizio. (Sun. 2021)
- Padiglioni realizzati con meccanismo di stampa tridimensionale e miscela realizzata in loco. (Wang. 2024)
- Infrastrutture realizzate con meccanismo di stampa tridimensionale e conglomerato cementizio. (Plessis, 2021)
- Elementi strutturali realizzati con meccanismo di stampa tridimensionale e conglomerato cementizio. (Du, 2023)

Inoltre il 3DPC può essere combinato anche con altri materiali innovativi: lo sviluppo e l'applicazione di nuovi materiali in polimero rinforzato con fibre (FRP) e la tecnologia di costruzione tramite stampa 3D forniscono una base per compensare le carenze delle tradizionali strutture. I risultati mostrano che le performance strutturali di un elemento realizzato in 3DPC sono aumentate del 50% rispetto alla corrispondente struttura in calcestruzzo tradizionale. La presenza dell'FRP migliora la duttilità dei componenti. (Zeng, 2024)



(a) Printing process of HPC

(b) Loading direction A and B

(c) Fabrication of FRP reinforced HPC plates

Fig. 7.1.3: combinazione di una maglia in FRP tra due layer di calcestruzzo

Riassumendo, il calcestruzzo stampato con stampa 3D presenta enormi vantaggi, quali (Cicione, 2021):

- Sostenibilità: la stampa 3D può ridurre gli sprechi di materiale (rispetto ai metodi tradizionali di costruzione) e permettere l'uso di miscele di calcestruzzo più ecologiche, inclusi materiali riciclati o biodegradabili. È possibile integrare materiali riciclati nel mix di calcestruzzo, come aggregati provenienti da demolizioni o materiali secondari. Inoltre, si stanno studiando miscele a base di materiali bio-based o ecologici. Questo è fondamentale per ridurre l'impatto ambientale dell'industria edile. (Wang. 2024)
- Progettazione personalizzata: la tecnologia consente di realizzare forme e strutture complesse che sarebbero difficili o impossibili da ottenere con i metodi tradizionali. Questo apre a nuove possibilità per l'architettura e il design. (Xiao, 2022)
- Costi e tempi di costruzione: può abbattere i costi e ridurre i tempi di costruzione, grazie all'automazione e alla minimizzazione dei processi manuali. Questo potrebbe rendere più accessibili abitazioni e infrastrutture. La possibilità di stampare in loco riduce la

necessità di trasportare materiali, diminuendo così le emissioni di CO2 associate al trasporto. (Plessis, 2021)

- Costruzioni modulari: ad oggi è possibile stampare elementi modulari da assemblare in loco. Questo offre una maggiore flessibilità e può migliorare l'efficienza costruttiva.
- Integrazione di tecnologie smart: si prevede che il calcestruzzo stampato in 3D possa integrare tecnologie smart, come sensori e sistemi di monitoraggio, per migliorare la sicurezza e la manutenzione delle strutture.
- Applicazioni in contesti estremi: la stampa 3D potrebbe trovare applicazione in contesti difficili, come la costruzione di strutture su altri pianeti o in aree colpite da disastri, dove è necessaria una risposta rapida. (Plessis, 2021)
- Regolamentazione e standardizzazione: con lo sviluppo di questa tecnologia, sarà fondamentale redigere normative e standard per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle costruzioni realizzate con calcestruzzo stampato in 3D.

Il calcestruzzo realizzato con la stampa 3D ha il potenziale di trasformare radicalmente il settore delle costruzioni, rendendo i processi più sostenibili, efficienti e creativi. Tuttavia, sarà necessario affrontare sfide tecniche e normative per realizzare pienamente il suo potenziale.



Fig. 7.1.4: esempio di posa di elementi prefabbricati realizzati in 3DPC



Fig. 7.1.5: esempio di padiglione e arredo realizzati in 3DPC

In ultima analisi, la NASA sta esplorando la stampa 3D di calcestruzzo come parte delle sue ricerche per la costruzione di infrastrutture su altri pianeti, in particolare sulla Luna e su Marte. Ecco alcuni aspetti chiave di questo progetto:

- Costruzione di habitat spaziali: la NASA sta studiando come utilizzare risorse locali, come la regolite lunare o marziano, per creare materiali da costruzione. La stampa 3D permette di realizzare habitat che possono essere adattati rapidamente e in modo efficiente a queste condizioni estreme. (Werkheiser, 2015)
- Tecnologia e processi: la NASA ha collaborato con diverse aziende e istituzioni per sviluppare tecniche di stampa 3D specifiche per il calcestruzzo. Queste tecnologie possono utilizzare polveri di regolite miscelate con leganti speciali, consentendo di costruire strutture resistenti. (Werkheiser, 2015)
- Sostenibilità e risorse: utilizzare materiali locali riduce la necessità di trasportare risorse dalla Terra, contribuendo a missioni più sostenibili. Questo approccio non solo è più economico, ma anche cruciale per la fattibilità a lungo termine delle missioni spaziali. (Sansoucie, 2021)
- Prototipi e test: la NASA ha già realizzato prototipi e test di strutture stampate in 3D per valutare la loro resistenza e aderenza alle condizioni ambientali extraterrestri, come la radiazione e le temperature estreme. (Sansoucie, 2021)

In conclusione la ricerca della NASA sulla stampa 3D di calcestruzzo rappresenta un passo importante verso la costruzione di insediamenti sostenibili su altri corpi celesti, aprendo nuove possibilità per l'esplorazione spaziale e l'abitabilità oltre la Terra. (Werkheiser, 2015)
Nel 2019 si aprì la 3D-Printed Habitat Challenge che è stata una competizione del programma Centennial Challenges della NASA per costruire un habitat stampato in 3D per l'esplorazione dello spazio profondo, incluso il viaggio dell'agenzia sulla Luna, su Marte o oltre. (Sansoucie, 2021) La sfida multifase è stata progettata per far progredire la tecnologia di costruzione necessaria per creare soluzioni abitative sostenibili per la Terra e oltre. Per la modellazione, i team hanno utilizzato i software Building Information Modeling per progettare un habitat che combinasse le tolleranze sia per la struttura che per i sistemi che deve contenere. I livelli di costruzione hanno sfidato i team a stampare autonomamente in 3D elementi dell'habitat, culminando con un habitat stampato in scala di un terzo per il livello finale. La 3D-Printed Habitat Challenge è stata gestita tramite una partnership con il programma Centennial Challenges della NASA e la Bradley University . Bradley ha collaborato con gli sponsor Caterpillar , Bechtel e Brick & Mortar Ventures per amministrare la competizione. Il programma Centennial Challenges della NASA fa parte dello Space Technology Mission Directorate dell'agenzia ed è gestito presso il Marshall Space Flight Center della NASA a Huntsville, Alabama.

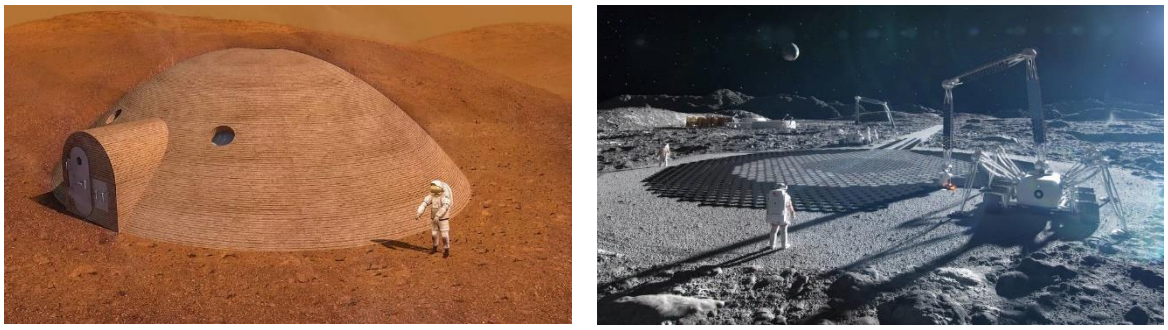


Fig. 7.1.6: Render prototipo di edificio extraterrestre - Nasa

Bibliografia:

Riferimenti bibliografici

Ahmed, Ghafur H. 2023. «A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability». *Journal of Building Engineering* 66: 105863. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.105863.

Cicione A., J. Kruger, R. S. Walls, e G. Van Zijl. 2021. "An experimental study of the behavior of 3D printed concrete at elevated temperatures". *Fire Safety Science: Proceedings of the 13th International Symposium* 120: 103075. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103075.

Du W., L. Zhu, H. Zhang, Z. Zhou, K. Wang, e N. Uddin. 2023. "Experimental and Numerical Investigation of an Innovative 3DPC Thin-Shell Structure". *Buildings* 13: 233. https://doi.org/10.3390/buildings13010233.

Karkun, M., Dharmalingam, S. 2022. 3D Printing Technology in Aerospace Industry – A Review. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 9(2). DOI: https://doi.org/10.15394/ijaaa.2022.1708

Mohd T., A. Latif, S. Omar, Z. Yehia, S. Al-Ojaili, Atheer S. H., e Osman O. 2018. "Cost viability of 3D printed house in UK". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 319: 012061. https://doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012061.

Paul, S. Chandra, Gideon P.A.G. van Zijl, Ming J. T., e I. Gibson. 2018. "A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects". *Rapid Prototyping Journal* 24, fasc. 4: 784–98. https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2016-0154.

Plessis A., Adewumi J. B., Suvash Chandra P., B. Panda, J. P. Tran, e C. Broeckhoven. 2021. "Biomimicry for 3D concrete printing: A review and perspective". *Additive Manufacturing* 38: 101823. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101823.

Rollakanti, Chiranjeevi R., e C. Prasad. 2022. "Applications, performance, challenges and current progress of 3D concrete printing technologies as the future of sustainable construction – A state of the art review". International Conference on Advances in Construction Materials and Structures 65: 995–1000. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.619.

Sansoucie M., Alkhateb H., Al-Ostaz A., Alshibli, K., Fiske M., Edmunson, J., ... & Zhou H. 2021. "Research Campaign: In-Situ, Resilient and Sustainable Moon to Mars Construction." *Research Campaign White Paper submitted to the Biological and Physical Sciences (Decadal Survey 2023-2032)*.

Sun J., J. Xiao, Z. Li, e X. Feng. 2021. "Experimental study on the thermal performance of a 3D printed concrete prototype building". *Energy and Buildings* 241: 110965. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110965.

Xiao Y., and C. Kan. 2022. "Review on Development and Application of 3D-Printing Technology in Textile and Fashion Design" *Coatings* 12, no. 2: 267. https://doi.org/10.3390/coatings12020267

Wang X., W. Li, Y. Guo, A. Kashani, K. Wang, L. Ferrara, e I. Agudelo. 2024. "Concrete 3D printing technology for sustainable construction: A review on raw material, concrete type and performance". *Developments in the Built Environment* 17: 100378. https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100378.

Werkheiser M., M. Fiske, J. Edmunson, e B. Khoshnevis. 2015. "On The Development of Additive Construction Technologies for Application to Development of Lunar/Martian Surface Structures Using In-Situ Materials" https://doi.org/10.2514/6.2015-4451.

Zeng, Jun-Jie, Zi-Tong Yan, Yuan-Yuan Jiang, e Pei-Lin Li. 2024. "3D printing of FRP grid and bar reinforcement for reinforced concrete plates: Development and effectiveness". *Composite Structures* 335: 117946. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2024.117946.

https://www.nasa.gov/prizes-challenges-and-crowdsourcing/centennial-challenges/3d-printed-habitat-challenge/

https://www.nasa.gov/humans-in-space/artemis/

8. Ringraziamenti

Ringrazio il dott. Sandro Moro e il tecnico di laboratorio Gianluca Mudadu della MBS Italia per avermi dato la possibilità di realizzare i provini usufruendo delle loro conoscenze e lavorando all'interno degli ambienti dell'azienda. Ringrazio il professor Salvatore Russo e la professoressa Antonella Cecchi per avermi accompagnato durante questi tre anni di dottorato nel mondo della ricerca. Un sentito ringraziamento a tutte le persone che mi hanno accompagnato, supportato e aiutato nei momenti di difficoltà, in particolare Rosa, Matteo, Andrea, Simone, Pietro, Giovanna, i miei Genitori e alla Segreteria di Dottorato nella figura della dott.ssa Borella Neva, ai miei colleghi e colleghe di dottorato ed infine ai tecnici di Laboratorio del Lasbco che, senza il loro prezioso aiuto, la ricerca non sarebbe possibile (Giosuè, Lorenzo, Ivano, Mauro).