

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Lightweight foamed concrete con l'aggiunta di nanoparticelle di carbonio



Relatore:

Prof.ssa Luciana Restuccia

Corelatori:

Prof. Giuseppe Andrea Ferro

Dott. Devid Falliano

Candidato:

Filippo Mattiacci

Anno Accademico 2020/2021

Sommario

1 – Introduzione.....	4
2 – Lightweight Foamed Concrete	5
2.1 – Schiuma	11
2.2 – Additivi.....	20
2.3 – Mix Design	24
2.3.1 – Provini bianchi.....	27
2.3.2 – MWCNT dispersi nell’acqua.....	33
2.3.3 – MWCNT dispersi nella schiuma	38
3 – Proprietà meccaniche.....	47
3.1 – Resistenza a flessione	48
3.2 – Resistenza a compressione	66
3.3 – Confronto fra densità.....	85
4 – Conclusioni.....	87
5 – Bibliografia.....	89

1 – Introduzione

L'efficientamento energetico degli edifici è diventato un tema sempre più importante e sentito nell'immaginario collettivo.

La diminuzione del consumo di energia, sia per un minor impatto ambientale che per motivazioni economiche, ha portato allo sviluppo ed alla ricerca in tutto il mondo di materiali termicamente più performanti, uno dei più importanti fra questi è proprio il *Lightweight Foamed Concrete* (LWFC), ovvero calcestruzzo leggero schiumato.

In questo lavoro di tesi è stato analizzato il suddetto materiale nella densità fresca *target* di 720 kg/m³ con l'aggiunta di nanoparticelle di carbonio, ovvero carbonanotubi a parete multipla, volte a migliorarne le proprietà meccaniche senza inficiare tutte le altre caratteristiche che hanno reso il LWFC un materiale di grande interesse nelle costruzioni, tra cui leggerezza, isolamento termico, assorbimento acustico e resistenza al fuoco.

Sono state indagate le proprietà meccaniche di resistenza a compressione ed a flessione sui provini realizzati in laboratorio mediante una procedura di *mix design* basata su due parametri di controllo:

- diverse percentuali in peso di additivi aggiunti nella miscela;
- diversa fase disperdente dei suddetti additivi (acqua o schiuma).

2 – Lightweight Foamed Concrete

Il *Lightweight Foamed Concrete* (LWFC), o calcestruzzo leggero schiumato, appartiene alla più ampia categoria dei calcestruzzi leggeri, caratterizzati da una densità compresa nel range di 200-2000 kg/m³, inferiore pertanto a quella dei conglomerati cementizi tradizionali, tipicamente di massa volumica tra i 2200-2500 kg/m³.



Fig. 2.1: campione prismatico di Lightweight Foamed Concrete, estremamente poroso e leggero.

Oltre agli schiumati, le altre categorie di calcestruzzi leggeri sono [1]:

- calcestruzzi di aggregati leggeri naturali;
- calcestruzzi di aggregati leggeri artificiali;
- calcestruzzi leggeri alveolari;
- calcestruzzi leggeri organici;
- calcestruzzi leggeri cellulari, ulteriormente suddivisibili in aerati, schiumati e gassosi.

E' possibile classificare i calcestruzzi leggeri anche in base all'impiego ed alle prestazioni, secondo quanto prescritto nella norma UNI 7548 [2], in:

- calcestruzzi leggeri non strutturali di tipo LC_1 , caratterizzati da una densità media inferiore a 1200 kg/m³, oppure da una resistenza caratteristica a compressione R_{ck} inferiore a 15 MPa;
- calcestruzzi leggeri strutturali di tipo LC_2 , caratterizzati da una densità media compresa tra 1200-2000 kg/m³ e da una resistenza caratteristica a compressione compresa tra 15-25 MPa;

- calcestruzzi leggeri strutturali di tipo LC_3 , caratterizzati da una densità media compresa tra 1200-2000 kg/m^3 e da una resistenza caratteristica a compressione maggiore o uguale a 25 MPa.

Nello specifico, sono di interesse per questo lavoro di tesi i calcestruzzi leggeri cellulari schiumati non strutturali di tipo LC_1 aventi densità *target*, come indicato successivamente nel capitolo dedicato al *mix design*, pari a 720 (± 50) kg/m^3 .

In questa tipologia di calcestruzzi il sistema di bolle d'aria viene inglobato nella matrice cementizia, costituita in genere da acqua, cemento, sabbia fine e ulteriori additivi (viscosizzanti, superfluidificanti, particelle rinforzanti, ecc.), grazie alla miscelazione con schiume preformate che descriveremo meglio in seguito.

La formazione di queste bolle macro e microscopiche, se uniformemente distribuite all'interno della matrice, determina una serie di miglioramenti delle proprietà del materiale, tra cui:

- minore peso proprio, facilitando le operazioni di trasporto per gli elementi prefabbricati e permettendo la realizzazione di strutture complessivamente più snelle, ovvero più leggere e pertanto sismicamente più sicure o che necessitano di fondazioni meno gravose;
- migliore isolamento termico;
- maggiore assorbimento e schermatura acustica;
- maggiore resistenza al fuoco;
- migliore lavorabilità;
- necessità di minori quantitativi di aggregato rispetto ai calcestruzzi tradizionali (talvolta possono essere utilizzati anche scorie/materiali di riciclo), pertanto maggiore economicità e sostenibilità ambientale [3];
- grande variabilità in termini di densità fa sì che vi possano essere impieghi estremamente diversificati.

Il LWFC, in virtù di queste proprietà, ha ricevuto una grande attenzione da parte dei costruttori di tutto il mondo per bilanciare la forte crescita della domanda di nuove tecnologie e materiali nelle costruzioni volti ad un maggior risparmio energetico e rispetto ambientale [4].

Di contro, una bassa densità materica corrisponde a valori inferiori di resistenza meccanica, in particolar modo la resistenza a compressione risulta essere piuttosto bassa se paragonata a quella di un calcestruzzo ordinario; da letteratura [5-6] dopo una maturazione in aria di 28 giorni su un

campione cilindrico di circa 800 kg/m^3 questa si attesta intorno a 6 MPa, contro quella di oltre 20-25 MPa di un calcestruzzo ordinario.

Per sopperire a questo limite del LWFC, sin dal suo brevetto nel lontano 1923 [7], sono stati condotti molti studi di *mix design* volti ad individuare le migliori composizioni ed i possibili additivi da aggiungere alla matrice cementizia, quali ad esempio fibre polimeriche (*short* o *grids*), *fly ash*, fumi di silice, scorie di forni ad arco elettrico o nanoparticelle di carbonio.

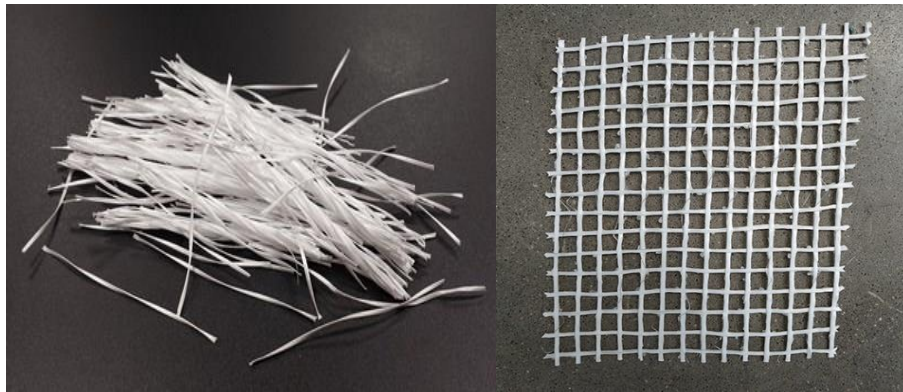


Fig. 2.2: fibre di rinforzo polimeriche *short* (sx) e *grids* (dx).



Fig. 2.3: additivi rinforzanti, *fly ash* (sx), fumi di silice (centro) e carbonanotubi a parete multipla (dx).

Tuttavia occorre precisare che le proprietà del calcestruzzo schiumato non sono influenzate solamente dai suoi componenti, ma anche e dalle modalità di miscelazione degli stessi.

Quest'ultime possono incidere significativamente sulla dimensione e distribuzione delle bolle d'aria nella matrice e pertanto su tutte le caratteristiche sopracitate del materiale.

Volendo fare una precisazione per quanto concerne gli aggregati utilizzati nella matrice cementizia, quelli più comunemente utilizzati sono le sabbie fine calceree o silicee sia fluviali, più tondeggianti, che da frantumazione, più irregolari, che in ogni caso devono essere depurate dalla presenza di sostanze organiche che finirebbero per intaccare la qualità del LWFC.

Nel presente lavoro di tesi, tuttavia, avendo indagato come detto in precedenza di una densità *target* medio-bassa, inferiore a 800 kg/m^3 , si è ritenuto opportuno omettere del tutto la frazione degli aggregati fini dal *mix design*.

Altro aspetto fondamentale che influenza le proprietà meccaniche del LWFC, ancor più che per i calcestruzzi tradizionali, è il rapporto a/c .

E' possibile definire un *range* ottimale di a/c o, meglio, di $a/(c+s)$, dove con s si indica la somma di aggregato ed eventuali aggiunte minerali presenti nella miscela, all'interno del quale il sistema di vuoti d'aria inglobato nella pasta cementizia è stabile [8], tuttavia risulta estremamente complicato in quanto è funzione non solo della densità o delle proprietà meccaniche che si vogliono raggiungere, ma anche della presenza di ulteriori additivi fini che possono essere aggiunti, i quali, essendo caratterizzati da una elevatissima superficie specifica, aumentano vistosamente il quantitativo d'acqua da utilizzare nell'impasto.

Inoltre, come evidenziato negli studi presenti in letteratura [9], è fondamentale sottolineare che, diversamente da quanto avviene per i calcestruzzi tradizionali, negli schiumati non è affatto detto che le proprietà meccaniche migliorino al diminuire del rapporto a/c .

In generale, come infatti risulta dall'analisi della formula di *Feret*, riportata in seguito, la resistenza a compressione R_c è funzione non solo del rapporto a/c , ma anche del rapporto a_r/c , essendo c , a e a_r rispettivamente i volumi di cemento, acqua e aria presenti nel materiale [8]:

$$R_c = K \left(\frac{1}{1 + \frac{a}{c} + \frac{a_r}{c}} \right)^n$$

dove i parametri K ed n rappresentano rispettivamente delle costanti empiriche caratteristiche del materiale.

Dalla formula si osserva che nei casi in cui il rapporto volumetrico tra aria e cemento sia molto piccolo, ovvero quando a_r/c tende a zero, la sua incidenza sulla resistenza a compressione raggiunta dal conglomerato è trascurabile; questa rappresenterebbe la condizione tipica dei calcestruzzi tradizionali dove il ruolo cruciale è quello ricoperto dal rapporto a/c .

In definitiva, per calcestruzzi cellulari schiumati a medio-basse densità, come quello oggetto di studio della tesi (720 kg/m^3), il parametro più corretto per la stima di R_c risulta essere proprio il rapporto $(a+a_r)/c$, da cui si ricava che le miscele che possiedono un più basso valore di questo rapporto sono quelle che presentano resistenza a compressione migliore.

Per quanto concerne il modulo elastico dei calcestruzzi schiumati, questo cresce all'aumentare della densità, ma in modo non propriamente lineare [10] ed è caratterizzato da valori considerevolmente inferiori rispetto a quelli dei calcestruzzi ordinari, variando generalmente tra 1-12 GPa al variare della densità tra $500\text{-}1600 \text{ kg/m}^3$; inoltre dagli studi presenti in letteratura risulta che, a parità di resistenza a compressione, i calcestruzzi schiumati presentano valori del modulo elastico fino a quattro volte inferiori rispetto ai calcestruzzi ordinari [11].

Il "Comitato Europeo del Calcestruzzo" suggerisce per i calcestruzzi schiumati la stima del modulo elastico E [kg/cm^2] dalle seguenti relazioni:

$$E = 5000 \sqrt{g \cdot \gamma \cdot R_c} \quad , \text{ per deformazioni di breve durata;}$$

$$E = 3000 \sqrt{g \cdot \gamma \cdot R_c} \quad , \text{ per deformazioni di lunga durata.}$$

dove γ [g/cm^3] è la densità ed R_c [kg/cm^2] è la resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo [8].

Riguardo al campo d'impiego e di utilizzo, in generale il calcestruzzo schiumato può essere usato per realizzare svariati elementi costruttivi di un edificio, dalle murature portanti, tramezzi, solai, coperture, agli elementi prefabbricati di diverse dimensioni e forma, quali lastre, pannelli, blocchi, ecc.



1



2



3

Fig. 2.4: esempi di elementi prefabbricati, blocchi (1-3) e lastre (2).

LWFC aventi densità comprese tra $600-900 \text{ kg/m}^3$, come quello oggetto di studio di questa tesi, trovano impiego tipicamente come:

- sottofondi per pavimentazioni (anche industriali);
- tamponature esterne;
- elementi divisori interni;
- solai.

Calcestruzzi schiumati di densità superiori invece trovano utilizzo, dove richiesto, per la realizzazione di pareti con migliori caratteristiche meccaniche.

2.1 – Schiuma

Esistono molte tipologie di schiume e queste trovano i più svariati impieghi nella vita di tutti i giorni, ad esempio dal settore alimentare, medico, a quello d'interesse per questo lavoro di tesi, ovvero quello delle costruzioni.

In generale, le schiume sono delle miscele di più sostanze nelle quali ogni componente conserva le sue proprietà chimiche.

Quando queste miscele sono caratterizzate dalle stesse caratteristiche fisico-chimiche in ogni punto vengono definite omogenee, mentre eterogenee se le proprietà variano da un punto all'altro del continuo.

Può essere fatta una ulteriore distinzione per le miscele eterogenee in base alla dimensione delle particelle, indifferentemente se solide o liquide, che le compongono, ovvero:

- sospensioni, se le dimensioni delle particelle sono maggiori di 1000 nm;
- colloidali, se le dimensioni delle particelle sono comprese tra 1 e 1000 nm.

Da questa seconda categoria può essere introdotta un'ulteriore distinzione tra [8]:

- sol: quando piccolissime particelle di un solido si trovano disperse in un liquido;
- gel: solitamente masse gelatinose in cui piccole particelle di liquido sono inglobate in un solido;
- aerosol: quando piccole particelle di un solido o di un liquido sono disperse in un gas, nel primo caso (particelle solide) si parla più specificatamente di fumi, nel secondo (particelle liquide) di nebbie;
- schiume solide: quando piccole particelle di un gas sono disperse in un solido.
- schiume liquide: quando piccole particelle di un gas sono disperse in un liquido;

Le schiume liquide sono quelle di interesse nella produzione del LWFC e sono pertanto miscele eterogenee colloidali, dove piccole particelle di gas, tipicamente aria, sono disperse in una matrice liquida nella quale sono in grado di diffondere fino ad occupare il 95% del volume totale, permettendo così di ottenere un materiale dalla densità estremamente bassa, di poche decine di kg/m^3 [12].

Può essere introdotta un'ulteriore suddivisione delle schiume liquide in relazione alla loro origine, ovvero:

- schiume chimiche: originate grazie all'anidride carbonica che si sviluppa durante la reazione tra soluzioni di sali alcalini, generalmente bicarbonato di sodio, e acidi in presenza di un agente schiumogeno; questa tipologia è stata abbandonata nel corso degli ultimi anni a favore delle cosiddette schiume meccaniche, più economiche, facilmente gestibili e generabili delle prime;
- schiume meccaniche: sono le più comuni, generate a partire da una soluzione di acqua e tensioattivo espansi con aria compressa o mediante miscelazione meccanica, come nel presente lavoro di tesi.

Analogamente, possono essere classificate durante la loro vita utile in base alla quantità di liquido contenuto in esse, che tenderà a diminuire progressivamente a causa del fenomeno di drenaggio, ovvero [8]:

- schiume umide (fase iniziale): per le quali la frazione volumetrica della fase liquida è generalmente compresa tra il 10% e il 20% e la forma delle bolle che le costituiscono è approssimativamente sferica, con elevata pressione interna;
- schiume secche (fine vita): caratterizzate da una frazione volumetrica della fase liquida inferiore al 10%, e da una forma approssimativamente poliedrica delle bolle che la costituiscono.

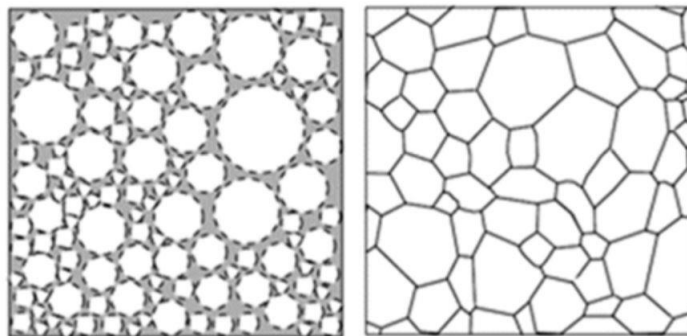


Fig. 2.5: confronto tra schiuma umida (sx) e schiuma secca (dx) [8].

Una schiuma liquida passa dalla condizione umida a quella secca durante la sua vita, infatti, negli istanti temporali immediatamente successivi alla sua formazione risulterà costituita da bolle sferiche, con elevata pressione interna, separate da una pellicola di liquido spessa; col passare del tempo si riscontra un progressivo assottigliamento di questo film dovuto al drenaggio del liquido, una riduzione della densità della schiuma e un avvicinamento delle bolle d'aria che tendono ad assumere una forma sempre più poliedrica fino a raggiungere la condizione di schiuma secca. Dunque la forma delle bolle dipende fortemente dalla quantità della frazione fluida contenuta nella schiuma: in particolare qualora la frazione di liquido risulti superiore al 26% si può ritenere che le bolle siano pressoché sferiche.

Un altro parametro che gioca un ruolo cruciale non tanto sulla forma quanto sulle dimensioni delle bolle di una schiuma risulta essere la pressione esterna: il raggio medio delle bolle decresce al crescere della pressione; nello specifico, si registra una riduzione del diametro delle bolle da circa 100 μm a circa 20 μm con un incremento di pressione da 0 a 5 bar.

Per meglio descrivere il sopracitato sistema film-bolle è necessario definire gli elementi costitutivi che contraddistinguono le schiume liquide [8]:

- con il termine “lamella” si individua quella specifica porzione di liquido delimitata lateralmente dalla presenza di due bolle adiacenti, esse rappresentano la regione che circonda e comprende le sottili pellicole di liquido (*thin film region*), ovvero che è delimitata dalle due superfici interfacciali di separazione tra fase gassosa e fase liquida, presenti da ambo i lati della *thin film region*; si considerano facenti parte delle lamelle anche le zone di intersezione tra due lamelle adiacenti;
- con il termine “plateau border” si individuano i tubi di liquido su cui convergono tre “lamelle”;
- con il termine “nodi” si individuano i punti su cui si incontrano solitamente quattro “Plateau border”.

Tornando al fenomeno del drenaggio, in alcuni casi questo può procedere fino all'ottenimento di una struttura stabile, raggiunta la quale la schiuma può durare praticamente all'infinito, mentre, più frequentemente, quando la schiuma diviene sufficientemente secca, le lamelle diventano instabili provocando il collasso della schiuma stessa.

Da questa considerazione può essere fatta una ulteriore suddivisione delle schiume in:

- instabili o transienti, caratterizzate da una durata di pochi secondi;
- metastabili o permanenti, la cui durata è dell'ordine di ore ed in taluni casi anche di giorni.

Per la produzione in laboratorio dei campioni di LWFC sono state utilizzate quelle del secondo tipo, ovvero metastabili, la cui durata è stata migliorata mediante l'aggiunta del tensioattivo ISOCEM di cui parleremo in seguito.

Va inoltre sottolineato che il drenaggio rappresenta la più gravosa causa destabilizzante di una schiuma; la principale forza motrice di questo fenomeno è la gravità, infatti, se considerassimo una colonna verticale di schiuma, nelle zone in prossimità della superficie superiore si viene solitamente a formare una struttura ad elevato contenuto di gas (generalmente aria), mentre in prossimità della base si ha una struttura avente un più basso contenuto di gas e una maggiore frazione fluida; lungo l'altezza della colonna verticale di schiuma si ha una transizione graduale tra le due condizioni, ovvero la densità della schiuma decresce man mano che ci spostiamo verso l'alto [8].

Dal punto di vista pratico, dalla sola acqua non sarebbe stato possibile ottenere una schiuma stabile per il tempo necessario alla produzione del LWFC oggetto di studi. Infatti, qualora una bolla d'aria venisse introdotta al di sotto della superficie di un tale liquido, questa collaserebbe quasi istantaneamente per via dell'alta tensione superficiale del solvente e del repentino drenaggio del liquido. Questo comportamento è stato modificato rendendo possibile la produzione di schiuma grazie all'aggiunta di un tensioattivo di natura proteica, l'ISOCEM, nella proporzione di 5 gr su 100 gr di schiuma (95 gr di acqua).



Fig. 2.6: tensioattivo ISOCEM in un baker durante il dosaggio.

In generale i tensioattivi rappresentano una specie chimica caratterizzata da una particolare propensione a concentrarsi in corrispondenza dell'interfaccia tra due fasi e dal formare aggregazioni colloidali anche a concentrazioni molto basse. Una molecola di tensioattivo è contraddistinta dalla compresenza di due parti aventi proprietà sensibilmente diverse: una caratterizzata da una trascurabile attrazione verso la fase da cui è circondata (cioè il solvente), denominata gruppo liofobo, l'altra, invece, fortemente attratta da essa e detta gruppo liofilo. Poiché il solvente cui si fa riferimento nella maggior parte dei casi risulta essere l'acqua, anche nella letteratura specifica, si usano di sovente i termini idrofobo ed idrofilo in sostituzione di liofobo e liofilo rispettivamente, di più generale accezione [13]. Pertanto una molecola di tensioattivo è anfifilica, termine che indica la peculiare proprietà di tali sostanze di possedere delle affinità verso due fasi essenzialmente immiscibili e, convenzionalmente, viene schematizzata mediante una "testa" idrofila ed una "coda" idrofoba [8].

Tali sostanze posseggono la peculiarità di abbassare la tensione superficiale σ di un liquido agevolando la miscibilità tra liquidi diversi e permettendo la formazione della schiuma [8].

I tensioattivi possono essere classificati in svariati modi, ad esempio in funzione della loro natura (proteica o sintetica), del loro utilizzo (emulsionanti, schiumogeni, bagnanti, disperdenti), o di alcune caratteristiche fisiche, quali il grado di solubilità in acqua o in olio, la stabilità in ambienti ostili, o per rendere più semplice l'identificazione del loro comportamento chimico-fisico, in base al carattere ionico della testa idrofila.

Pertanto, secondo quest'ultima classificazione possono essere distinte quattro diverse categorie di tensioattivi:

- anionici, con testa polare carica negativamente;
- cationici, con testa polare carica positivamente;
- non ionici, con testa non carica;
- anfoteri, con testa polare caratterizzata dalla contemporanea presenza di cariche positive e negative.

E' corretto evidenziare che modificando il bilanciamento tra il gruppo coda idrofobo e il gruppo testa idrofilo è possibile alterare sostanzialmente le proprietà di una molecola di tensioattivo, enfatizzandone le proprietà di solubilità piuttosto che di schiumaggio o altro, potendo così, almeno in teoria, progettare una molecola di tensioattivo con specifiche caratteristiche in funzione delle necessità di impiego [8].

Come detto in precedenza, i tensioattivi possono essere classificati anche in base alla loro natura, i più utilizzati come additivi nei LWFC, in quanto hanno apportato miglioramenti sensibilmente più consistenti nelle proprietà meccaniche, sono quelli di origine proteica, di cui fanno parte ad esempio i caseinati, le proteine del siero di latte, le proteine d'uovo e le proteine di soia, che permettono di incrementare la viscosità e l'elasticità all'interfaccia del sistema lamellare che costituisce la schiuma; proprio per questo motivo, nel presente lavoro di tesi è stato utilizzato il tensioattivo di origine proteica l'ISOCEM.

L'aggiunta di tensioattivi incrementa significativamente il tempo di vita di una schiuma, ossia il tempo che intercorre tra la sua formazione ed il suo collasso, poichè ne riduce drasticamente il drenaggio.

La stabilità di una schiuma che, dunque, può essere correlata al drenaggio, è strettamente connessa alla robustezza della pellicola che si viene a formare all'interfaccia tra le fasi. In particolare risultano determinanti le proprietà di forza meccanica, viscoelasticità e di ripristino della pellicola che dipendono essenzialmente dalle caratteristiche del tensioattivo utilizzato, dalla sua concentrazione (connessa allo spessore del film) e dalla natura delle interazioni che si vengono a generare. La forza meccanica aumenta con il crescere della viscosità del film, la quale, a sua volta, cresce con lo spessore della pellicola. Le proprietà viscoelastiche permettono l'assorbimento delle sollecitazioni e delle deformazioni senza che soggiunga il collasso e sono legate alla flessibilità del film. Un altro parametro importante legato alla stabilità delle schiume è rappresentato dal modulo dilatazionale che restituisce un'indicazione sul modo in cui le forze della tensione superficiale si oppongono a variazioni di area superficiale. [8]

Volendo a questo punto descrivere brevemente il ciclo vitale di una schiuma, questo può essere suddiviso due macrofasi:

- l'incapsulamento del gas all'interno della miscela liquida contenente il tensioattivo, con la conseguente formazione di interfacce lamella-bolle;
- il tempo di vita stesso della schiuma post-produzione.

Il gas, tipicamente aria, può essere introdotto nella miscela liquida in svariati modi quali, ad esempio tramite agitazione meccanica, emissione di aria in pressione attraverso un ugello, sfruttando opportune reazioni chimiche, ecc. [8]

Nel presente lavoro di tesi l'aria è stata introdotta per agitazione meccanica mediante l'utilizzo di un trapano con punta a spirale; tale miscelazione ha avuto una durata variabile, tipicamente dell'ordine del minuto, fino all'ottenimento di una schiuma visivamente omogenea.



Fig. 2.7: agitazione meccanica con trapano della schiuma (sx) e schiuma omogenea a fine miscelazione (dx).

Inoltre questo tipo di agitazione è in grado di imprimere alle particelle che costituiscono la miscela liquida un moto fortemente turbolento che da letteratura [14], unitamente all'aumento di energia meccanica fornita al sistema, risulta essere una condizione estremamente efficace e favorevole per la generazione di schiume più stabili, in quanto è possibile ottenere bolle più piccole (caratterizzate pertanto da maggiore superficie specifica), più omogeneamente distribuite ed incrementare la viscosità del sistema.

Riassumendo, per ottenere una schiuma stabile nel tempo è stato necessario aggiungere all'acqua dei tensioattivi, molecole di struttura antifilica che si legano al gas sfruttando "code" idrofobiche ed al liquido sfruttando la testa idrofila.

I tensioattivi possono essere classificati in diversi modi, ad esempio sulla base del loro utilizzo (emulsionanti, agenti schiumogeni, bagnanti agenti, disperdenti), del loro carattere ionico (anionico, cationico, non ionici, anfoteri), ma anche a seconda della loro natura (proteica o sintetica).

Vista la grande varietà fisico-chimica dei tensioattivi è teoricamente possibile progettare una molecola di tensioattivo basata sulle specifiche esigenze di utilizzo dosando e modificando il bilanciamento tra i gruppi idrofili/idrofobici [12]; nel caso in esame è stato utilizzato l'ISOCHEM, un tensioattivo di origine proteica nella quantità di 5 gr ogni 100 gr di schiuma.

Inoltre, sempre da letteratura [12] è stato possibile constatare che le schiume generate da un tensioattivo proteico abbiano una maggiore durata e che conferiscano più resistenza a compressione al LWFC rispetto a quelle prodotte da un agente schiumogeno sintetico, caratterizzate invece da valori di drenaggio molto elevati anche a distanza di pochi istanti dalla loro formazione.

Quest'ultimo, il drenaggio, è un fenomeno estremamente critico per le schiume, in quanto la segregazione di acqua dalla miscela, principalmente a causa della forza di gravità, nel tempo tende a farle passare da una condizione umida ad una asciutta.

In particolare, una schiuma appena generata, ovvero umida, è caratterizzata da bolle sferiche e da lamelle spesse, che tendono ad assottigliarsi con il procedere del drenaggio dell'acqua.

Il raggiungimento della condizione asciutta determina una perdita di densità della schiuma, delle bolle dalla forma poliedrica (irregolare), separate da lamelle finissime ed instabili, aspetti che rendono più facile il collasso della schiuma.

Il modo migliore per aumentarne la stabilità e pertanto la durata è quello di limitare il drenaggio, che è strettamente collegato alle proprietà del film lamellare che separa bolle di gas adiacenti, ovvero è richiesta una alta viscosità del materiale in relazione allo spessore delle lamelle, che garantirebbe un maggiore assorbimento di sollecitazioni, deformazioni ed aumenterebbe la pressione di confinamento sulle bolle di gas, ovvero con maggiore pressione interna e dimensioni minori.

Si è osservato inoltre da letteratura [21] che in una schiuma contenente bolle di diverse dimensioni vi sia diffusione del gas da quelle più piccole a quelle più grandi, secondo un gradiente di pressione; questo processo facilita il drenaggio del liquido subito dopo la formazione della schiuma e porta ad una forte riduzione del numero di bolle stesso (circa il 10% del totale).

Il drenaggio del liquido e la diffusione del gas sono le principali cause di deterioramento di una schiuma insieme alla coalescenza spontanea delle bolle, che comporta ad una riduzione della superficie totale all'interfaccia tra le due fasi con conseguente riduzione dell'energia dell'intero sistema. Questi fenomeni sono tra loro fortemente connessi poichè se a causa del drenaggio i film diventano più sottili verrà favorita la coalescenza delle bolle di gas.

Pertanto i parametri principali per controllare le proprietà delle schiume, migliorandone la stabilità limitandone il drenaggio e la coalescenza delle bolle, sono: natura e concentrazione del tensioattivo, metodo di produzione e, come vedremo in seguito nel capitolo dedicato al *mix design*, eventuale presenza di additivi [12].

2.2 – Additivi

I progressi scientifici nel campo della nanotecnologia rappresentano una grande opportunità per lo sviluppo di nuovi materiali.

Sono stati inventati nanomateriali ingegnerizzati di tre tipologie:

- nanoparticelle, 0D;
- nanofibre, 1D;
- nanofogli, 2D.

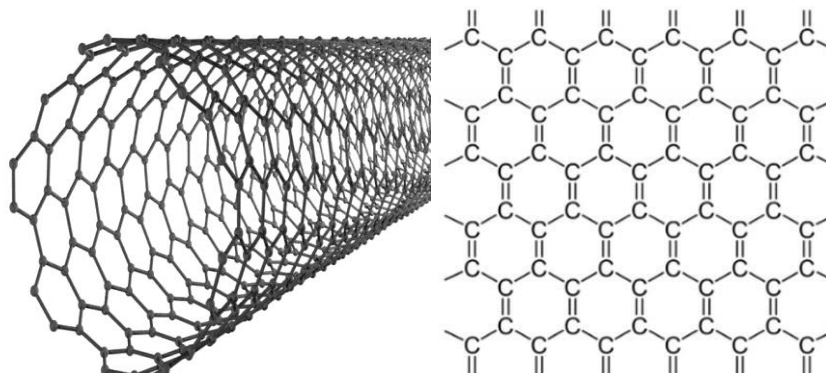


Fig. 2.8: confronto tra nanofibra 1D (sx) e nanofoglio 2D (dx).

In questo lavoro di tesi sono state utilizzate in laboratorio le nanofibre 1D, ovvero i nanotubi di carbonio (CNT), più precisamente quelli a parete multipla (MWCNT), in quanto si è voluto indagare se queste nanostrutture di carbonio potessero essere utilizzate come additivi per il rinforzo del LWFC.

I nanotubi di carbonio sono stati scoperti e documentati per la prima volta dal fisico S. Iijima del NEC Laboratory di Tsukuba (Giappone) nel 1991, utilizzando un microscopio elettronico a trasmissione su fibre di carbonio [17].

I CNT sono strutture cilindriche monodimensionali realizzate mediante laminazione di fogli di atomi di carbonio e, come mostrato nella seguente figura, possono essere classificati in base al numero di pareti atomiche che li costituiscono, ovvero CNT a parete singola, doppia e multipla.

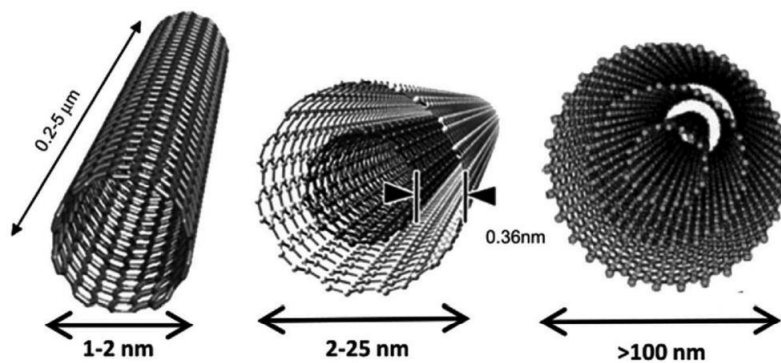


Fig. 2.9: carbonanotubo a parete singola (sx), doppia (centro) e multipla (dx).

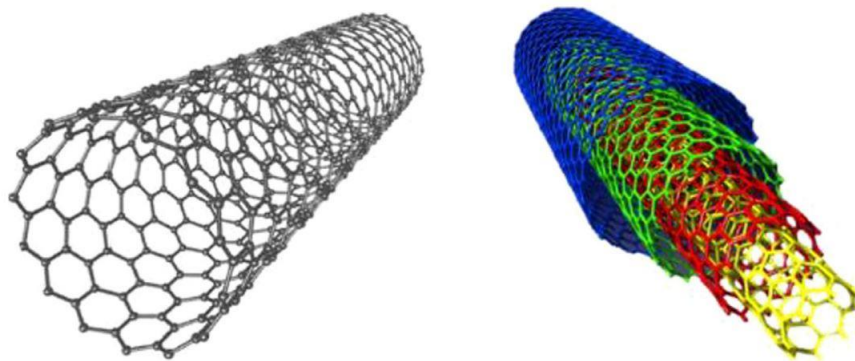


Fig. 2.10: carbonanotubo a parete singola (sx) e multipla (dx).

Tipicamente i CNT con diametro compreso tra 1 e 2 nm sono nanotubi di carbonio a parete singola, mentre i CNT con diametri compresi tra 4 e 20 nm sono a parete multipla, quest'ultimi sono formati arrotolando su se stessi due o più fogli di atomi di carbonio.

Da letteratura [16-18] è possibile constatare che l'effetto dei MWCNT sulle proprietà del LWFC sia quello di migliorarne la struttura dei pori, ovvero di diminuirne il diametro medio creando un sistema più omogeneo, cosa peraltro osservata anche dal presente lavoro di tesi e riportata successivamente; tuttavia, come già spiegato, si è voluto valutare il possibile incremento della resistenza meccanica in funzione della percentuale in peso di additivo e della fase disperdente dello stesso.

Questo perchè, se da un lato l'aggiunta di nanoparticelle come additivi potrebbe migliorare le proprietà meccaniche del LWFC, in particolar modo la resistenza a compressione, dall'altro

potrebbe peggiorarne le caratteristiche termiche, acustiche, aumentare l'assorbimento d'acqua ed il fenomeno di ritiro; per questo è essenziale riuscire a stabilire il corretto dosaggio di additivo in fase di *mix design*.

E' importante evidenziare, inoltre, una problematica che riguarda gli agglomerati di nanomateriali che potrebbero formarsi a causa delle forti forze attrattive di Van Der Waals che esistono nella nanoscala; questi, essendo caratterizzati da una elevata superficie specifica, trattengono un quantitativo maggiore di acqua sottraendone alla matrice cementizia e compromettendo così la lavorabilità del cemento [19].

In genere è possibile disperdere uniformemente le nanoparticelle in una soluzione liquida utilizzando vari di metodi meccanici, tra cui ultrasuoni, macinazione, miscelazione a taglio, calandratura, agitazione ed estrusione; in questo lavoro di tesi si è scelto di utilizzare una sonda ed un bagno ad ultrasuoni per disperdere le nanoparticelle in acqua, mentre miscelazione meccanica (trapano con punta a spirale) per la dispersione in schiuma.

Nel successivo paragrafo dedicato al mix design si è voluto indagare se diverse percentuali in peso di MWCNT e diverse fasi disperdenti di questi additivi apportassero apprezzabili miglioramenti delle proprietà meccaniche di resistenza a flessione ed a compressione dei campioni prodotti in laboratorio, confrontando i risultati ottenuti con dei provini "bianchi", ovvero senza l'aggiunta di nanoparticelle, e con quanto presente in letteratura.

Per quanto riguarda la dispersione nella schiuma di MWCNT, è stato osservato dall'esperienza in laboratorio che con aggiunte superiori allo 0,5% in peso rispetto agli altri componenti, ovvero acqua e tensioattivo, la stabilità della *foam* è risultata compromessa; pertanto non è stato possibile nella pratica disperdere più di questa percentuale in peso nella schiuma.

Questo problema di instabilità della schiuma potrebbe essere in linea con quanto accade in seguito all'aggiunta di un altro nanomateriale, il grafene (nanofoglio, 2D) [16]; l'additivo determina un aumento della tensione superficiale nelle bolle di gas, le quali aumentano di diametro e non risultano più omogeneamente disperse nel sistema: ciò è responsabile del degrado della stabilità della schiuma.

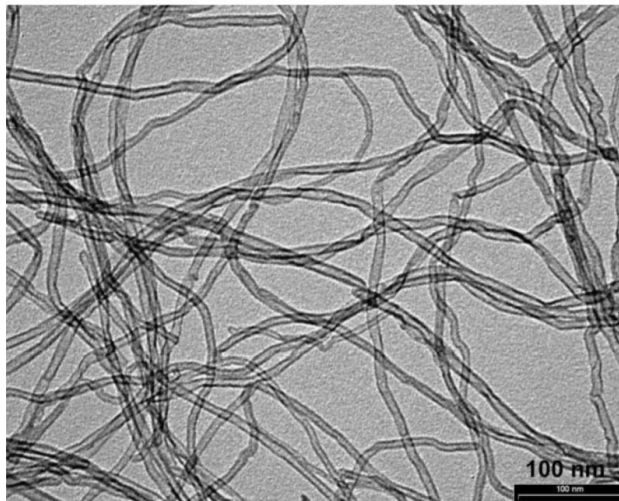


Fig. 2.11: carbonanotubi a parete multipla, scala: 100 nm - TEM.

Nel presente lavoro di tesi sono stati utilizzati nanotubi di carbonio a parete multipla sottile della serie NANOCYL® NC7000™ della Catalytic Chemical aventi applicazioni principalmente nei trasporti, nell'elettronica, nel settore energetico, industriale e negli articoli sportivi; caratterizzati da:

- diametro medio di $9,5 \cdot 10^{-9}$ m (misurato al TEM);
- lunghezza media di $1,5 \cdot 10^{-6}$ m (misurato al TEM);
- superficie specifica di 250-300 m²/g.



Fig. 2.12: bakera contenenti MWCNT della Catalytic Chemical.

2.3 – Mix Design

Nella fase di *mix design* sono stati realizzati complessivamente 24 provini di LWFC, ovvero 6 impasti di diversa composizione per individuare, dal confronto dei loro parametri meccanici, l'ottimo nella % in peso di additivo e la migliore fase disperdente dello stesso.

Precisamente, per ogni impasto saranno realizzati tre provini prismatici (4x4x16 cm) ed uno cubico (lato 5 cm), utilizzando dei casseri in acciaio preventivamente ricoperti da un film di olio per rendere l'operazione di rimozione dei campioni più facile.



Fig. 2.13: cassero per campioni prismatici di dimensioni 4x4x16 cm.



Fig. 2.14: cassero per campioni cubici di dimensioni 5x5x5 cm.

Sui tre provini prismatici di ogni impasto (18 in totale) sono state svolte le prove di caratterizzazione meccanica, ovvero di flessione su 3 punti sino a rottura e successivamente di compressione sulle due metà venutesi a creare in precedenza.

Pertanto, nel successivo capitolo relativo alle prove meccaniche, verranno riportati 18 valori caratteristici a flessione e 36 a compressione; tuttavia occorre precisare che, sulla base di considerazioni riportate in seguito nel medesimo capitolo, non è stato possibile accettare tutti i valori ottenuti dalle prove.

I provini cubici, invece, sono stati sezionati per analizzare visivamente caratteristiche quali la grandezza dei vuoti, la loro distribuzione, l'omogeneità tra le fasi, ecc.

Per quanto concerne alle condizioni di maturazione:

- i campioni prismatici sono stati posti in camera di stagionatura per i primi due giorni, ad una temperatura di 20°C ($\pm 3^{\circ}\text{C}$), una umidità $> 95\%$ e coperti da un telo di nylon assieme ad un recipiente con acqua all'interno per limitare fenomeni di ritiro che possano interessare la superficie; il terzo giorno sono stati scasserati ed immersi in acqua ad una temperatura di 20°C ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) fino al sesto giorno, in cui sono stati estratti e mantenuti in aria;
- i campioni cubici, non di interesse per le prove meccaniche, sono stati fatti maturare nei casseri in aria, in condizioni di umidità e temperatura non controllate.



Fig. 2.15: provini prismatici appena riposti in camera di stagionatura (sx), dopo un giorno (dx).



Fig. 2.16: provini prismatici immersi in acqua il terzo giorno della maturazione.

Vediamo ora in ordine i 6 differenti impasti realizzati, in cui, al fine di garantire un corretto dosaggio dei componenti di base e degli eventuali additivi sono state utilizzate due bilance KERN, modelli PNS e KB, rispettivamente con una capacità di 3200 e 360 gr e con una precisione strumentale di 0,01 e 0,001 gr.

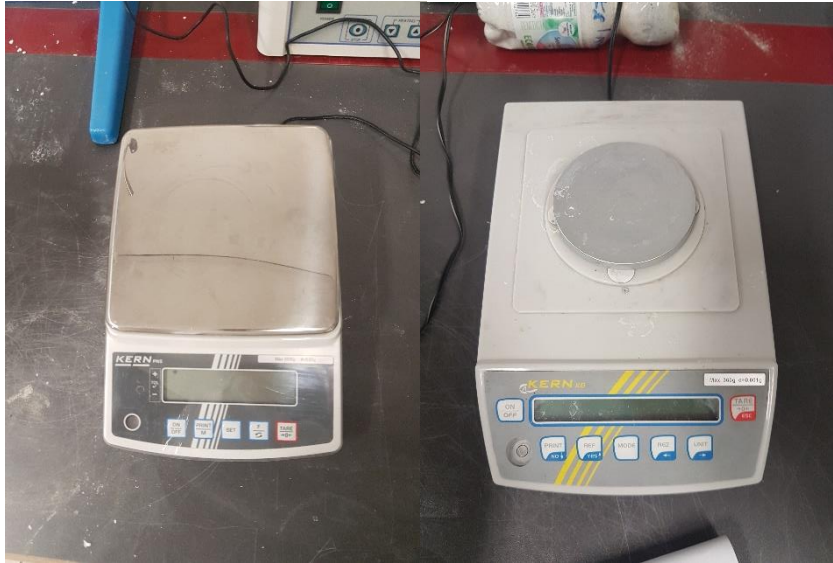


Fig. 2.17: bilancia KERN PNS (sx) e bilancia KERN KB (dx).

2.3.1 – Provini bianchi

Nel primo impasto sono stati realizzati 4 provini “bianchi”, ovvero senza l’aggiunta di additivi oltre al viscosizzante ed al superfluidificante, la cui ricetta, base di partenza anche per i successivi campioni, è la seguente:

- 500 gr di cemento CEM I 52,5 R;
- 82,5 gr di viscosizzante in polvere VEA;
- 180 gr di acqua;
- 2,5 gr di superfluidificante MASTER EASE;
- 15 gr di tensioattivo proteico ISOCEM;
- 65 gr di schiuma, composta dal 95% di acqua e dal 5% di tensioattivo proteico ISOCEM.

La procedura pratica per la realizzazione dei provini “bianchi” è riassunta nelle seguenti 5 fasi:

- fase 1:

- miscelazione manuale dei 500 gr di cemento con gli 82,5 gr di viscosizzante;
- miscelazione manuale dei 180 gr di acqua con 2,5 gr di superfluidificante e 15 gr di tensioattivo;

- fase 2:

- miscelazione per circa tre minuti con trapano (punta a spirale) della frazione solida (cemento + viscosizzante) con la frazione liquida (acqua + superfluidificante + tensioattivo);
- miscelazione di circa un minuto, per ottenere una miscela il più omogenea possibile, con trapano (punta a spirale) per creare la schiuma, ovvero miscelazione di acqua e di tensioattivo in rapporto rispettivamente del 95% e 5%;



Fig. 2.18: miscelazione con trapano (sx) e miscelazione completa (dx) della frazione solida con quella liquida.



Fig. 2.19: miscelazione con trapano (sx) e miscelazione completa (dx) della schiuma.

- fase 3:

- miscelazione fino ad ottenere una miscela il più omogenea possibile con trapano (punta a spirale) della pasta cementizia (frazione solida + frazione liquida) con 65 gr di schiuma;



Fig. 2.20: miscelazione completa della pasta cementizia con la schiuma.

- fase 4:

– misurazione della densità fresca del campione, precisamente:

$$\text{massa tara} = 2,5 \text{ gr}$$

$$\text{volume tara} = 200 \text{ cm}^3$$

$$\text{massa campione} + \text{tara} = 146,6 \text{ gr}$$

$$\text{massa campione} = 146,6 - 2,5 = 144,1 \text{ gr}$$

$$\text{densità fresca campione} = \frac{144,1 \text{ gr}}{200 \text{ cm}^3} = 720,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Fig. 2.21: campione di LWFC per la stima della densità fresca.

- fase 5:

- preparazione di 3 provini prismatici (4x4x16 cm);
- preparazione di un provino cubico (lato 5 cm).



Fig. 2.22: provini bianchi prismatici da più angolazioni.



Fig. 2.23: provino bianco cubico da più angolazioni.

Nella successiva fase del mix design si è passati all'aggiunta di additivi volti, come già detto, a migliorare le caratteristiche meccaniche del LWFC, in particolar modo la resistenza a compressione.

Tuttavia non è bastato determinare il quantitativo ottimale di additivo da aggiungere, ma è stato necessario anche identificare quale fosse la fase migliore per disperderlo tra l'acqua e la schiuma, pertanto si è proceduto nel *mix design* facendo variare questi due parametri:

- diversa percentuale in peso dell'additivo (0,25 – 0,5 – 1 %w di MWCNT);
- diversa fase disperdente dell'additivo (acqua o schiuma).

2.3.2 – MWCNT dispersi nell'acqua

Nel secondo impasto sono stati realizzati 4 provini partendo dalla “ricetta” base dei bianchi con l'aggiunta di 5 gr di carbonanotubi a parete multipla (MWCNT), ovvero l'1% in peso rispetto al cemento, dispersi in acqua per 15 minuti a 100 watt mediante sonda ad ultrasuoni e successivamente per 11 minuti in un bagno ad ultrasuoni.

La procedura pratica per la realizzazione dei provini con l'1% in peso di MWCNT dispersi in acqua è riassunta nelle seguenti 6 fasi:

- fase 1:

- miscelazione meccanica dei 500 gr di cemento con gli 82,5 gr di viscosizzante;
- miscelazione meccanica dei 180 gr di acqua con 2,5 gr di superfluidificante, 15 gr di tensioattivo e 5 gr di MWCNT;



Fig. 2.24: miscela di acqua, superfluidificante, tensioattivo e MWCNT.

- fase 2:

- dispersione mediante sonda ad ultrasuoni (15') e bagno ad ultrasuoni (11') dei MWCNT nella frazione liquida;



Fig. 2.25: sonda ad ultrasuoni.



Fig. 2.26: bagno ad ultrasuoni.

- fase 3:

- miscelazione per circa tre minuti con trapano (punta a spirale) della frazione solida (cemento + viscosizzante) con la frazione liquida (acqua + superfluidificante + tensioattivo + MWCNT);
- miscelazione di circa un minuto, per ottenere una miscela il più omogenea possibile, con trapano (punta a spirale) per creare la schiuma, ovvero miscelazione di acqua e di tensioattivo in rapporto rispettivamente del 95% e 5%;



Fig. 2.27: addizione (sx) e miscelazione con trapano (dx) della frazione liquida con quella solida.

- fase 4:

- miscelazione fino ad ottenere una miscela il più omogenea possibile con trapano (punta a spirale) della pasta cementizia (frazione solida + frazione liquida) non più con 65 gr di schiuma, bensì 200 gr, per ottenere una densità fresca del campione paragonabile a quella dei bianchi con una tolleranza di $\pm 50 \text{ kg/m}^3$;



Fig. 2.28: miscelazione completa della pasta cementizia con la schiuma.

- fase 5:

- misurazione della densità fresca del campione, precisamente:

$$\text{massa tara} = 2,5 \text{ gr}$$

$$\text{volume tara} = 200 \text{ cm}^3$$

$$\text{massa campione} + \text{tara} = 149,1 \text{ gr}$$

$$\text{massa campione} = 149,1 - 2,5 = 146,6 \text{ gr}$$

$$\text{densità fresca campione} = \frac{146,6 \text{ gr}}{200 \text{ cm}^3} = 733,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- fase 6:

- preparazione di 3 provini prismatici (4x4x16 cm);
- preparazione di un provino cubico (lato 5 cm).



Fig. 2.29: provini prismatici con 5 gr di MWCNT dispersi in acqua.



Fig. 2.30: provino cubico con 5 gr di MWCNT dispersi in acqua.

Si precisa che queste 6 fasi produttive valgono per tutti gli impasti con MWCNT dispersi in acqua, seppur di diversa % in peso, pertanto non verranno riportate per iscritto quelle, realizzate nel medesimo modo, relative ai seguenti impasti:

- 0,25% in peso di MWCNT dispersi in acqua;
- 0.5% in peso di MWCNT dispersi in acqua.

2.3.3 – MWCNT dispersi nella schiuma

Per valutare l'efficacia della dispersione dei MWCNT nella schiuma, inizialmente si è provato a realizzare 4 provini, sempre partendo dalla "ricetta" base dei bianchi, con l'aggiunta di 2,5 gr di additivo, ovvero lo 0,5% in peso rispetto al cemento.



Fig. 2.31: schiuma con 0,5% in peso di MWCNT dispersi al suo interno (sx), dettaglio (dx).

E' stato scartato l'impasto con l'1% in peso di carbonanotubi sulla base di evidenze empiriche, riportate nel successivo capitolo, ovvero è stato osservato un cospicuo peggioramento delle proprietà meccaniche dei provini con additivi dispersi in acqua mediante ultrasuoni.

La dispersione dell'additivo nella schiuma, diversamente dal caso precedente, è stata realizzata meccanicamente miscelando con un trapano con punta a spirale per circa 3 minuti i costituenti della *foam*, ovvero l'acqua, il tensioattivo ed i MWCNT.

Tuttavia l'aggiunta di additivo, seppur in questa modesta percentuale, ha minato la stabilità della schiuma rendendo necessaria una maggiore quantità di acqua e tensioattivo che ha conseguentemente diluito la concentrazione dello stesso nella *foam*.



Fig. 2.32: confronto tra schiuma instabile (sx) e stabile (dx) a causa della presenza di MWCNT in diversa concentrazione.

E' stato comunque deciso di procedere con la realizzazione di 4 provini con 200 gr di schiuma nella quale, facendo una proporzione, sono risultati dispersi 1,25 gr di MWCNT, ovvero lo 0,25% in peso; un tale utilizzo di schiuma, tuttavia, ha comportato una diminuzione della densità dal *target* di circa 720 kg/m^3 a 430 kg/m^3 , non rendendo più confrontabili le proprietà meccaniche di tali provini con quelle dei campioni ottenuti in precedenza.

La procedura pratica per la realizzazione dei provini con lo 0,25% in peso di MWCNT dispersi nella schiuma è riassunta nelle seguenti 6 fasi:

- fase 1:

- miscelazione meccanica dei 500 gr di cemento con gli 82,5 gr di viscosizzante;
- miscelazione meccanica dei 180 gr di acqua con 2,5 gr di superfluidificante e 15 gr di tensioattivo;

- fase 2:

- dispersione mediante miscelazione meccanica degli additivi nella schiuma; per motivi di stabilità della schiuma si è provveduto ad aggiungere acqua e tensioattivo in modo tale da

diluire i 2,5 gr di MWCNT in circa 400 gr di schiuma (stabile); di questa ne sono stati usati 200 gr (0,25% in peso di MWCNT);

- fase 3:

- miscelazione per circa tre minuti con trapano (punta a spirale) della frazione solida (cemento + viscosizzante) con la frazione liquida (acqua + superfluidificante + tensioattivo);
- miscelazione di circa tre minuti, per disperdere al meglio l'additivo, con trapano (punta a spirale) per formare la schiuma, ovvero di 380 gr d'acqua, 20 gr di tensioattivo e 2,5 gr di MWCNT;

- fase 4:

- miscelazione fino ad ottenere una miscela il più omogenea possibile con trapano (punta a spirale) della pasta cementizia (frazione solida + frazione liquida) non più con 65 gr di schiuma, bensì 200 gr, ottenendo una densità fresca del campione non paragonabile a quella dei bianchi (430 kg/m³ invece di 720 kg/m³);

- fase 5:

- misurazione della densità fresca del campione, precisamente:

$$\text{massa tara} = 2,5 \text{ gr}$$

$$\text{volume tara} = 200 \text{ cm}^3$$

$$\text{massa campione} + \text{tara} = 88,6 \text{ gr}$$

$$\text{massa campione} = 88,6 - 2,5 = 86,1 \text{ gr}$$

$$\text{densità fresca campione} = \frac{86,1 \text{ gr}}{200 \text{ cm}^3} = 430,0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- fase 6:

- preparazione di 3 provini prismatici (4x4x16 cm);
- preparazione di un provino cubico (lato 5 cm).

Si precisa che queste 6 fasi valgono anche per il secondo impasto con 0,544 gr di MWCNT dispersi in 80 gr di schiuma, ovvero lo 0,108% in peso di additivo rispetto al cemento.

I provini realizzati in questa fase di *mix design* e le loro caratteristiche costitutive sono riportate nella seguente tabella:

numero provino	forma	dimensioni [cmxcmxcm]	cemento	a/c	tensioattivo	schiuma impiegata [gr]	modalità di maturazione	MWCNT [%w]	fase disperdente
1	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	65	controllata	[-]	[-]
2	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	65	controllata	[-]	[-]
3	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	65	controllata	[-]	[-]
4	cubo	5x5x5	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	65	non controllata	[-]	[-]
5	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	100	controllata	0,25	acqua
6	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	100	controllata	0,25	acqua
7	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	100	controllata	0,25	acqua
8	cubo	5x5x5	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	100	non controllata	0,25	acqua
9	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	125	controllata	0,5	acqua
10	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	125	controllata	0,5	acqua
11	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	125	controllata	0,5	acqua
12	cubo	5x5x5	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	125	non controllata	0,5	acqua
13	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	controllata	1	acqua
14	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	controllata	1	acqua
15	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	controllata	1	acqua
16	cubo	5x5x5	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	non controllata	1	acqua
17	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	80	controllata	0,108	schiuma
18	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	80	controllata	0,108	schiuma
19	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	80	controllata	0,108	schiuma
20	cubo	5x5x5	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	80	non controllata	0,108	schiuma
21	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	controllata	0,25	schiuma
22	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	controllata	0,25	schiuma
23	prisma	4x4x16	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	controllata	0,25	schiuma
24	cubo	5x5x5	CEM I 52,5 R	0,36	ISOCEM	200	non controllata	0,25	schiuma

Tab. 2.1: tabella con caratteristiche costitutive dei provini.

Dalla seguente tabella, invece, è possibile constatare che all'aumentare della percentuale in peso di additivi sia stato necessario aumentare anche la quantità di schiuma nell'impasto per ottenere una densità fresca confrontabile con quella di riferimento, ovvero quella dei provini bianchi:

numero provino	MWCNT [%w]	schiuma impiegata [gr]	densità fresca [kg/m ³]
1	[-]	65	720,5
2	[-]	65	
3	[-]	65	
4	[-]	65	
5	0,25	100	707,6
6	0,25	100	
7	0,25	100	
8	0,25	100	
9	0,5	125	711,2
10	0,5	125	
11	0,5	125	
12	0,5	125	
13	1	200	732,8
14	1	200	
15	1	200	
16	1	200	
17	0,108	80	707,6
18	0,108	80	
19	0,108	80	
20	0,108	80	
21	0,25	200	430,0
22	0,25	200	
23	0,25	200	
24	0,25	200	

Tab. 2.2: relazione tra %w di additivo, gr schiuma impiegati e densità fresca.

Questa aggiunta di schiuma, in relazione all'aumento dei MWCNT, è stata necessaria anche dal punto di vista pratico della realizzazione dei campioni in quanto, con soli 65 gr di *foam*, l'impasto manifestava la consistenza di una sabbia bagnata e non quella tipica di un calcestruzzo schiumato a bassa densità.

Vengono riassunte nella successiva tabella, in maniera più completa, alcune delle caratteristiche dei provini prismatici di interesse per le prove meccaniche riportate nel capitolo successivo:

numero provino	sigla	peso giorno prove [gr]	dimensioni medie [mm]			volume misurato [cm ³]	area* [cm ²]	densità giorno prove [kg/m ³]
			l	b	h			
1	REF.ISO/1	209,53	160,0	40,2	40,0	257,3	16,1	814,4
2	REF.ISO/2	225,23	160,0	40,8	40,0	261,1	16,3	862,6
3	REF.ISO/3	209,74	160,0	40,4	40,0	259,8	16,2	807,2
5	ISO.CNT.0,25%w/1	208,64	161,5	40,3	40,0	260,3	16,1	801,5
6	ISO.CNT.0,25%w/2	201,43	160,5	40,3	40,0	258,7	16,1	778,6
7	ISO.CNT.0,25%w/3	200,82	163,5	40,4	40,0	264,2	16,2	760,1
9	ISO.CNT.0,5%w/1	205,51	160,0	40,4	40,0	258,6	16,2	794,7
10	ISO.CNT.0,5%w/2	215,63	161,5	40,2	40,1	260,3	16,1	828,4
11	ISO.CNT.0,5%w/3	225,02	162,0	40,3	40,1	261,8	16,1	859,5
13	ISO.CNT.1%w/1	217,06	160,2	40,2	40,1	258,2	16,1	840,5
14	ISO.CNT.1%w/2	209,43	160,1	40,6	40,0	260,0	16,2	805,5
15	ISO.CNT.1%w/3	197,63	160,2	40,5	40,0	259,5	16,2	761,5
17	ISO.CNT.0,108%f/1	205,88	160,1	40,5	40,1	260,0	16,2	791,8
18	ISO.CNT.0,108%f/2	207,80	160,1	40,5	40,0	259,4	16,2	801,2
19	ISO.CNT.0,108%f/3	205,42	160,3	40,2	40,1	258,4	16,1	794,9
21	ISO.CNT.0,25%f/1	120,57	160,2	40,2	40,0	257,6	16,1	468,1
22	ISO.CNT.0,25%f/2	128,52	160,3	40,3	40,2	259,7	16,1	494,9
23	ISO.CNT.0,25%f/3	131,41	160,3	40,5	40,0	259,7	16,2	506,0

Tab. 2.3: numero, sigla, peso, dimensioni medie, volume, area e densità dei provini prismatici.

Dove con “area*” è indicata la superficie del provino a contratto con la piastra su cui si concentra il carico nel test di compressione.

Nelle seguenti immagini sono riportati i 18 provini prismatici relativi ai 6 diversi impasti ancora allo stato fresco, ovvero negli istanti immediatamente successivi alla loro incasserazione:



*Fig. 2.33: prima fila da sx a dx: REF.ISO - ISO.CNT.0,25%w - ISO.CNT.0,5%w.
Seconda fila da sx a dx: ISO.CNT.1%w - ISO.CNT.0,108%f - ISO.CNT.0,25%f.*

Per quanto riguarda i provini cubici, invece:



Fig. 2.34: provini cubici realizzati nei 6 diversi impasti.

Nel successivo capitolo sono state analizzate le proprietà meccaniche di resistenza a flessione ed a compressione dei suddetti campioni prismatici.

3 – Proprietà meccaniche

Nel presente capitolo sono state riportate le prove meccaniche, ed i risultati, di resistenza a flessione ed a compressione eseguite rispettivamente sui 12 provini prismatici con diversa percentuale in peso di MWCNT dispersi in acqua e sulle loro 24 “metà” risultanti dalla rottura nella prova di flessione su 3 punti; i campioni sono stati fatti maturare per 7 giorni nelle modalità descritte in precedenza, ovvero:

- primo-secondo giorno incasserati in camera di stagionatura, a 20°C ($\pm 3^\circ\text{C}$) e umidità > 95%;
- terzo-sesto giorno scasserati ed in acqua a 20°C ($\pm 1^\circ\text{C}$);
- settimo giorno ad asciugare in aria (non in camera di stagionatura, ma aula del Politecnico), a 20°C ($\pm 3^\circ\text{C}$).

Successivamente sono stati riportati i pesi [gr] e le densità [kg/m^3] dei suddetti campioni, necessari per poter confrontare i risultati delle prove con quanto presente in letteratura e per poter trarre le conclusioni su quanto ricercato nel presente lavoro di *mix design*.

3.1 – Resistenza a flessione

Per valutare la tensione ultima di rottura, σ_{\max} , è stata eseguita una prova di flessione su tre punti in controllo di fessurazione tramite estensimetro con incremento dell'ampiezza di 0,005 mm/sec e con capacità di carico massima pari a 1 kN.

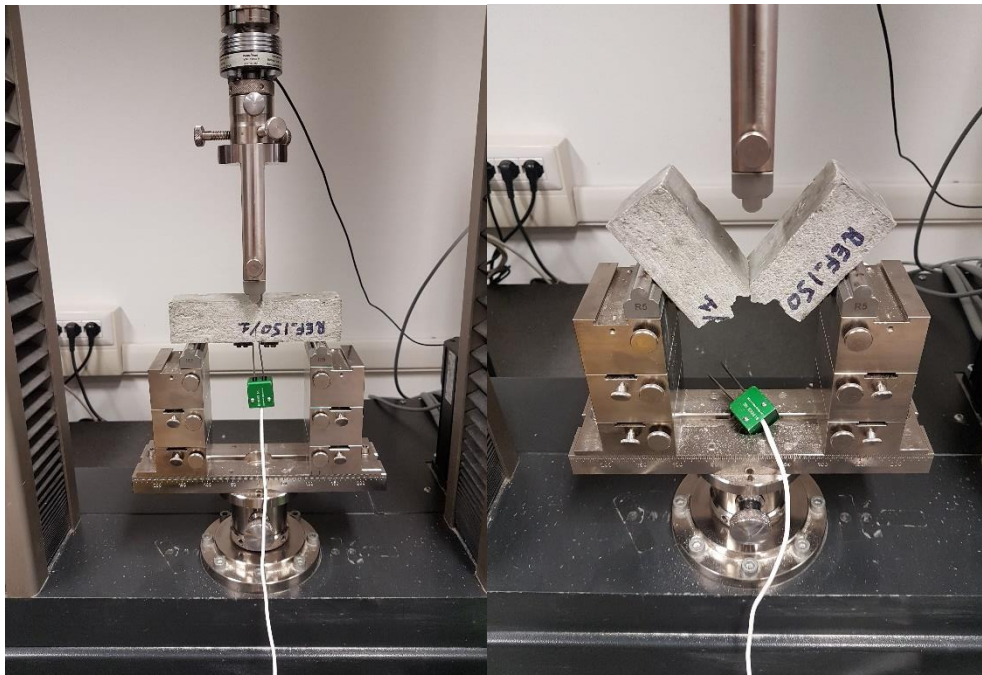


Fig. 3.1: macchinario e configurazione della prova di flessione su tre punti sino a rottura del campione.

Prima di essere sottoposti alla prova di flessione i provini sono stati intagliati in mezzera per creare una direzione preferenziale di propagazione della fessura.

L'intaglio è stato realizzato mediante una sega a nastro e rifinito manualmente per avere una profondità prossima ai 12 mm.

Successivamente sono state incollate su entrambi i lati dell'intaglio, come in figura, le “basi” sormontate da “lame”, ovvero piccoli organi di metallo ai quali fissare l'estensimetro durante la prova di flessione per monitorare progressivamente l'ampiezza della fessura.

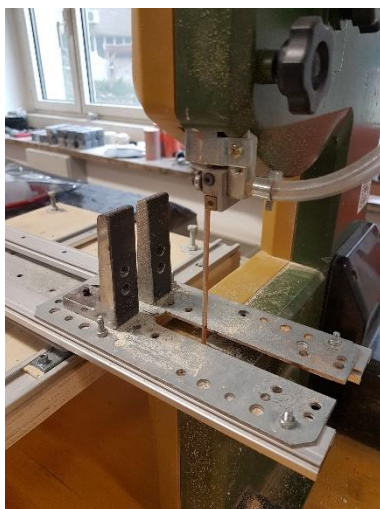


Fig. 3.2: sega a nastro per l'incisione dei campioni.



Fig. 3.3: dettagli di incisione, basi e lame (sx), basi (centro) e lame (dx).

I risultati delle prove di flessione su tre punti sono riportati graficamente nei seguenti diagrammi “forza – spostamento”, dove per forza, ovvero *standard force*, si indica il carico applicato dal macchinario nella sezione di mezzeria [N], mentre con spostamento, ovvero *deformation*, si indica la freccia del campione nella medesima sezione di applicazione del carico [mm].

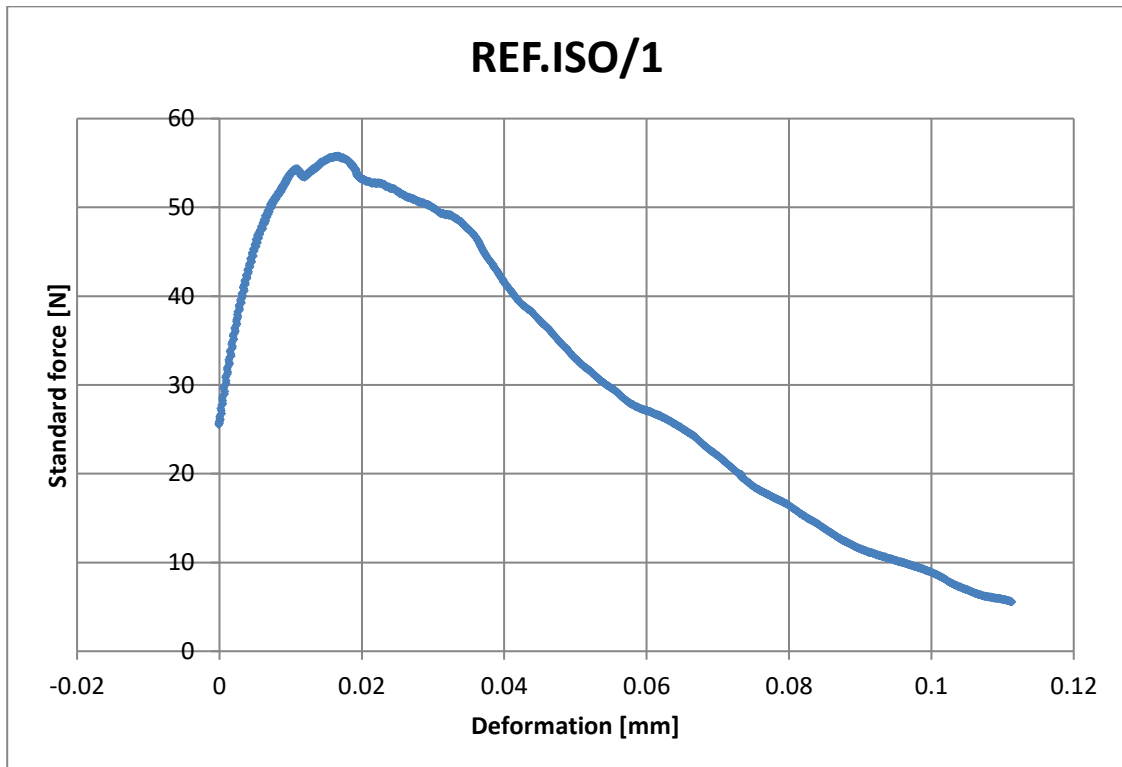


Grafico 3.1: andamento “forza-spostamento” nella prova di flessione su tre punti del campione REF.ISO/1.

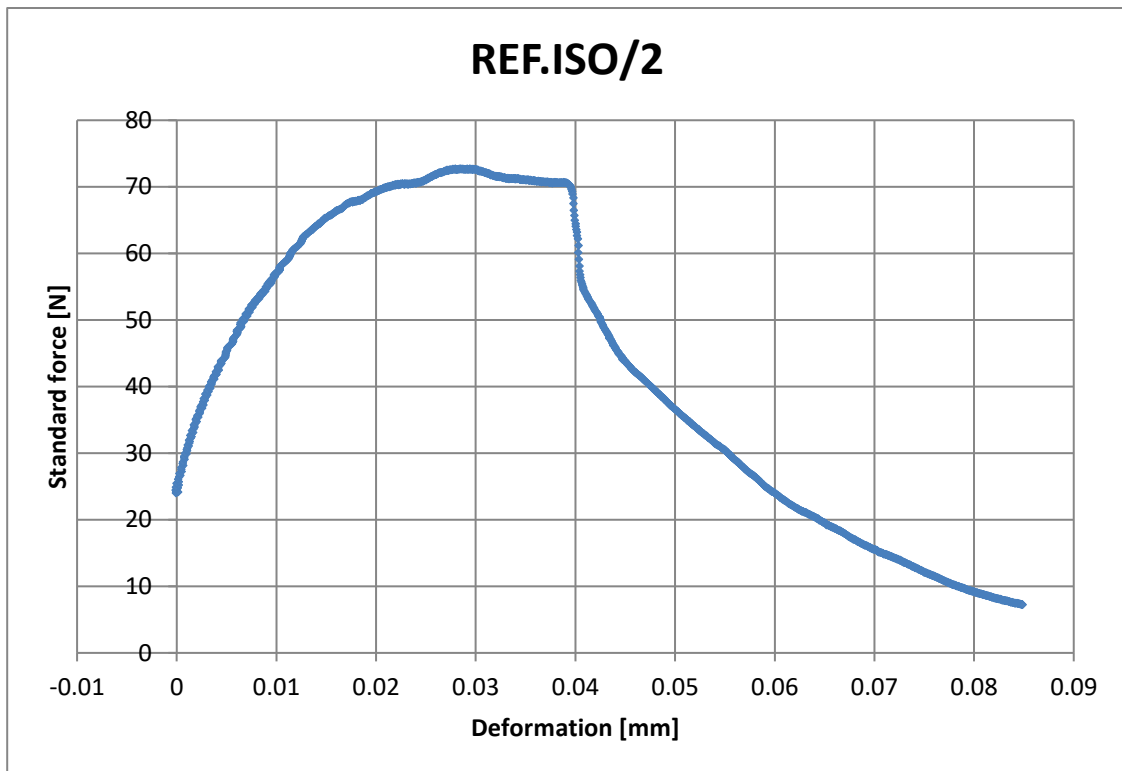


Grafico 3.2: andamento “forza-spostamento” nella prova di flessione su tre punti del campione REF.ISO/2.

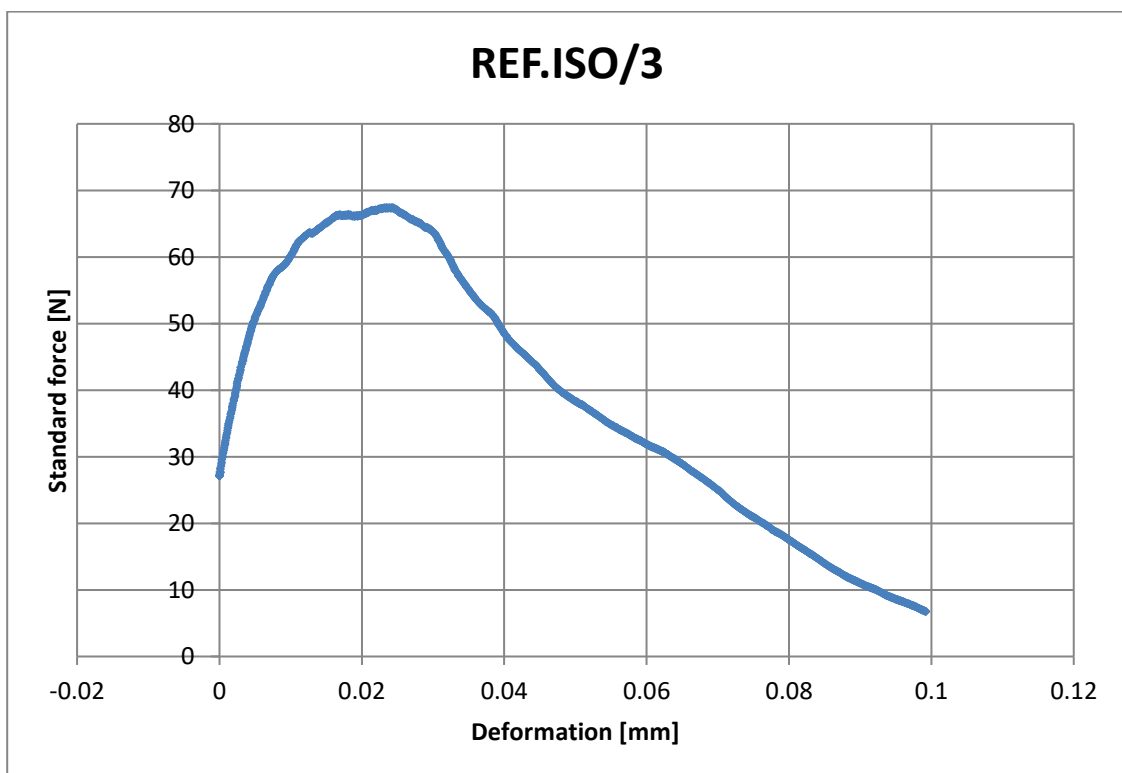


Grafico 3.3: andamento “forza-spostamento” nella prova di flessione su tre punti del campione REF.ISO/3.

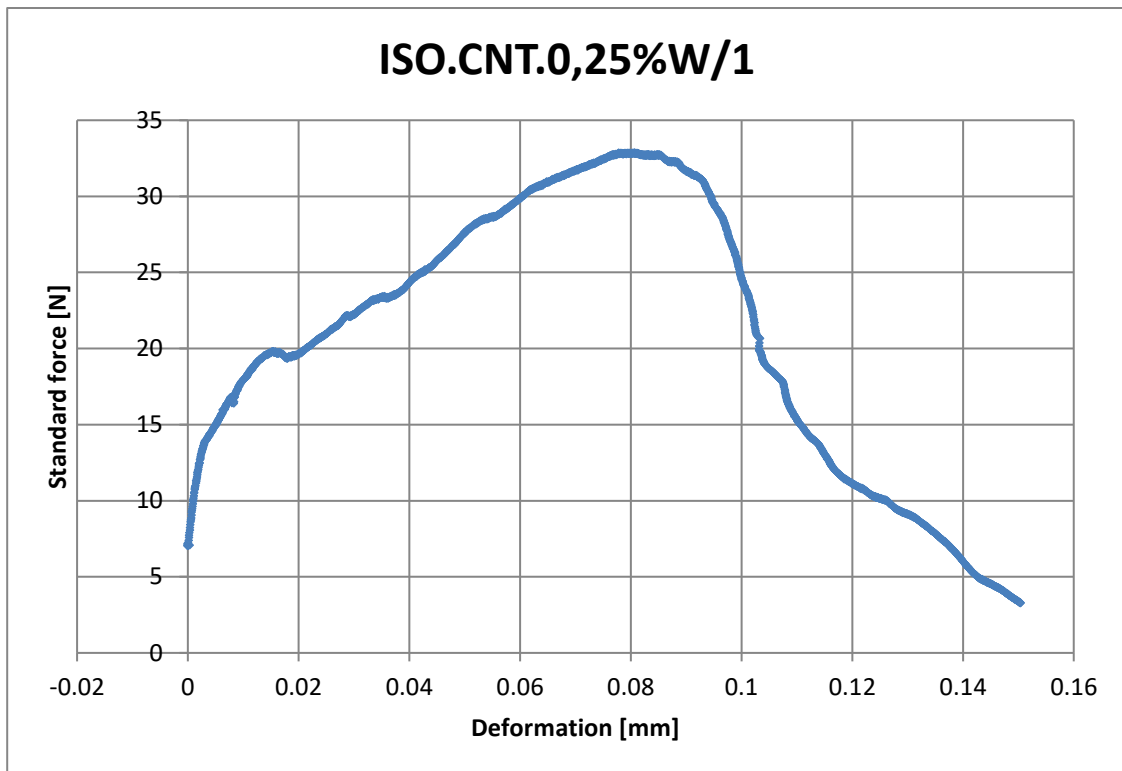


Grafico 3.4: andamento "forza-spostamento" nella prova di flessione su tre punti del campione ISO.CNT.0,25%W/1.

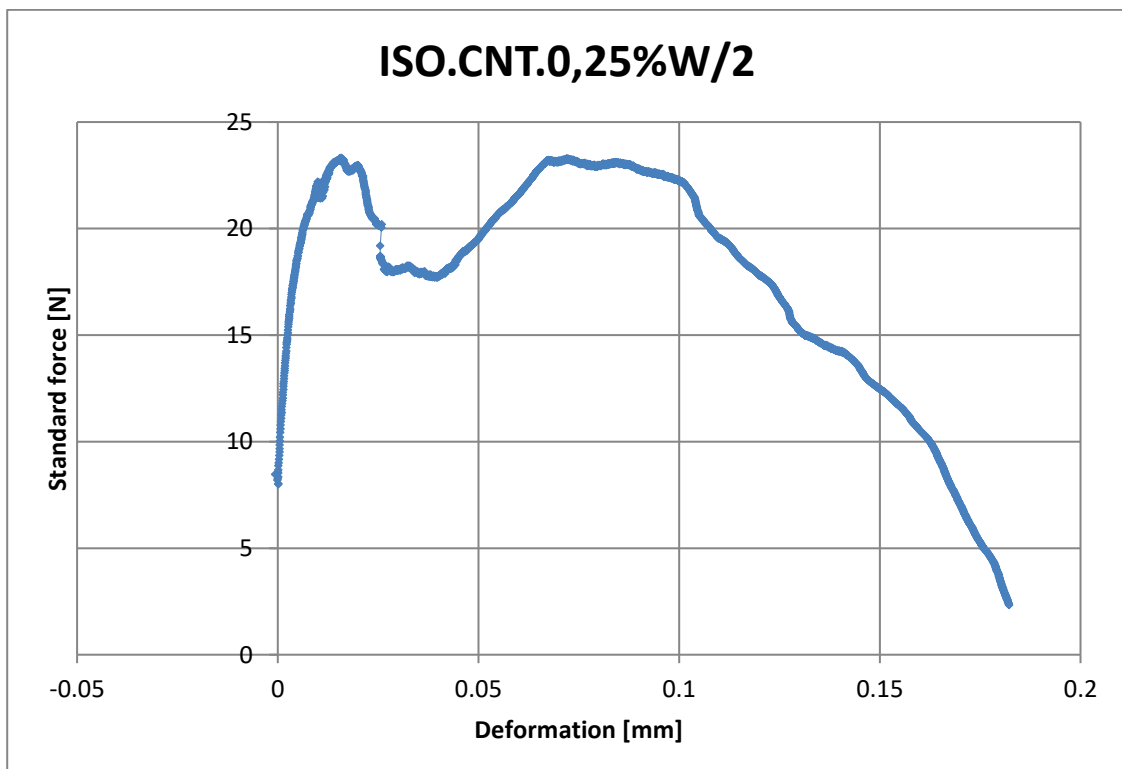


Grafico 3.5: andamento "forza-spostamento" nella prova di flessione su tre punti del campione ISO.CNT.0,25%W/2.

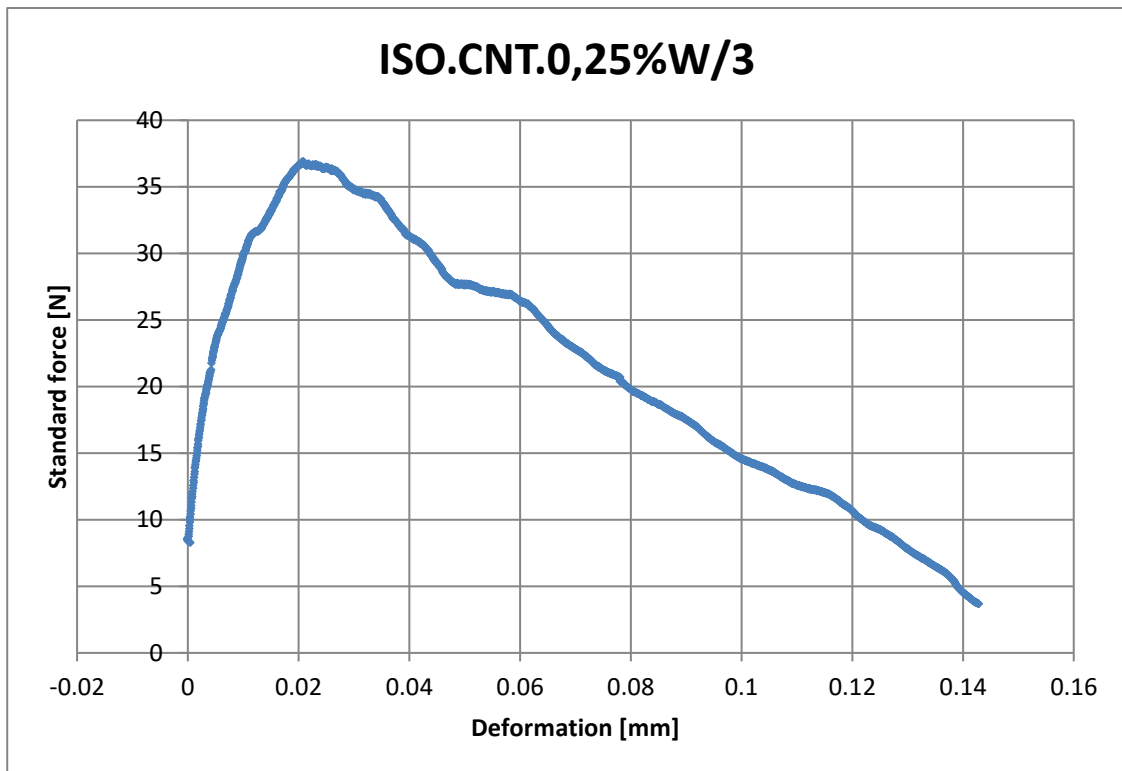


Grafico 3.6: andamento “forza-spostamento” nella prova di flessione su tre punti del campione ISO.CNT.0,25%W/3.

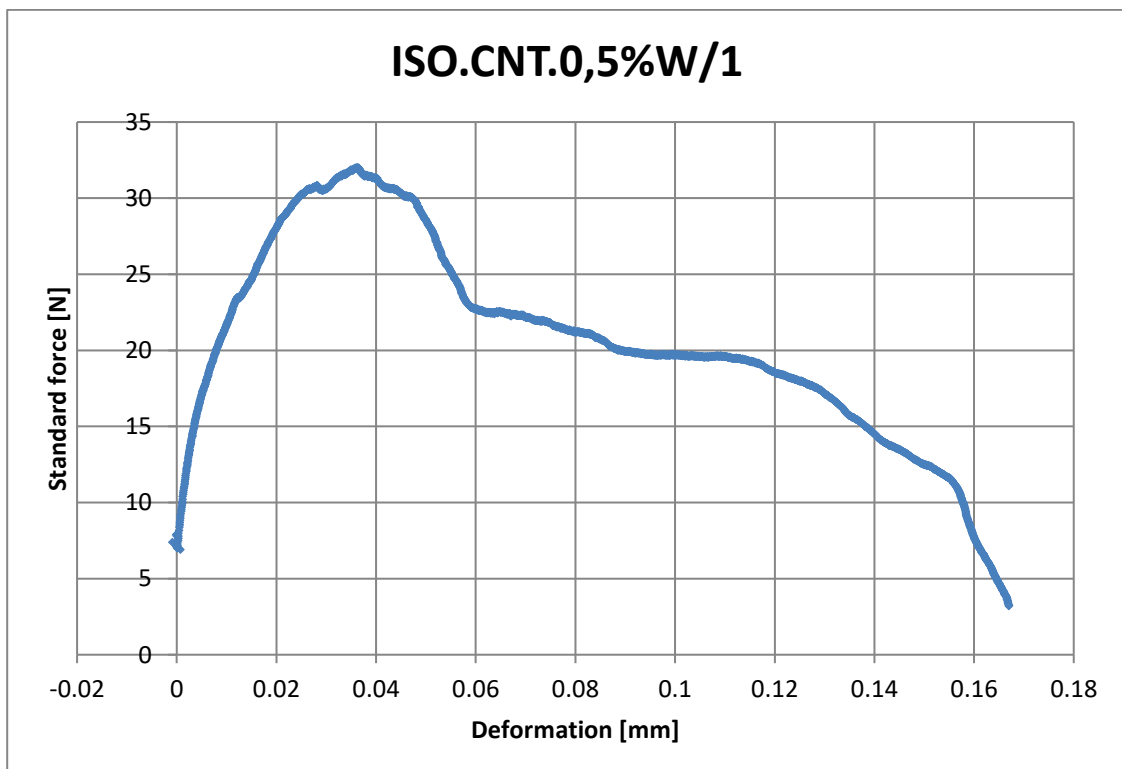


Grafico 3.7: andamento “forza-spostamento” nella prova di flessione su tre punti del campione ISO.CNT.0,5%W/1.

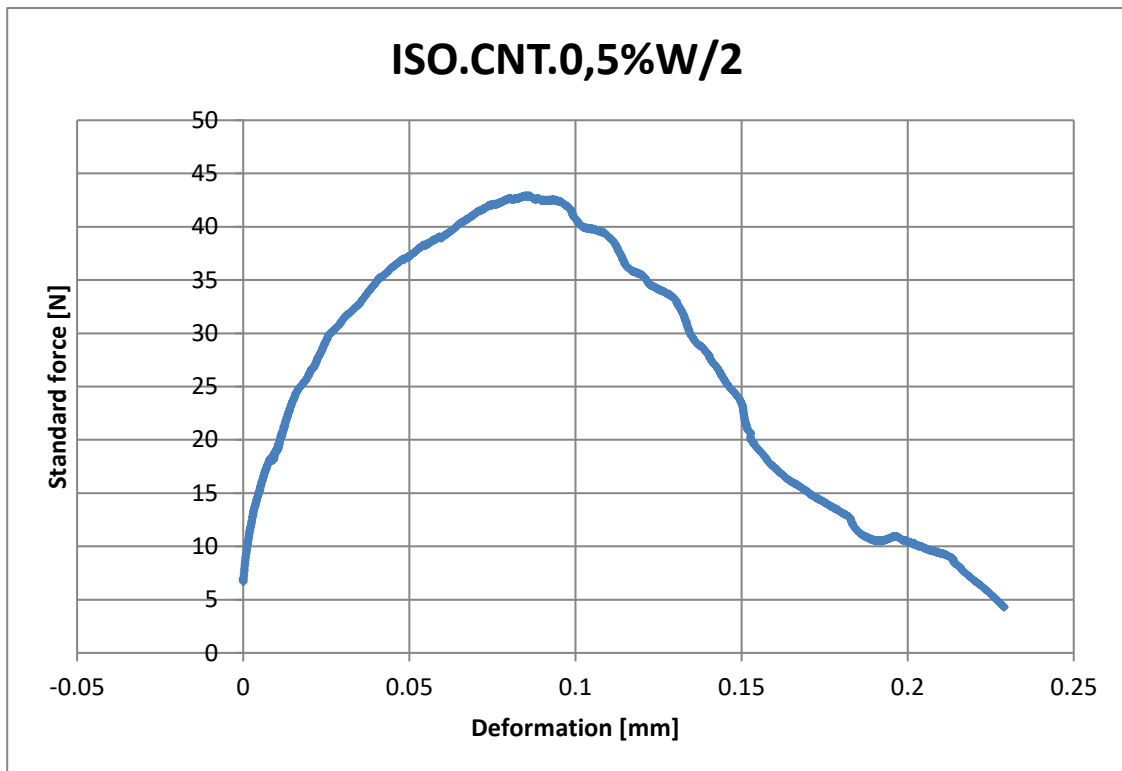


Grafico 3.8: andamento “forza-spostamento” nella prova di flessione su tre punti del campione ISO.CNT.0,5%W/2.

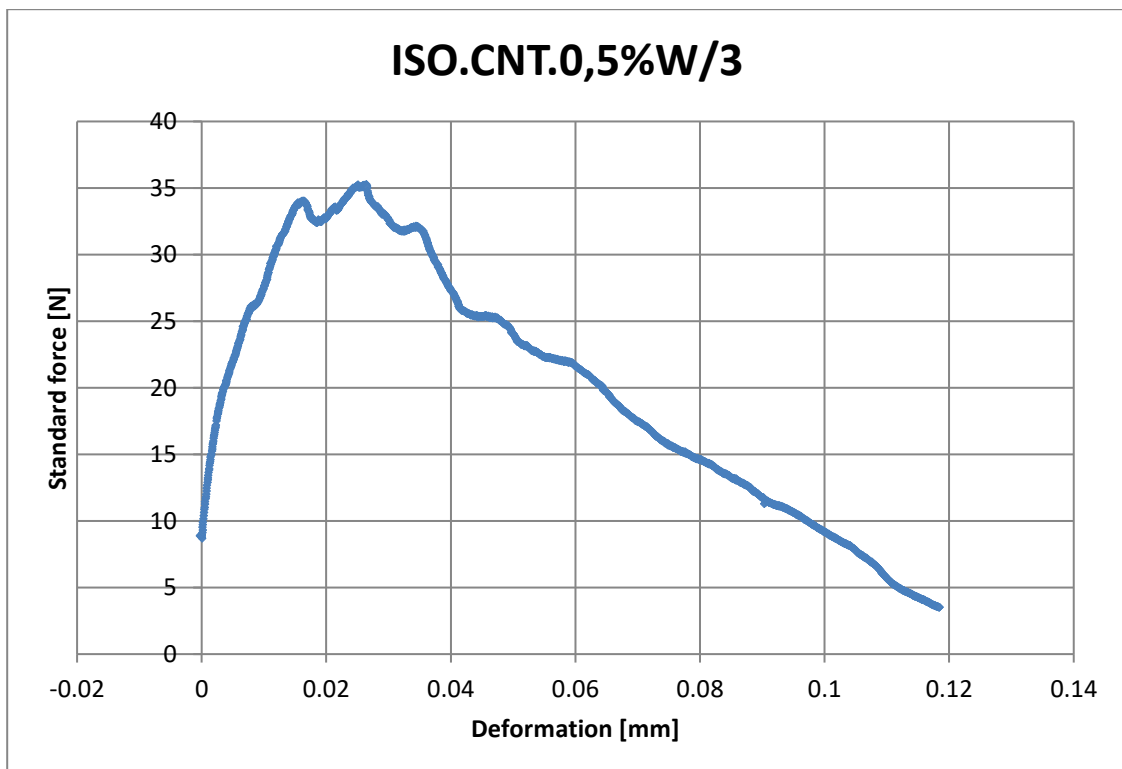


Grafico 3.9: andamento “forza-spostamento” nella prova di flessione su tre punti del campione ISO.CNT.0,5%W/3.

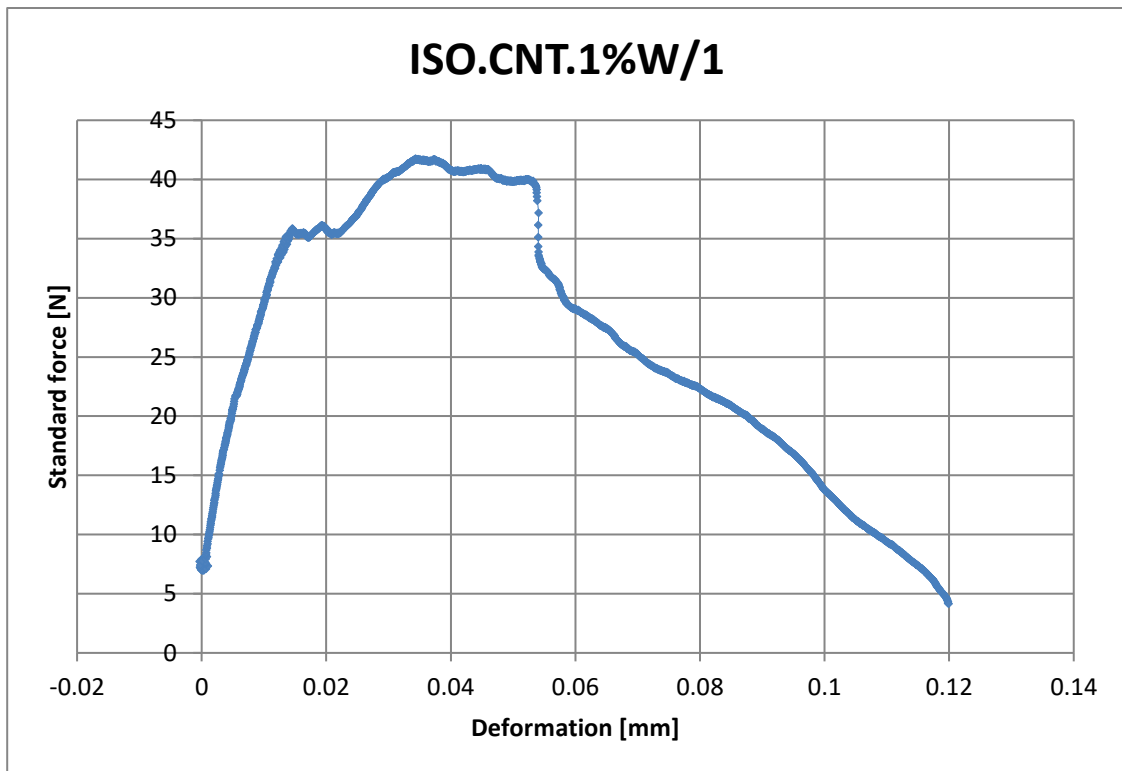


Grafico 3.10: andamento "forza-spostamento" nella prova di flessione su tre punti del campione ISO.CNT.1%W/1.

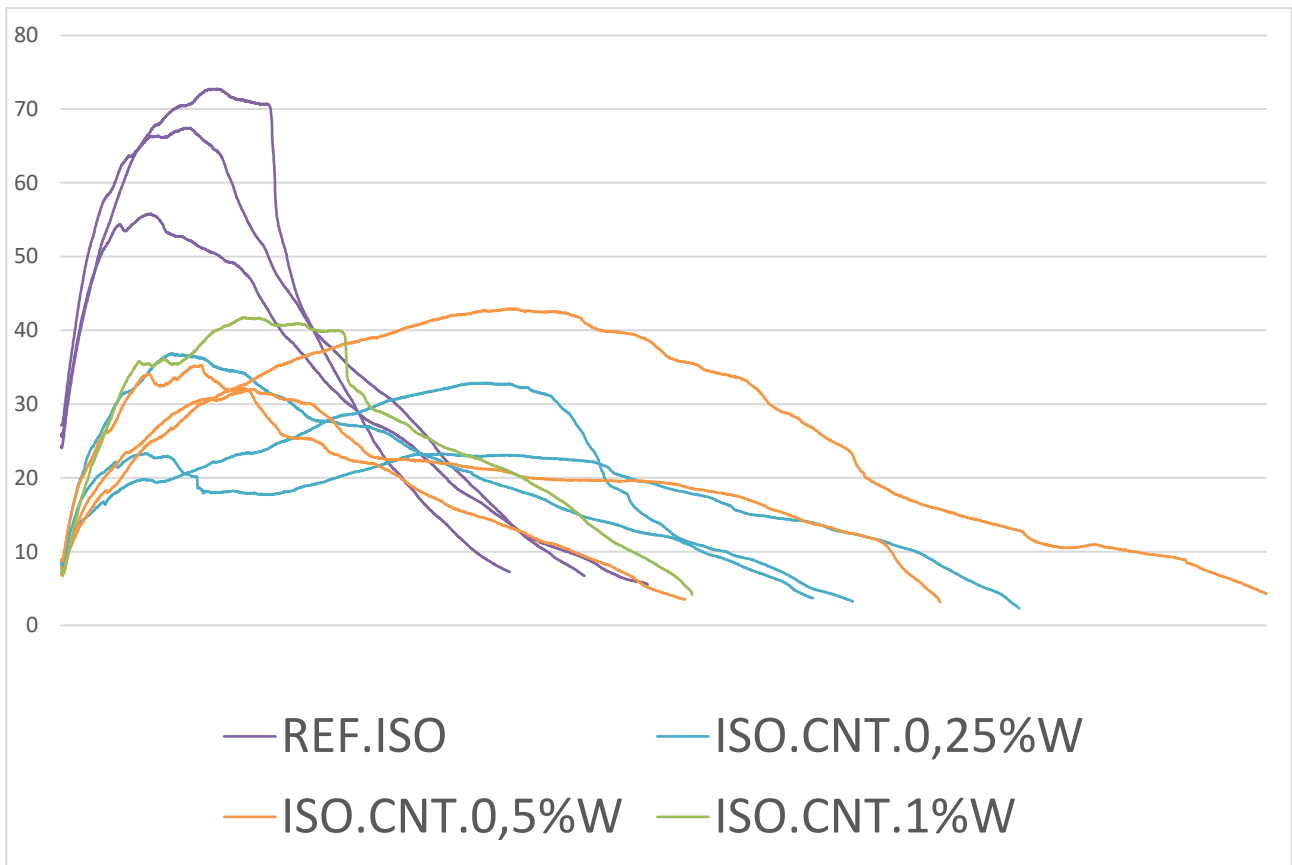


Grafico 3.11: confronto tra diagrammi “forza-spostamento” dei 10 campioni nella prova di flessione su tre punti.

Nella seguente tabella sono riassunti i risultati della prova di flessione su tre punti, dove:

- F_{max} , è la forza massima applicata dal macchinario corrispondente alla rottura per flessione del provino;
- dL a F_{max} , è l'ampiezza della fessura corrispondente al carico F_{max} ;
- *interasse*, è la distanza tra i due appoggi esterni del macchinario;
- *intaglio*, è la profondità dell'intaglio, dalla quale avverrà la propagazione della frattura;
- a_0 , è l'altezza della sezione di mezzeria, in corrispondenza dell'intaglio, su cui è applicato il carico dal macchinario;
- b_0 , è la larghezza della sezione di mezzeria, su cui è applicato il carico dal macchinario;
- S_0 , è l'area della sezione di mezzeria, su cui è applicato il carico dal macchinario;
- M_{max} , è il momento positivo massimo, ovvero a rottura, agente nella sezione di mezzeria del campione in corrispondenza del carico applicato F_{max} ;
- σ_{max} , è la tensione di trazione massima, ovvero a rottura, che agisce sulle fibre dell'estremo inferiore del campione nella sezione di mezzeria in corrispondenza del carico applicato F_{max} .

I valori di F_{max} e dL a F_{max} sono forniti dal macchinario stesso al termine della prova, mentre quelli dell'*interasse*, *intaglio*, a_0 e b_0 sono da considerarsi noti in seguito ad una misurazione sui campioni con calibro.

Per quanto riguarda i valori di S_0 , M_{max} e σ_{max} , sono stati ricavati dalle seguenti formule:

$$S_0 = a_0 \cdot b_0$$

$$M_{max} = \frac{F_{max} \cdot \textit{interasse}}{4}$$

$$\sigma_{max} = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot \textit{interasse}}{2 \cdot a_0^2 \cdot b_0}$$

sigla	F_{max}	dL at F_{max}	interasse	intaglio	a_0	b_0	S_0	M_{max}	σ_{max}
[-]	[N]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm ²]	[Nmm]	[MPa]
REF.ISO/1	55.81	0.017	120.00	12.40	27.60	40.50	1117.80	1674.19	0.33
REF.ISO/2	72.75	0.028	120.00	12.00	28.00	40.20	1125.60	2182.46	0.42
REF.ISO/3	67.42	0.024	120.00	12.00	28.00	40.40	1131.20	2022.71	0.38
ISO.CNT.0,25%w/1	32.89	0.081	120.00	12.50	27.50	40.30	1108.25	986.55	0.19
ISO.CNT.0,25%w/2	23.31	0.016	120.00	12.30	27.70	40.30	1116.31	699.36	0.14
ISO.CNT.0,25%w/3	36.93	0.021	120.00	12.00	28.00	40.40	1131.20	1107.84	0.21
ISO.CNT.0,5%w/1	32.01	0.036	120.00	12.00	28.00	40.40	1131.20	960.20	0.18
ISO.CNT.0,5%w/2	42.93	0.086	120.00	12.00	28.00	40.20	1125.60	1288.04	0.25
ISO.CNT.0,5%w/3	35.29	0.026	120.00	13.00	27.00	40.30	1088.10	1058.66	0.22
ISO.CNT.1%w/1	41.76	0.034	120.00	12.00	28.00	40.00	1120.00	1252.72	0.24
ISO.CNT.1%w/2	NON DISPONIBILE								
ISO.CNT.1%w/3	NON DISPONIBILE								

Tab. 3.1: risultati prova di flessione su tre punti.

Si precisa che con il termine “NON DISPONIBILE” si è voluto indicare che la prova di flessione su tre punti non è stata portata a compimento correttamente in quanto sono sorte delle problematiche, come il distacco delle basi precedentemente incollate per il corretto posizionamento dell’estensimetro, pertanto non è stato possibile ottenere per quei campioni i valori di “forza-spostamento” e conseguentemente di momento e tensione ultima; è stato comunque possibile riutilizzare le “metà” di questi provini nella successiva prova di compressione.

Per poter meglio interpretare i risultati di cui sopra, ma soprattutto per poterli confrontare con altri presenti in letteratura, è necessario riferirli ad un valore di densità preciso, ovvero quello relativo al giorno delle prove; nella seguente tabella viene fatto ciò, mediando i valori di densità e σ_{\max} per ogni impasto e calcolandone, dove possibile, lo scarto quadratico medio:

sigla	densità giorno prove	densità media	densità sqm	σ_{\max}	σ_{\max} medio	σ_{\max} sqm
[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
REF.ISO/1	814.4	828.1	24.60	0.33	0.37	0.037
REF.ISO/2	862.6			0.42		
REF.ISO/3	807.2			0.38		
ISO.CNT.0,25%w/1	801.5	780.1	16.93	0.19	0.18	0.029
ISO.CNT.0,25%w/2	778.6			0.14		
ISO.CNT.0,25%w/3	760.1			0.21		
ISO.CNT.0,5%w/1	794.7	827.5	26.46	0.18	0.22	0.029
ISO.CNT.0,5%w/2	828.4			0.25		
ISO.CNT.0,5%w/3	859.5			0.22		
ISO.CNT.1%w/1	840.5	802.5	32.32	0.24	0.24	/
ISO.CNT.1%w/2	805.5			N.D.		
ISO.CNT.1%w/3	761.5			N.D.		

Tab. 3.2: correlazione densità-tensione nella prova di flessione su tre punti.

Vengono riportate in seguito le immagini da diverse angolazioni di tutti e 12 i provini al termine della prova di flessione su tre punti, ovvero le 24 metà che saranno successivamente testate a compressione:



Fig. 3.4: provino REF.ISO/1 al termine della prova di flessione su tre punti.



Fig. 3.5: provino REF.ISO/2 al termine della prova di flessione su tre punti.

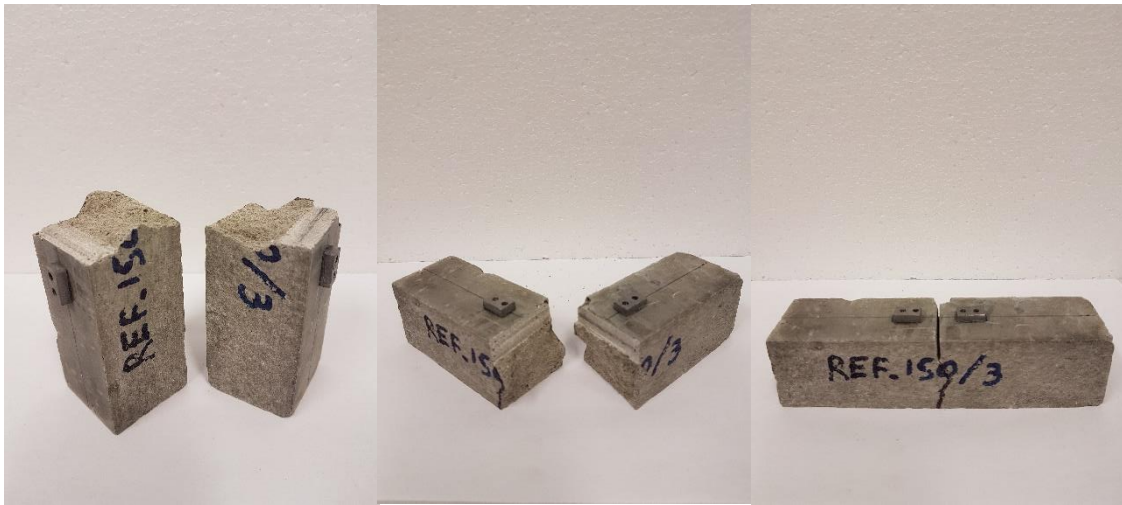


Fig. 3.6: provino REF.ISO/3 al termine della prova di flessione su tre punti.

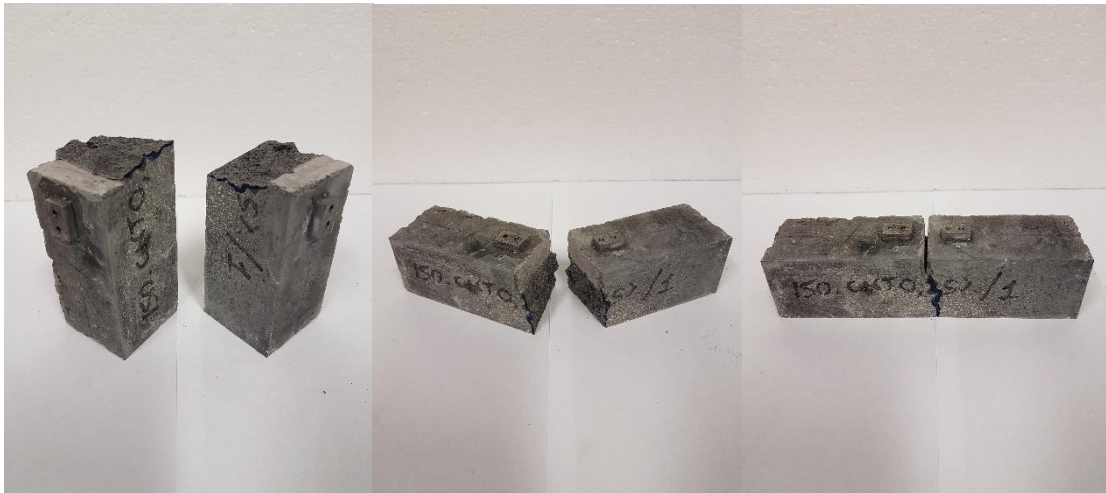


Fig. 3.7: provino ISO.CNT.0,25%W/1 al termine della prova di flessione su tre punti.

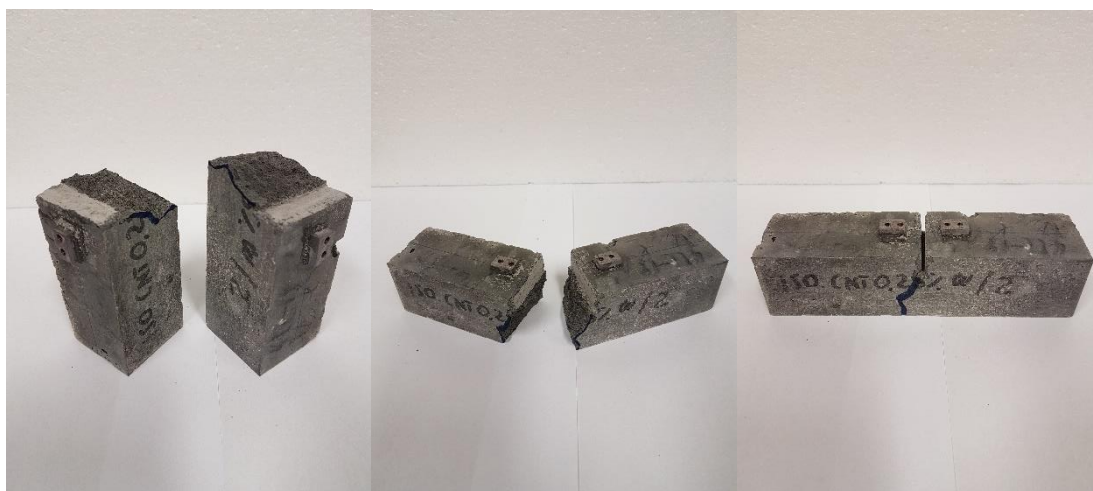


Fig. 3.8: provino ISO.CNT.0,25%W/2 al termine della prova di flessione su tre punti.



Fig. 3.9: provino ISO.CNT.0,25%W/3 al termine della prova di flessione su tre punti.

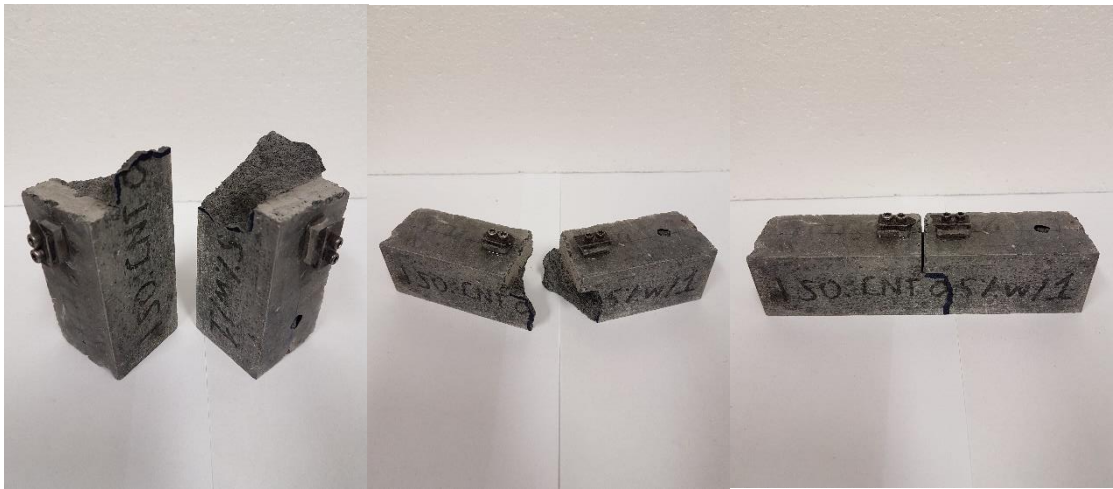


Fig. 3.10: provino ISO.CNT.0,5%W/1 al termine della prova di flessione su tre punti.

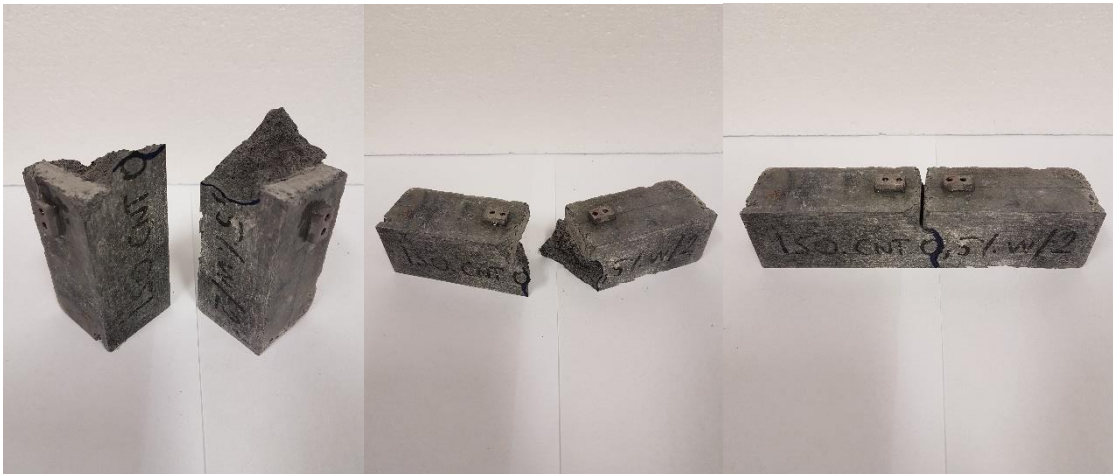


Fig. 3.11: provino ISO.CNT.0,5%W/2 al termine della prova di flessione su tre punti.

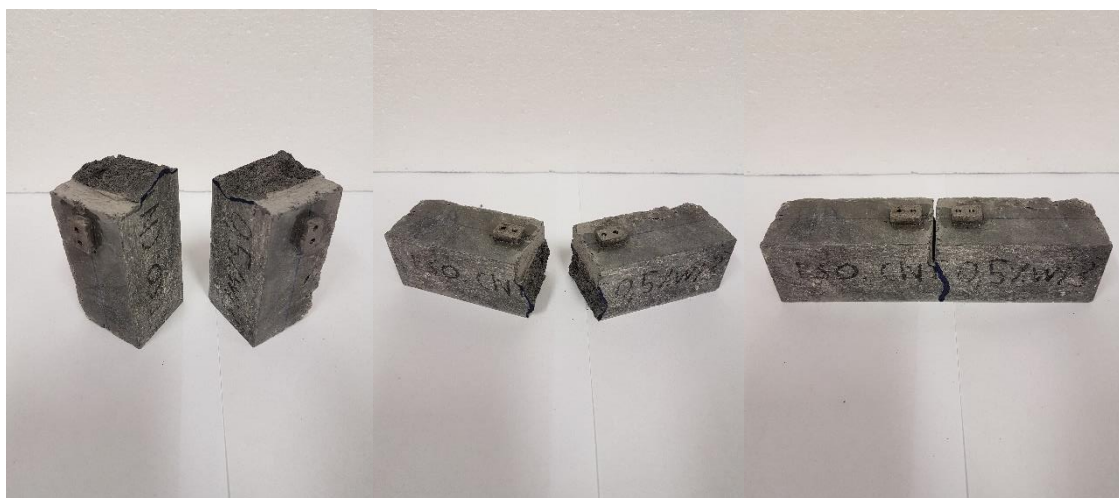


Fig. 3.12: provino ISO.CNT.0,5%W/3 al termine della prova di flessione su tre punti.



Fig. 3.13: provino ISO.CNT.1%W/1 al termine della prova di flessione su tre punti.



Fig. 3.14: provino ISO.CNT.1%W/2 al termine della prova di flessione su tre punti.



Fig. 3.15: provino ISO.CNT.1%W/3 al termine della prova di flessione su tre punti.

3.2 – Resistenza a compressione

La prova per la valutazione della resistenza a compressione delle 24 “metà” dei 12 provini prismatici è stata effettuata mediante il telaio di prova riportato nella figura sottostante, dotato di una capacità di carico massima pari a 50 kN.

La prova è stata condotta con un incremento di carico pari a 1000 N/sec, in conformità con quanto prescritto nella norma UNI EN 196/1, fino al raggiungimento della rottura del campione; il picco di carico, F_{max} , raggiunto durante il test ha permesso di valutare la resistenza a compressione di ogni provino.



Fig. 3.16: macchinario e configurazione della prova di compressione.

I risultati delle prove di compressione sono riportati graficamente nei seguenti diagrammi “forza – spostamento”, dove per forza, ovvero *standard force*, si indica il carico applicato dal macchinario [N], mentre con spostamento, ovvero *standard travel*, si indica la contrazione verticale del campione dovuta all’applicazione del carico di cui sopra [mm].

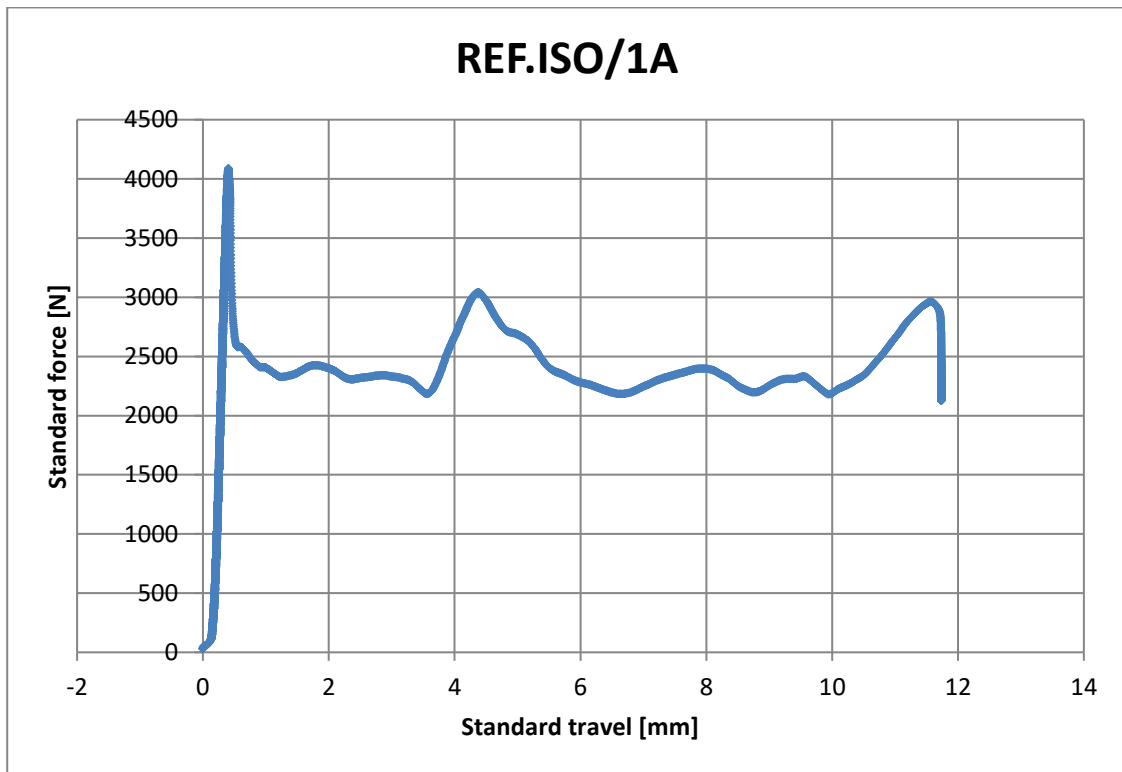


Grafico 3.12: andamento “forza-spostamento” nella prova di compressione del campione REF.ISO/1A.

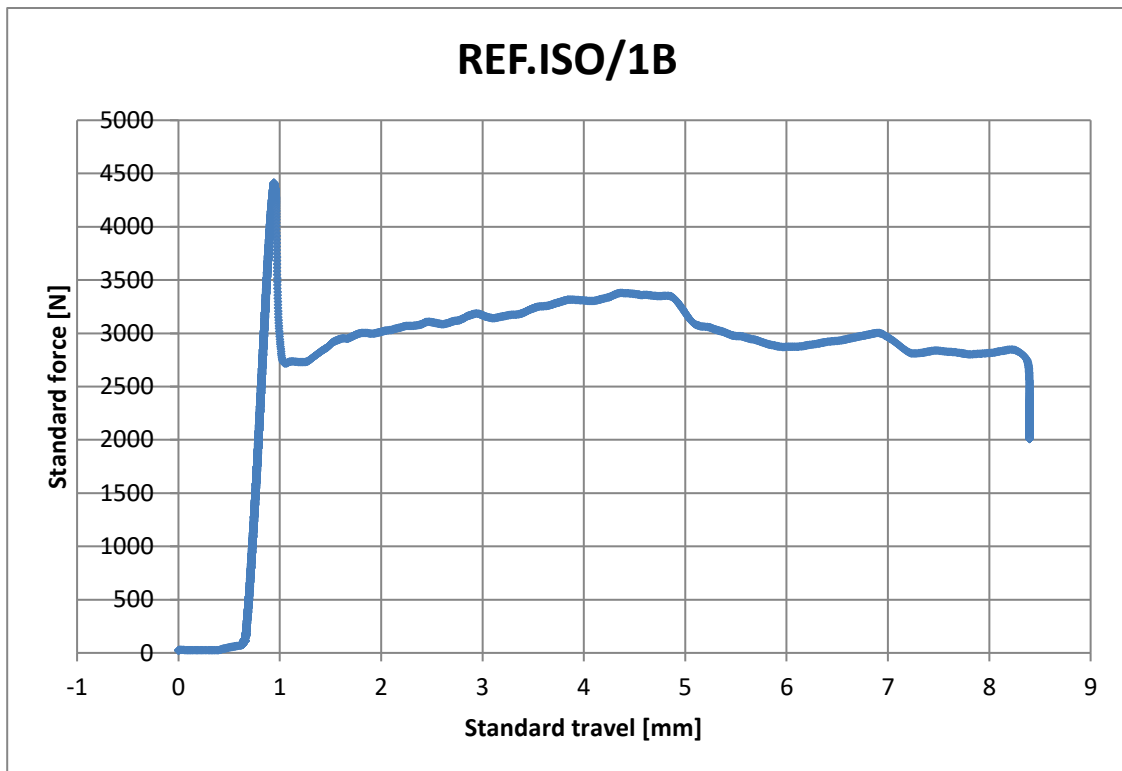


Grafico 3.13: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione REF.ISO/1B.

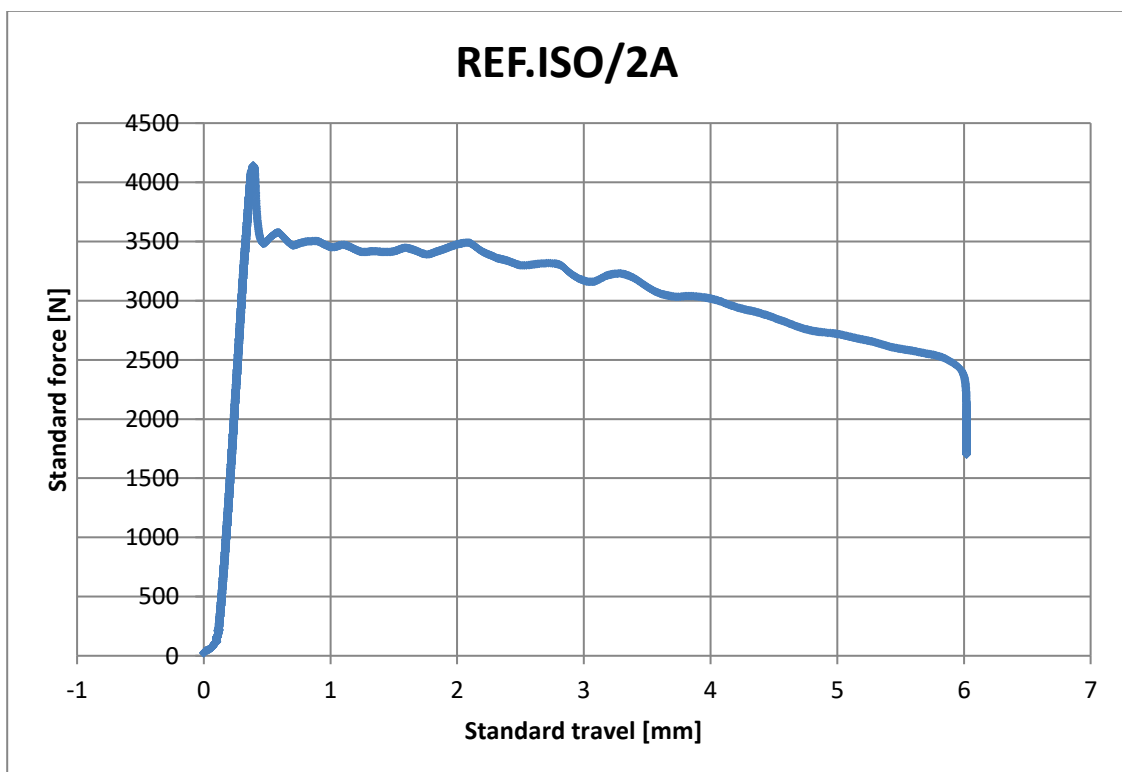


Grafico 3.14: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione REF.ISO/2A.

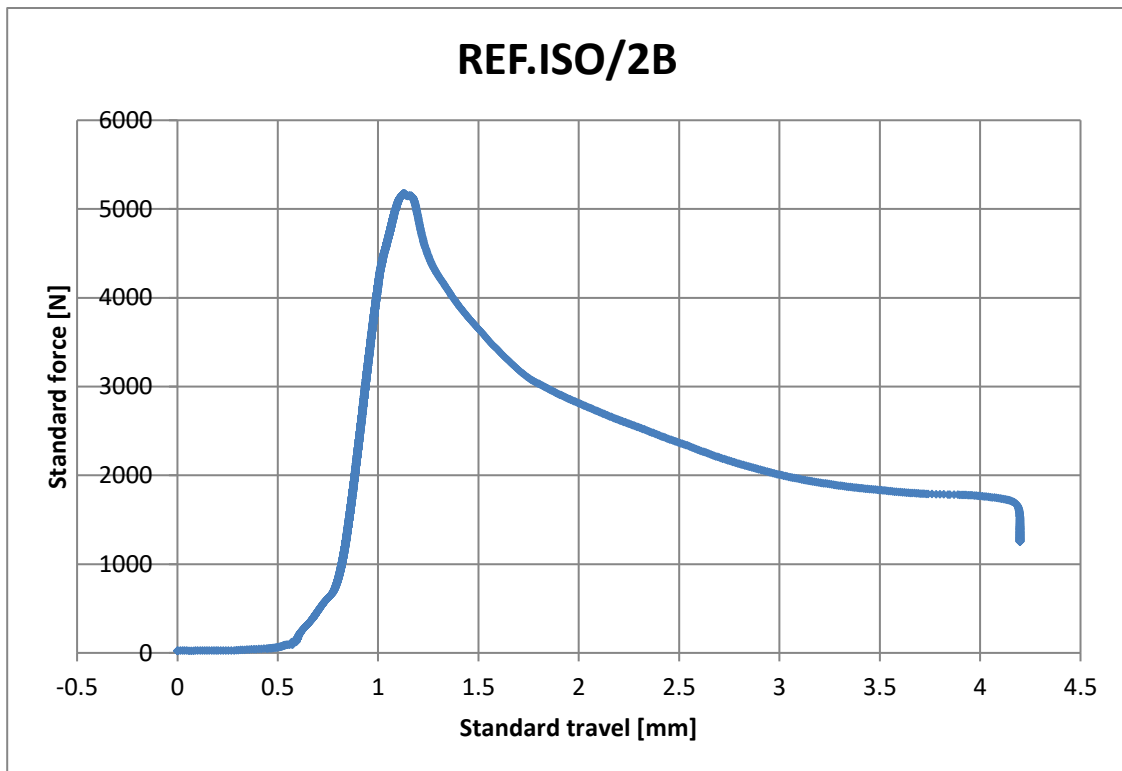


Grafico 3.15: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione REF.ISO/2B.

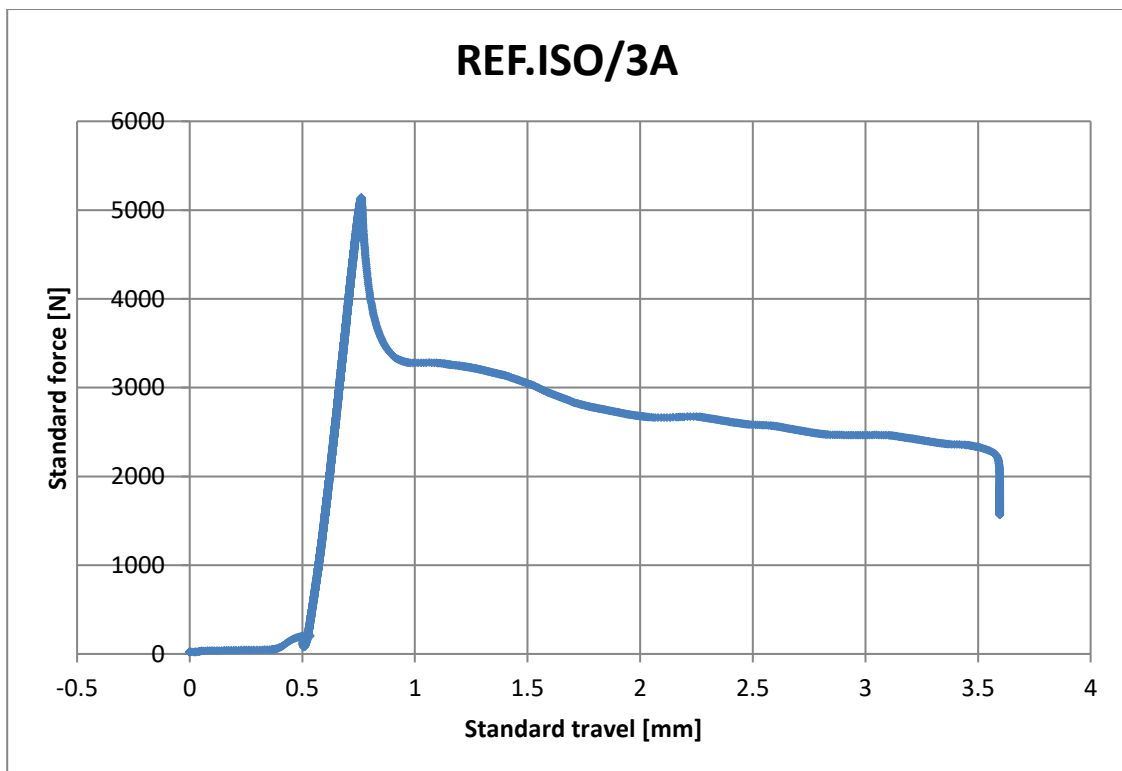


Grafico 3.16: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione REF.ISO/3A.

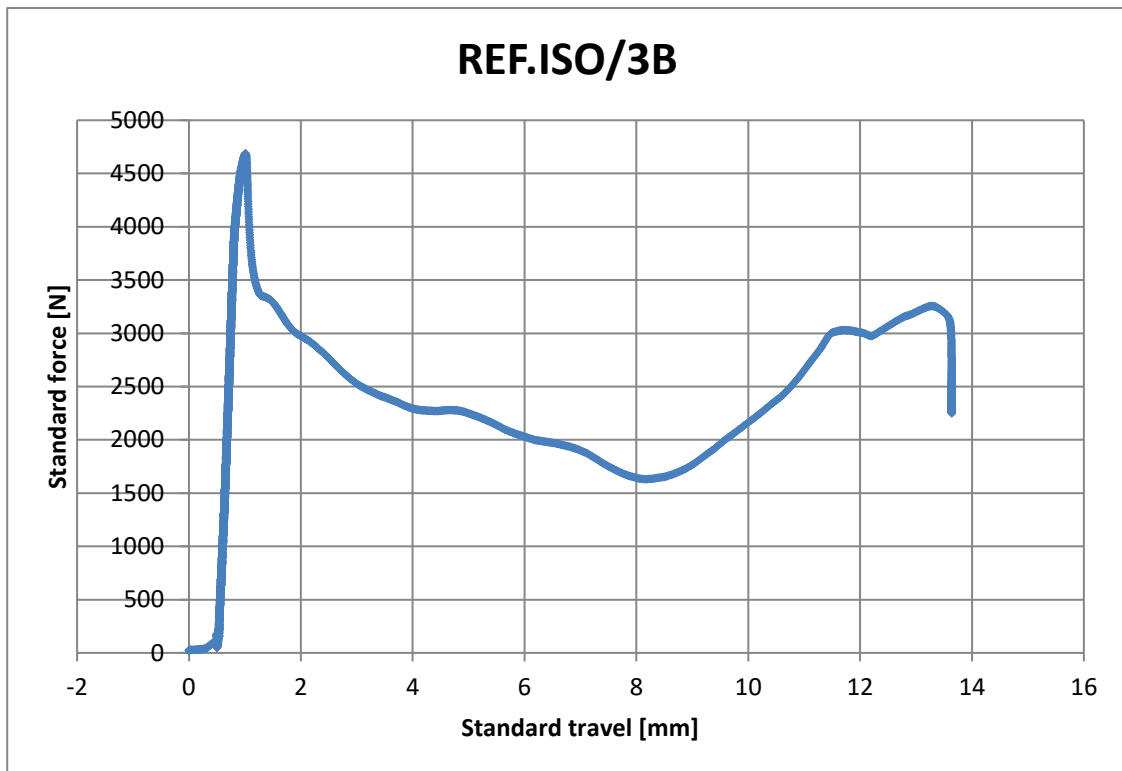


Grafico 3.17: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione REF.ISO/3B.

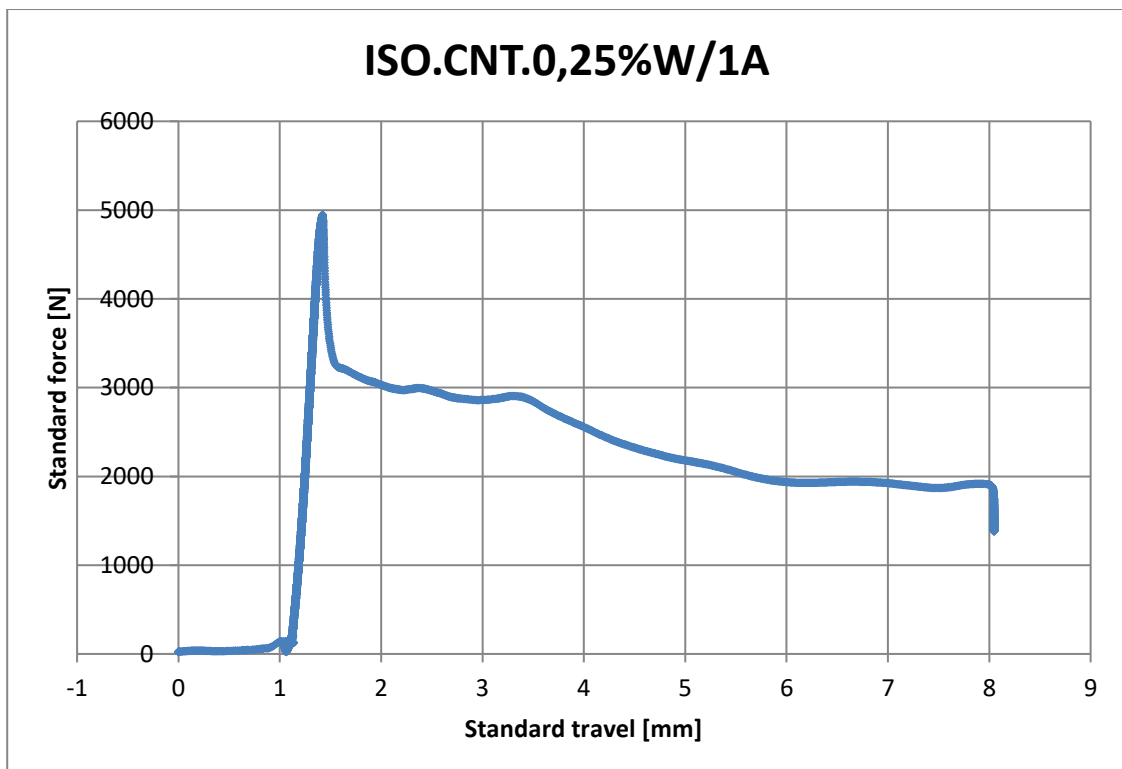


Grafico 3.18: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,25%W/1A.

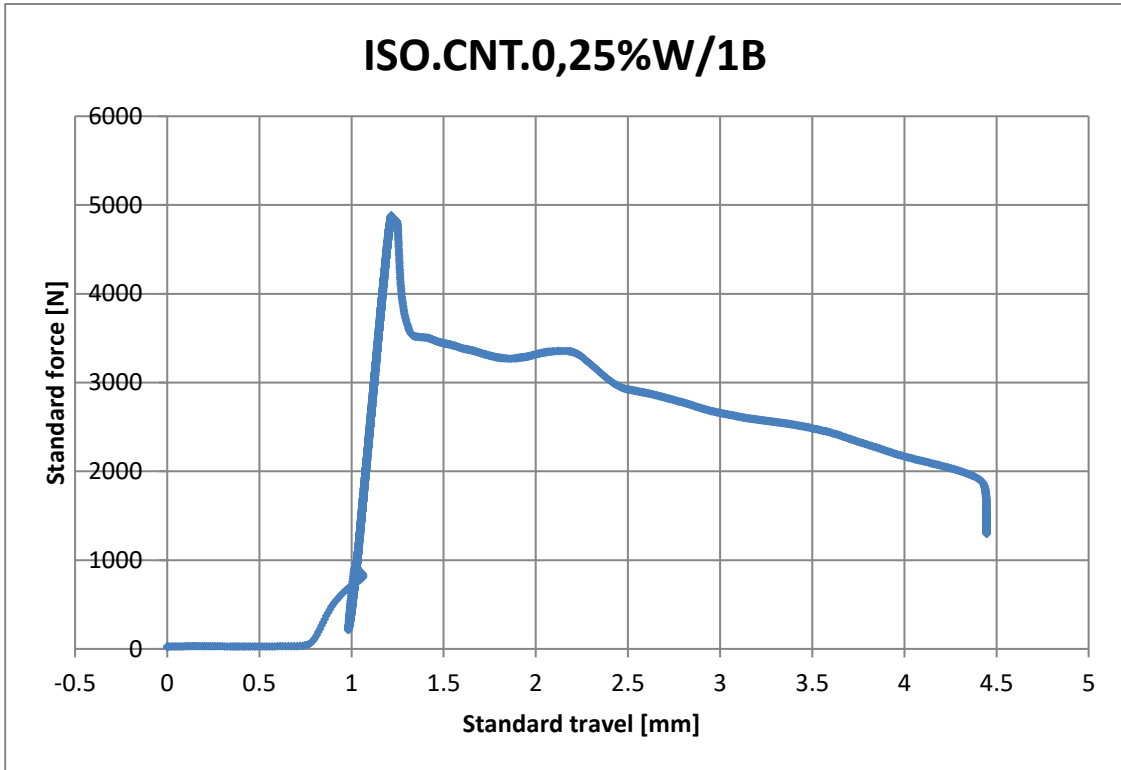


Grafico 3.19: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,25%W/1B.

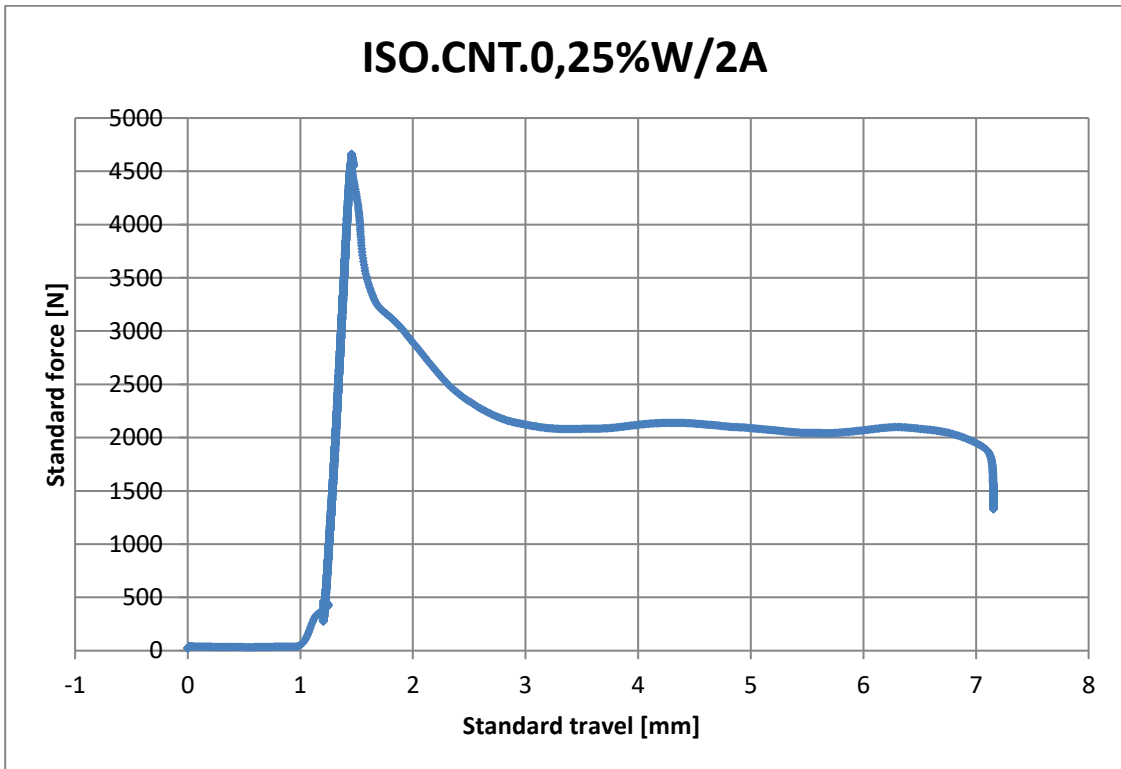


Grafico 3.20 ISO.CNT.0,25%W/2A.

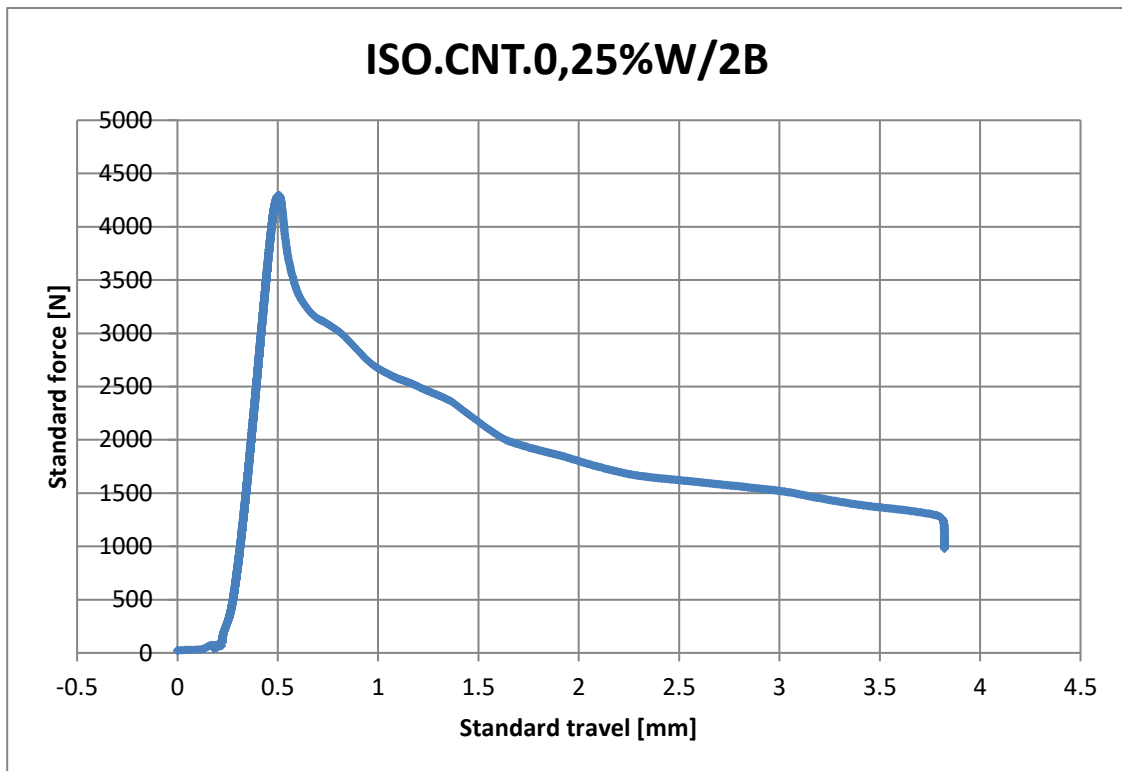


Grafico 3.21: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,25%W/2B.

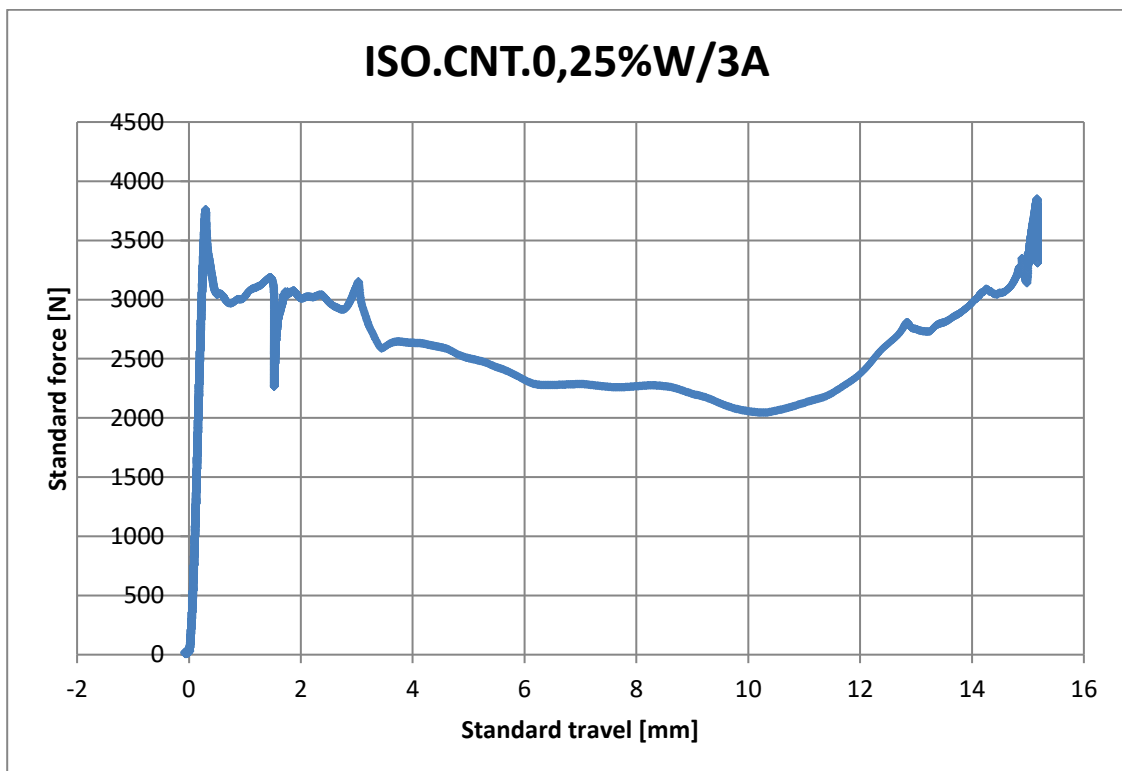


Grafico 3.22: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,25%W/3A.

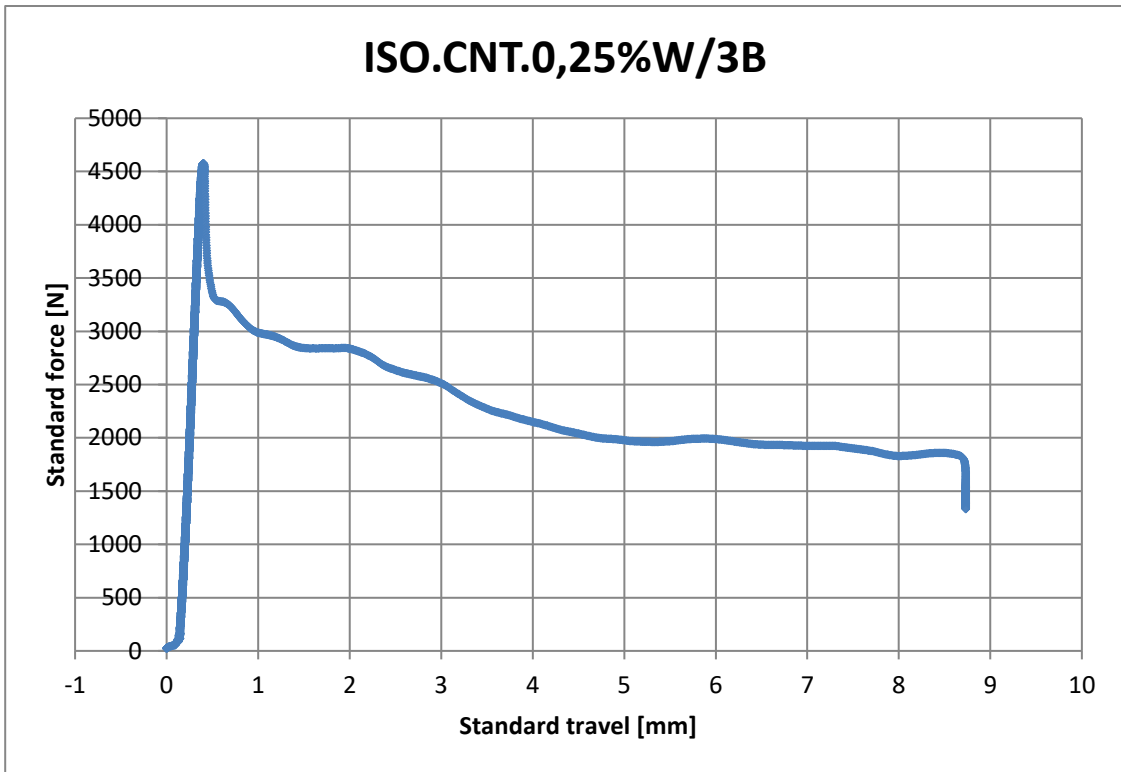


Grafico 3.23: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,25%W/3B.

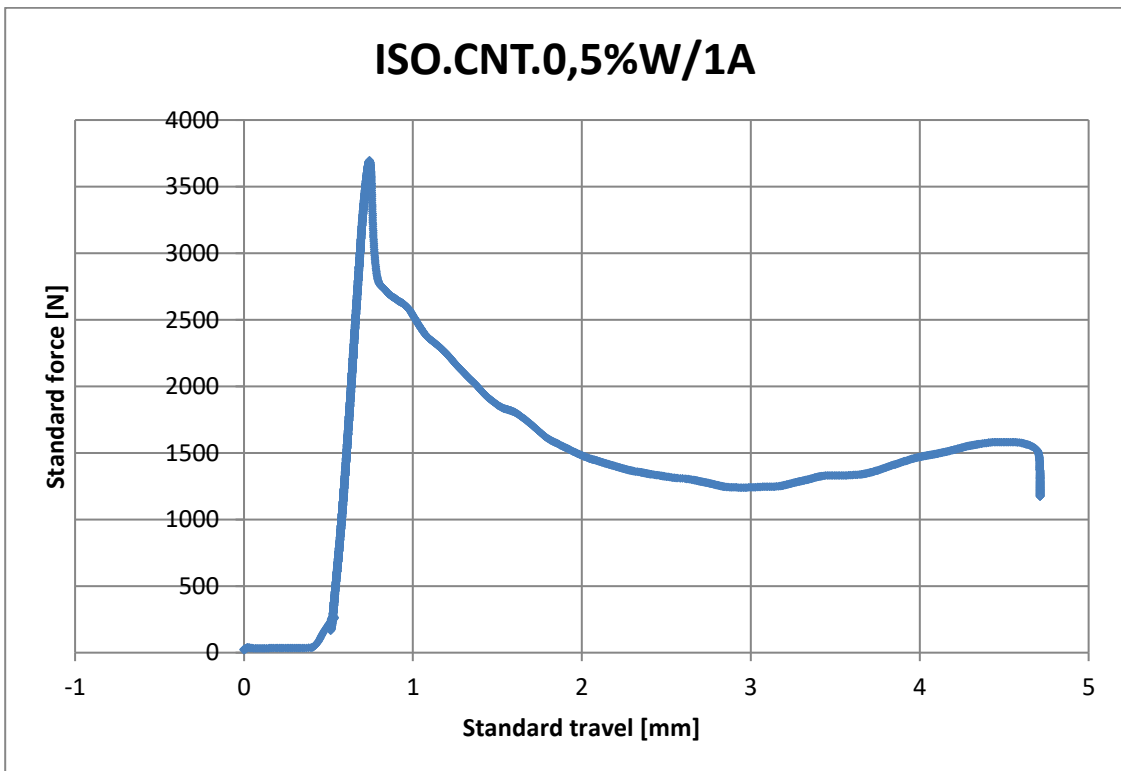


Grafico 3.24: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,5%W/1A.

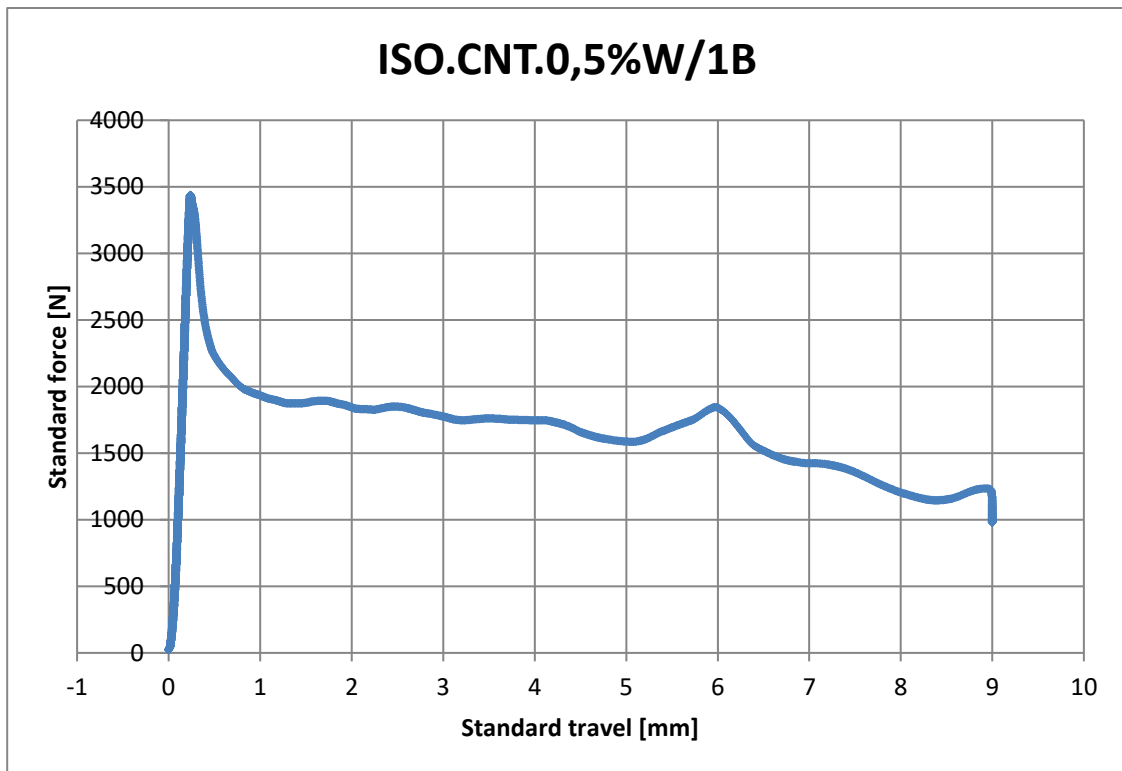


Grafico 3.25: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,5%W/1B.

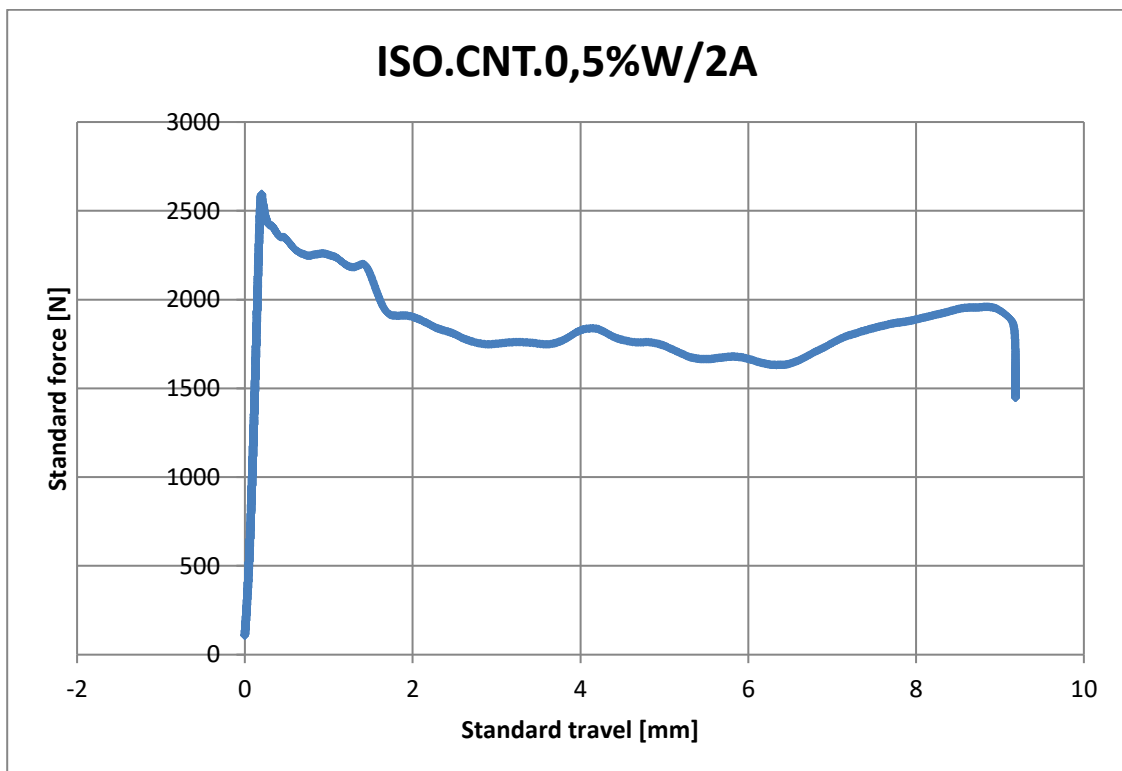


Grafico 3.26: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,5%W/2A.

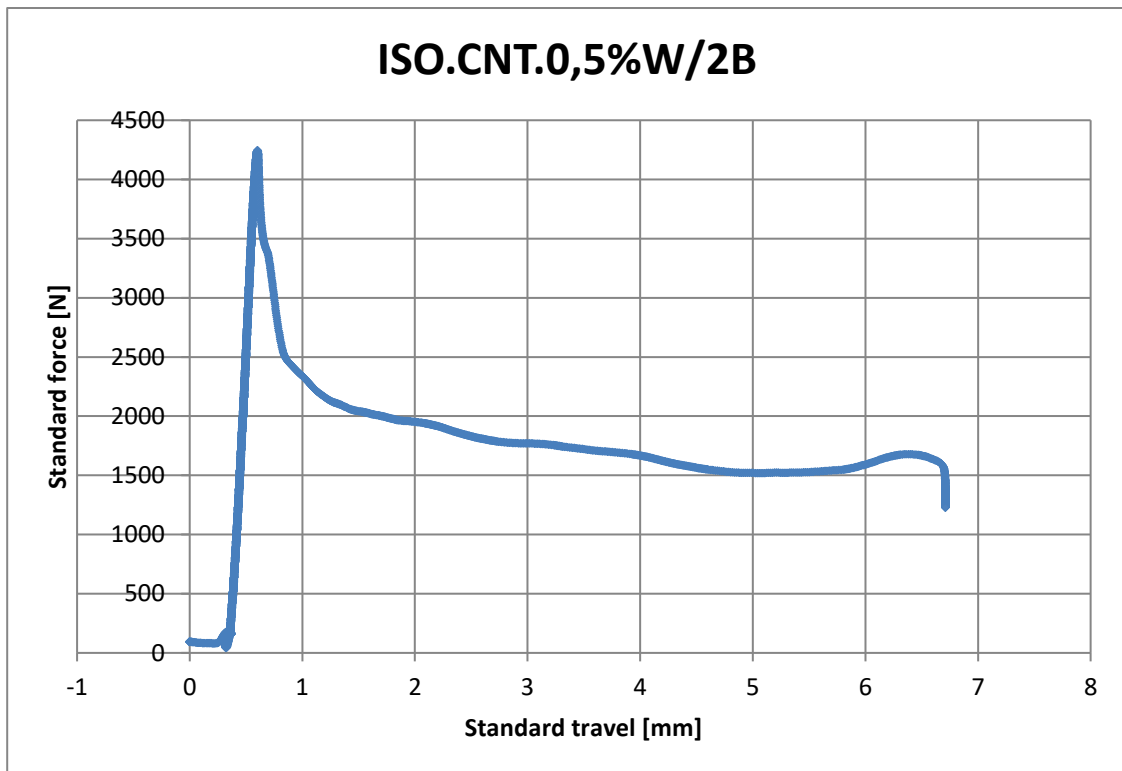


Grafico 3.27: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,5%W/2B.

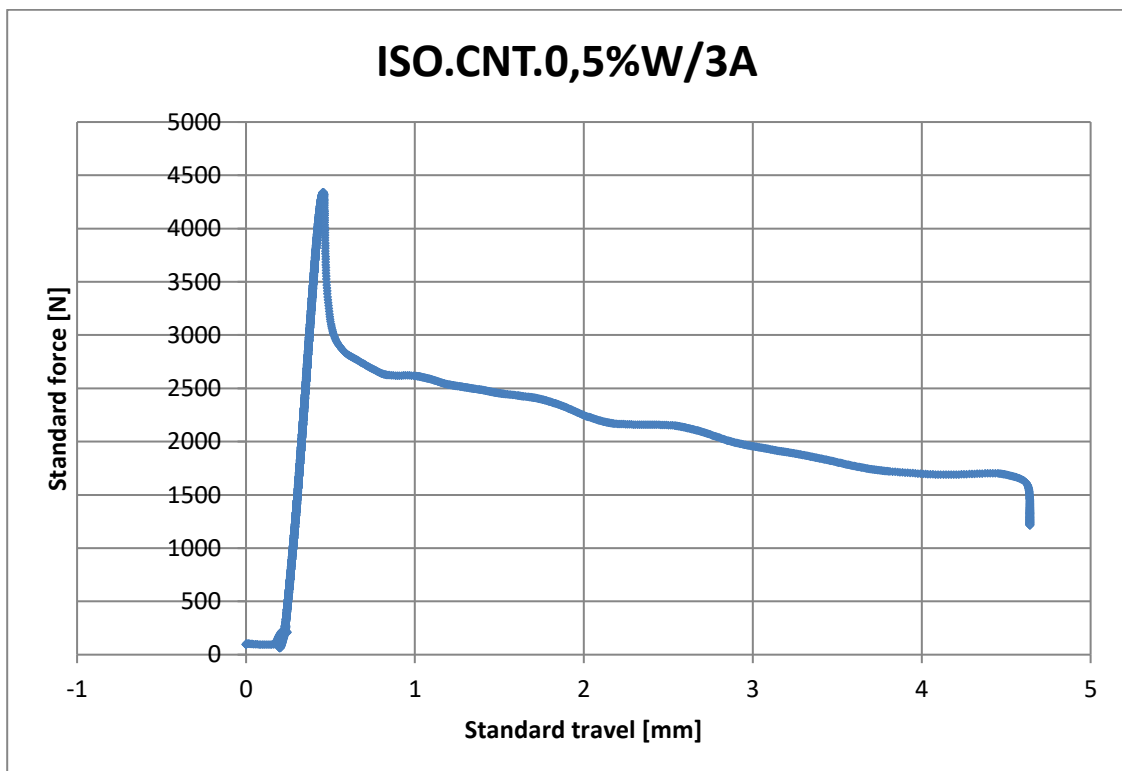


Grafico 3.28: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,5%W/3A.

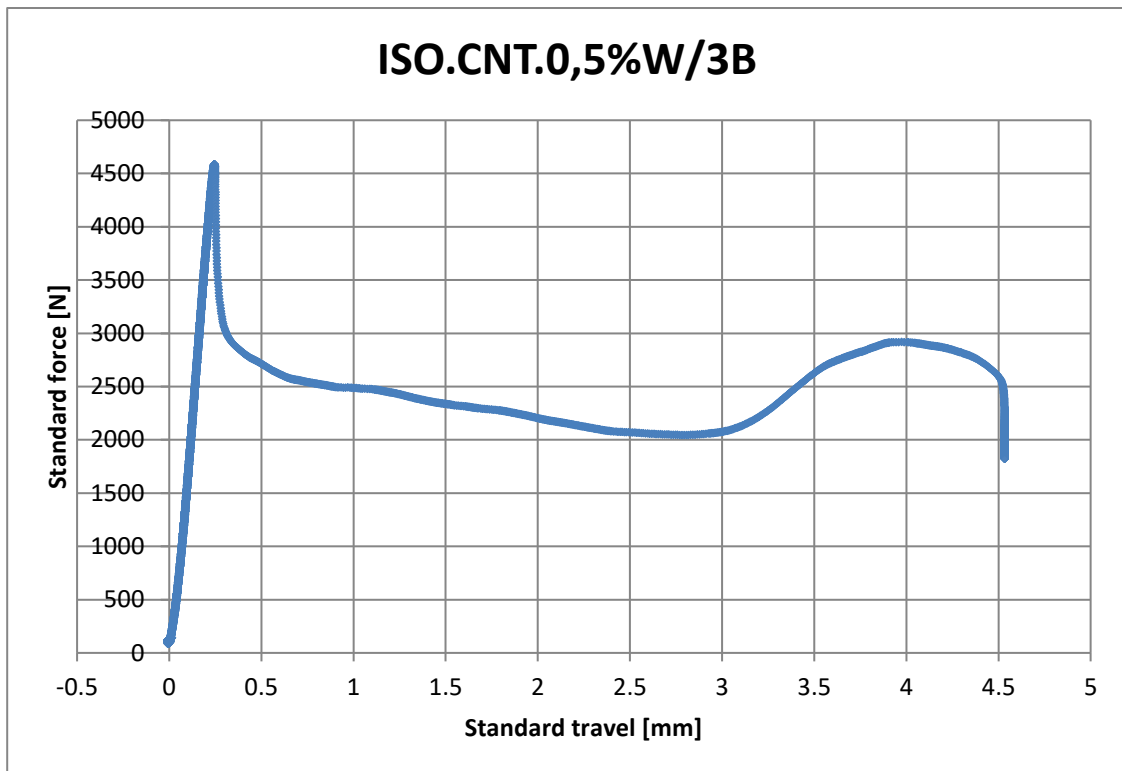


Grafico 3.29: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.0,5%W/3B.

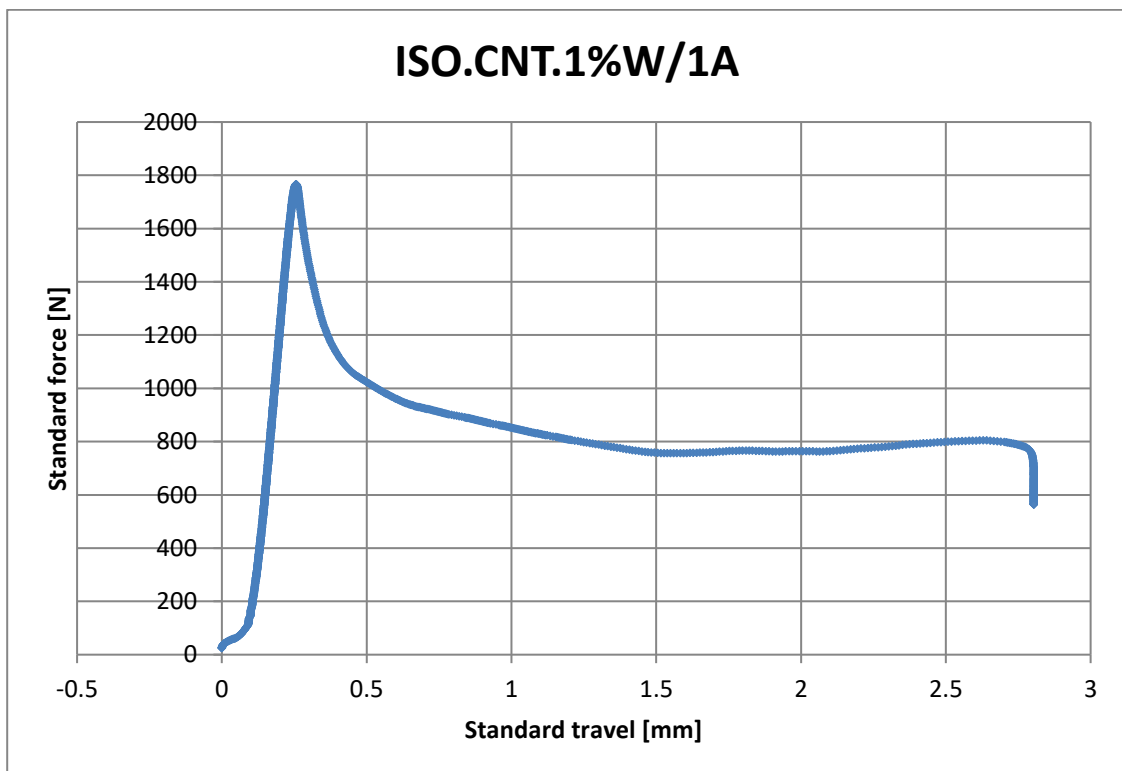


Grafico 3.30: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.1%W/1A.

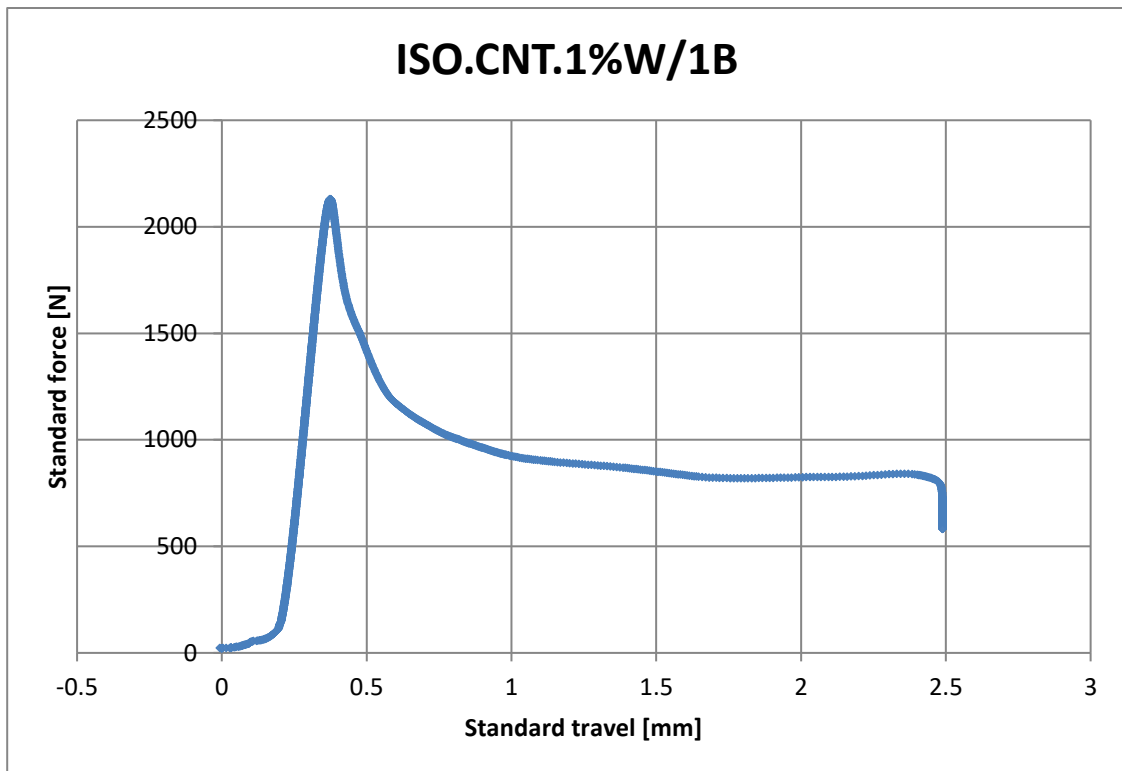


Grafico 3.31: andamento “forza-spostamento” nella prova di compressione del campione ISO.CNT.1%W/1B.

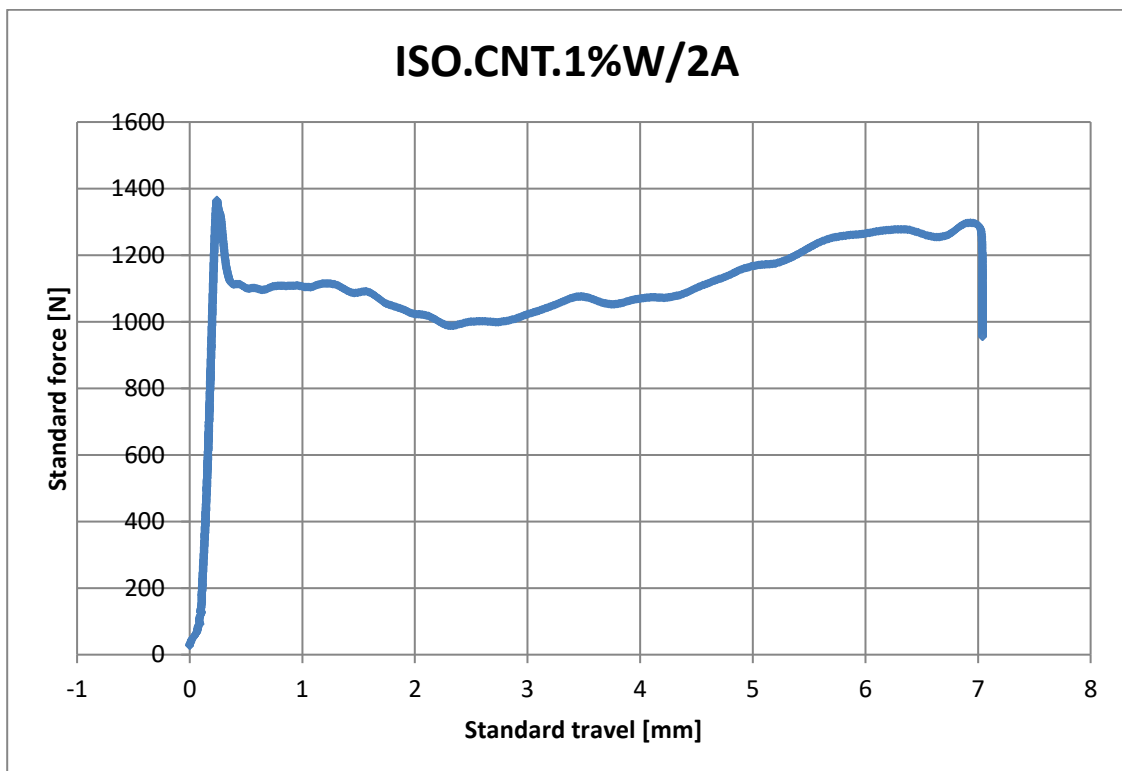


Grafico 3.32: andamento “forza-spostamento” nella prova di compressione del campione ISO.CNT.1%W/2A.

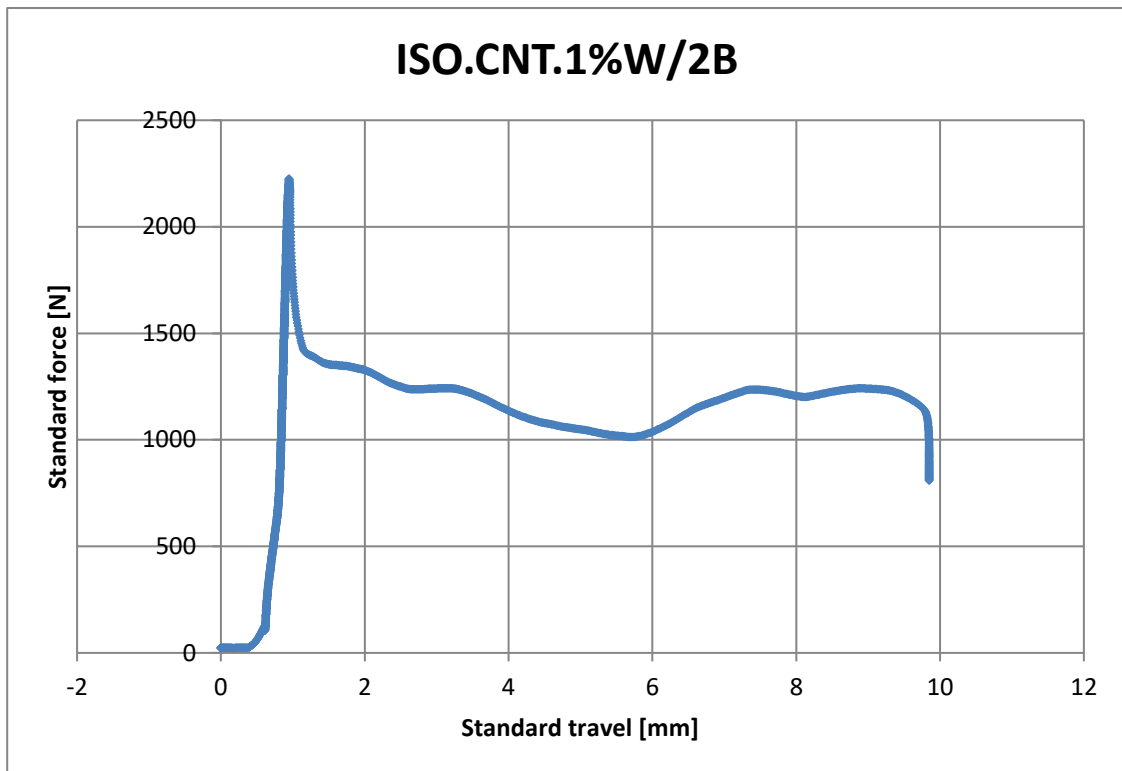


Grafico 3.33: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.1%W/2B.

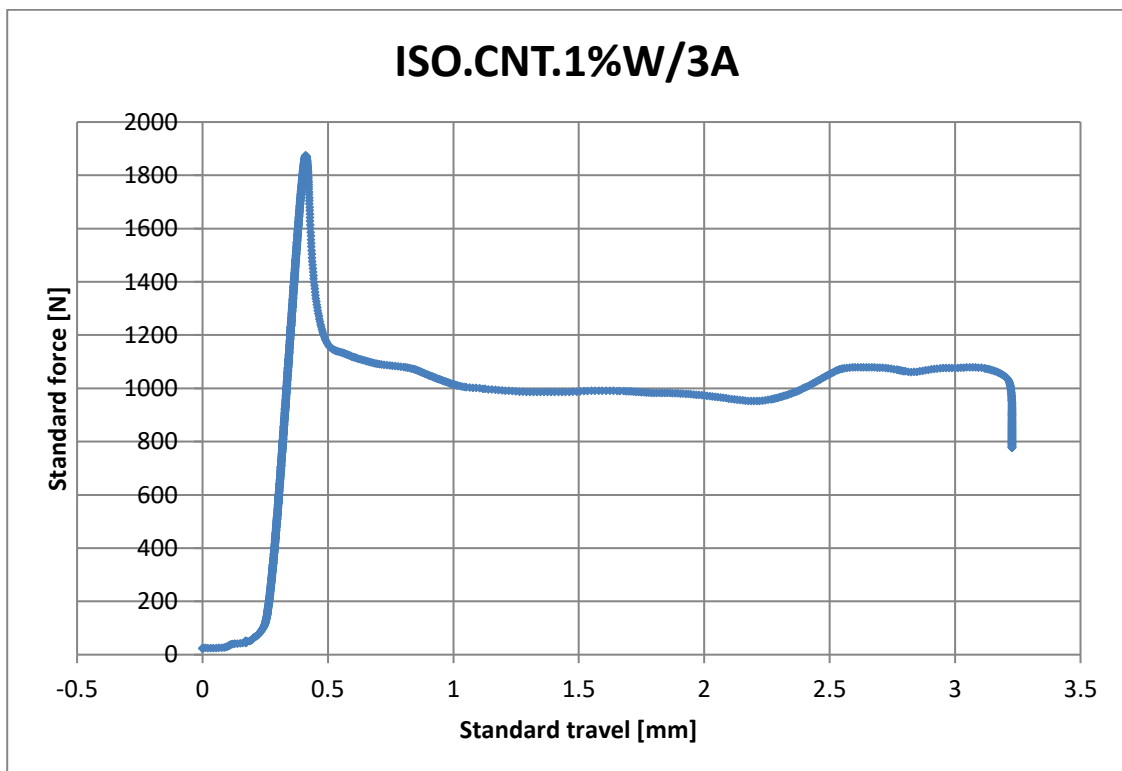


Grafico 3.34: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.1%W/3A.

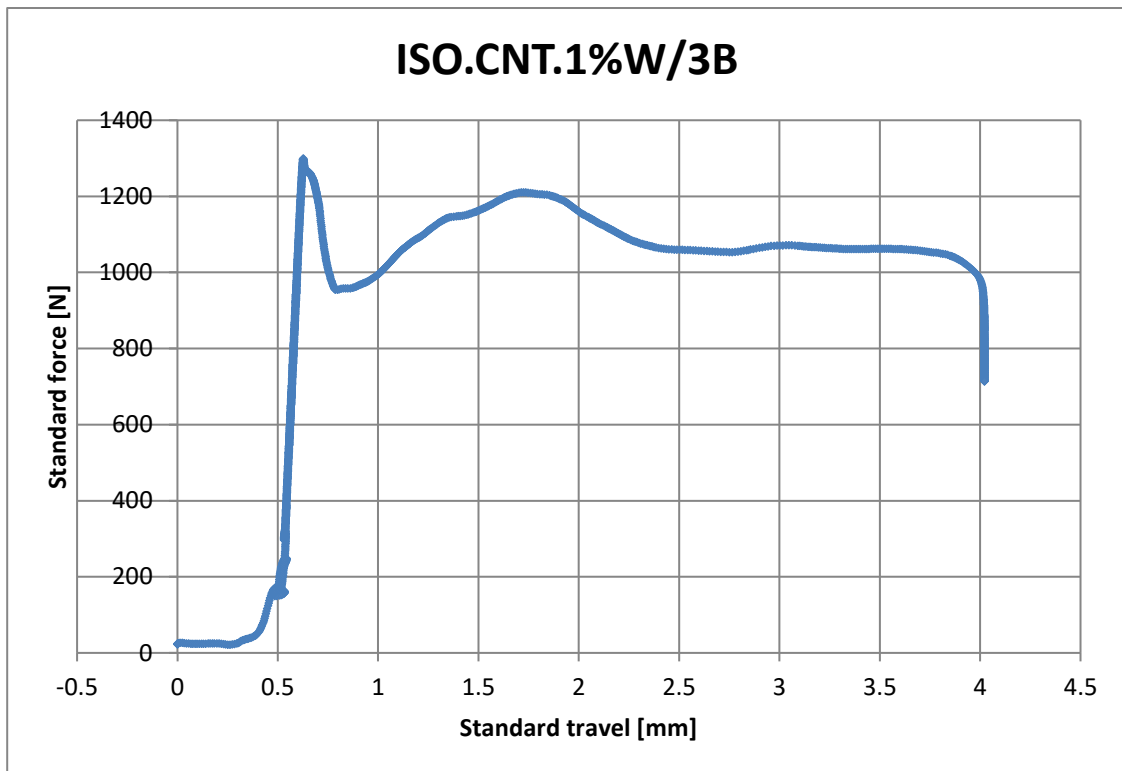


Grafico 3.35: andamento "forza-spostamento" nella prova di compressione del campione ISO.CNT.1%W/3B.

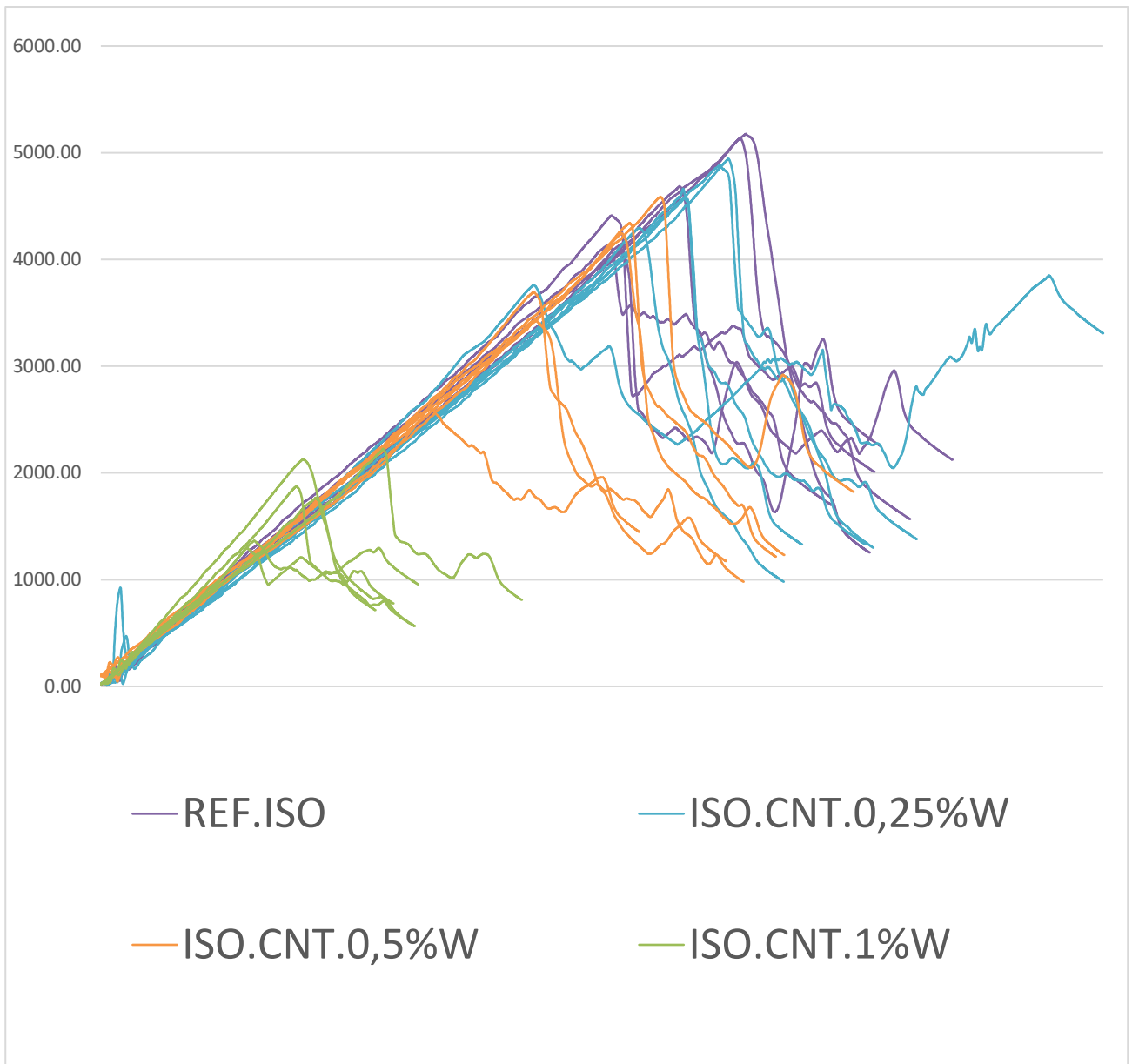


Grafico 3.36: confronto tra diagrammi "forza-spostamento" dei 24 campioni nella prova di compressione.

Nella seguente tabella sono riassunti i risultati della prova di compressione, dove:

- S_0 , è l'impronta di carico del macchinario [mm^2];
- F_{max} , è la forza massima di compressione [N] applicata dal macchinario, corrispondente alla rottura per compressione del provino;
- dL a F_{max} , è l'abbassamento verticale del provino [mm] corrispondente al carico F_{max} ;
- R_c , è la pressione di rottura per compressione del provino data dal rapporto tra F_{max} ed S_0 , ovvero la sua resistenza a compressione [MPa].

sigla	S_0	F_{max}	R_c	dL at F_{max}
[-]	[mm^2]	[N]	[MPa]	[mm]
REF.ISO/1A	1600.00	4087.23	2.55	0.41
REF.ISO/1B	1600.00	4414.33	2.76	0.94
REF.ISO/2A	1600.00	4139.56	2.59	0.39
REF.ISO/2B	1600.00	5176.94	3.24	1.13
REF.ISO/3A	1600.00	5138.35	3.21	0.76
REF.ISO/3B	1600.00	4687.69	2.93	1.01
ISO.CNT.0,25%w/1A	1600.00	4945.47	3.09	1.42
ISO.CNT.0,25%w/1B	1600.00	4882.68	3.05	1.22
ISO.CNT.0,25%w/2A	1600.00	4663.64	2.91	1.46
ISO.CNT.0,25%w/2B	1600.00	4299.47	2.69	0.50
ISO.CNT.0,25%w/3A	1600.00	3852.06	2.41	15.16
ISO.CNT.0,25%w/3B	1600.00	4577.50	2.86	0.40
ISO.CNT.0,5%w/1A	1600.00	3695.85	2.31	0.74
ISO.CNT.0,5%w/1B	1600.00	3439.34	2.15	0.24
ISO.CNT.0,5%w/2A	1600.00	2595.07	1.62	0.20
ISO.CNT.0,5%w/2B	1600.00	4245.58	2.65	0.60
ISO.CNT.0,5%w/3A	1600.00	4342.19	2.71	0.46
ISO.CNT.0,5%w/3B	1600.00	4589.00	2.87	0.25
ISO.CNT.1%W/1A	1600.00	1766.27	1.10	0.26
ISO.CNT.1%W/1B	1600.00	2130.94	1.33	0.37
ISO.CNT.1%W/2A	1600.00	1365.95	0.85	0.24
ISO.CNT.1%W/2B	1600.00	2226.03	1.39	0.95
ISO.CNT.1%W/3A	1600.00	1874.47	1.17	0.41
ISO.CNT.1%W/3B	1600.00	1299.58	0.81	0.63

Tab. 3.3: risultati prove di compressione.

Come nella resistenza a flessione, per poter meglio interpretare i risultati di cui sopra, ma soprattutto per poterli confrontare con altri presenti in letteratura, è necessario riferirli ad un valore di densità preciso, ovvero quello relativo al giorno delle prove; nella seguente tabella viene fatto ciò, mediando i valori di densità ed R_c per ogni impasto e calcolandone lo scarto quadratico medio:

sigla	densità giorno prove	densità media	densità sqm	R_c	R_c medio	R_c sqm
[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
REF.ISO/1A	814.4	828.1	24.60	2.55	2.88	0.27
REF.ISO/1B	814.4			2.76		
REF.ISO/2A	862.6			2.59		
REF.ISO/2B	862.6			3.24		
REF.ISO/3A	807.2			3.21		
REF.ISO/3B	807.2			2.93		
ISO.CNT.0,25%w/1A	801.5	780.1	16.93	3.09	2.84	0.23
ISO.CNT.0,25%w/1B	801.5			3.05		
ISO.CNT.0,25%w/2A	778.6			2.91		
ISO.CNT.0,25%w/2B	778.6			2.69		
ISO.CNT.0,25%w/3A	760.1			2.41		
ISO.CNT.0,25%w/3B	760.1			2.86		
ISO.CNT.0,5%w/1A	794.7	827.5	26.46	2.31	2.39	0.42
ISO.CNT.0,5%w/1B	794.7			2.15		
ISO.CNT.0,5%w/2A	828.4			1.62		
ISO.CNT.0,5%w/2B	828.4			2.65		
ISO.CNT.0,5%w/3A	859.5			2.71		
ISO.CNT.0,5%w/3B	859.5			2.87		
ISO.CNT.1%W/1A	840.5	802.5	32.32	1.10	1.11	0.22
ISO.CNT.1%W/1B	840.5			1.33		
ISO.CNT.1%W/2A	805.5			0.85		
ISO.CNT.1%W/2B	805.5			1.39		
ISO.CNT.1%W/3A	761.5			1.17		
ISO.CNT.1%W/3B	761.5			0.81		

Tab. 3.4: correlazione densità-resistenza a compressione nelle prove di compressione.

Infine, noti i valori di densità media al giorno delle prove, γ_i , e la resistenza a compressione $R_{c,i}$ media per ogni impasto, è stato possibile stimare il modulo elastico E_i dalla seguente formula:

$$E_i = 3000 \sqrt{g \cdot \gamma_i \cdot R_{c,i}}$$

adatta per deformazioni di lunga durata come quelle relative alle prove eseguite nel presente lavoro di tesi.

A questo punto, dalla legge di Hooke, noto il modulo elastico E_i e σ_{\max} medio relativo ad ogni impasto, è stato possibile stimare la deformazione ultima, $\varepsilon_{u,i}$, dalla seguente formula:

$$\varepsilon_{u,i} = \frac{\sigma_{\max,media-i}}{E_i}$$

I risultati così ottenuti vengono riportati nella seguente tabella:

sigla	γ media	Rc medio	E medio	σ_{\max} medio	ε_u medio
[-]	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]
REF.ISO/1	828.1	2.88	14.51	0.37	0.026
REF.ISO/2					
REF.ISO/3					
ISO.CNT.0,25%w/1	780.1	2.84	13.99	0.18	0.013
ISO.CNT.0,25%w/2					
ISO.CNT.0,25%w/3					
ISO.CNT.0,5%w/1	827.5	2.39	13.21	0.22	0.016
ISO.CNT.0,5%w/2					
ISO.CNT.0,5%w/3					
ISO.CNT.1%w/1	802.5	1.11	8.87	0.24	0.027
ISO.CNT.1%w/2					
ISO.CNT.1%w/3					

Tab. 3.5: riassunto parametri meccanici provini.

Al termine di ogni prova di compressione sono stati raccolti con cura in un apposito contenitore tutti i residui del provino i-esimo testato per procedere successivamente con l'essiccazione in forno a 100°C per un giorno.

Al termine di ciò ogni provino è stato pesato per ricavarne il peso secco [gr] e successivamente, grazie al volume misurato il giorno delle prove, la densità secca [kg/m³].

Sono riportate in seguito le immagini relative ai residui raccolti dei provini post-compressione e del forno:



Fig. 3.17: sacchetti con residui dei campioni post prove di compressione.



Fig. 3.18: forno per l'essiccazione dei provini.

3.3 – Confronto fra densità

Nella seguente tabella vengono riportati i pesi [gr] dei 12 campioni prismatici misurati:

- allo scassero, ovvero alla fine del secondo giorno di maturazione prima dell’inserimento in acqua;
- il giorno delle prove, ovvero dopo una settimana di maturazione;
- dopo essere stati essiccati in forno a 100°C per un giorno, ovvero dopo la prova di compressione; nello specifico questo valore è dato dalla somma dei pesi dei residui delle 2 “metà” di ogni provino.

numero provino	sigla	peso allo scassero [gr]	peso giorno prove [gr]	peso secco [gr]
1	REF.ISO/1	193,48	209,53	163,67
2	REF.ISO/2	208,88	225,23	178,62
3	REF.ISO/3	193,79	209,74	161,95
5	ISO.CNT.0,25%w/1	199,66	208,64	156,85
6	ISO.CNT.0,25%w/2	193,19	201,43	154,03
7	ISO.CNT.0,25%w/3	191,51	200,82	152,71
9	ISO.CNT.0,5%w/1	198,79	205,51	158,28
10	ISO.CNT.0,5%w/2	208,85	215,63	161,33
11	ISO.CNT.0,5%w/3	217,45	225,02	165,19
13	ISO.CNT.1%w/1	204,90	217,06	152,35
14	ISO.CNT.1%w/2	203,71	209,43	145,35
15	ISO.CNT.1%w/3	190,02	197,63	140,91

Tab. 3.6: confronto tra pesi.

Nella seguente tabella, facendo riferimento ai pesi sopra indicati ed al volume misurato il giorno delle prove, vengono riportate le densità [kg/m³] dei campioni nei vari step della loro vita, ovvero:

- la densità fresca, ρ_f , calcolata per ogni impasto come descritto nel paragrafo del *mix design*;
- la densità allo scassero;
- la densità al giorno delle prove;
- la densità secca, ρ_s .

Infine viene riportata la “perdita % di densità secca-fresca”, $\% \Delta \rho_{s-f}$, espressa dalla seguente formula:

$$\% \Delta \rho_{s-f} = \frac{\rho_f - \rho_s}{\rho_f} \cdot 100$$

numero provino	sigla	volume misurato [cm ³]	densità fresca [kg/m ³]	densità allo scassero [kg/m ³]	densità giorno prove [kg/m ³]	densità secca [kg/m ³]	perdita % di densità secca-fresca [%]
1	REF.ISO/1	257,3	720,5	752,0	814,4	636,1	11,7
2	REF.ISO/2	261,1	720,5	800,0	862,6	684,1	5,1
3	REF.ISO/3	259,8	720,5	745,9	807,2	623,4	13,5
5	ISO.CNT.0,25%w/1	260,3	707,6	767,0	801,5	602,6	14,8
6	ISO.CNT.0,25%w/2	258,7	707,6	746,8	778,6	595,4	15,9
7	ISO.CNT.0,25%w/3	264,2	707,6	724,9	760,1	578,0	18,3
9	ISO.CNT.0,5%w/1	258,6	711,2	768,7	794,7	612,1	13,9
10	ISO.CNT.0,5%w/2	260,3	711,2	802,3	828,4	619,8	12,9
11	ISO.CNT.0,5%w/3	261,8	711,2	830,6	859,5	631,0	11,3
13	ISO.CNT.1%w/1	258,2	732,8	793,6	840,5	590,0	19,5
14	ISO.CNT.1%w/2	260,0	732,8	783,5	805,5	559,0	23,7
15	ISO.CNT.1%w/3	259,5	732,8	732,3	761,5	543,0	25,9

Tab. 3.7: confronto tra densità.

4 – Conclusioni

Dalle prove meccaniche eseguite sui provini di LWFC e dall'attività di *mix design* eseguita in laboratorio è stato possibile osservare che:

- i provini bianchi, REF.ISO, hanno proprietà meccaniche di resistenza a flessione, resistenza a compressione e modulo elastico in linea con quanto presente in letteratura alle medesime densità e condizioni di maturazione; pertanto rappresentano una corretta base di partenza per il confronto con gli altri campioni del presente lavoro di *mix design*;
- la resistenza a compressione diminuisce all'aumentare di CNT dispersi in acqua, infatti R_c è massimo nei campioni bianchi (REF.ISO), rimane circa costante in quelli con concentrazione di 0,25% in peso (ISO.CNT.0,25%w) ed è più che dimezzato in quelli con l'1% (ISO.CNT.0,25%w);
- la resistenza a flessione risulta dimezzata rispetto a quella dei provini bianchi già con lo 0,25 e 0,5% in peso di CNT, diminuendo ulteriormente all'1%; tuttavia in corrispondenza dello 0,5% risulta massima la riserva plastica dei campioni, arrivando ad avere la massima ampiezza registrata della fessura.

In conclusione, la resistenza meccanica, sia a flessione che a compressione, risulta globalmente peggiorata all'aumentare di CNT nell'impasto, pertanto non sembra essere giustificata la loro aggiunta nel *range* 0,25-1% con dispersione in acqua.

Purtroppo, avendo voluto mantenere la densità fresca prossima a quella *target* ed un rapporto $a/c = 0,36$, non è stato possibile realizzare impasti con % in peso di nanoparticelle maggiori allo 0,108% disperse nella schiuma, in quanto quest'ultima è risultata instabile, faticando a formarsi e collassando quasi istantaneamente; pertanto non è stato possibile fare un confronto diretto con i provini realizzati mediante dispersione dei CNT in schiuma, ovvero gli ISO.CNT.0,108%f e gli ISO.CNT.0,25%f, in quanto i primi contengono un quantitativo minore di nanoparticelle rispetto a quelli con dispersione in acqua, mentre i secondi poichè sono risultati avere una densità fresca di troppo inferiore a quella *target* (circa il 40% in meno).

Va comunque precisato che i campioni ISO.CNT.0,108%f hanno dimostrato caratteristiche di resistenza a compressione ed a flessione, seppur di poco, superiori a quelle degli ISO.CEM, pertanto sarebbe interessante poter indagare concentrazioni inferiori allo 0,25%, ovvero 0,05-0,1% in peso di CNT; in questo *range* risulterebbe possibile disperdere le medesime percentuali in peso

in entrambe le fasi, acqua e schiuma, potendo avere in questo modo un confronto diretto e preciso per stabilire quale delle due sia la migliore.

Volendo infine fare una considerazione di carattere economico, il costo dei carbo-nanotubi si aggira sui 45 €/kg, pertanto aggiunte apparentemente benefiche nell'ordine dello 0,1% in peso rispetto al cemento comporterebbero un aumento della spesa di circa 20 €/m³ per la produzione di un calcestruzzo schiumato di densità simile a quella indagata nel presente lavoro di tesi.

Durante la preparazione dei provini è stato constatato che tutti gli impasti tendono a mantenere la propria forma allo stato fresco, sotto la sola azione del peso proprio, risultando essere dei calcestruzzi “stampabili” (o estrudibili), pertanto si può affermare che i CNT non influenzano negativamente l'effetto del viscosizzante adoperato nel *mix design*; questo è un aspetto di grande interesse pratico, poichè in talune applicazioni potrebbe limitare l'utilizzo delle casseforme riducendo tempi e costi di produzione.

5 – Bibliografia

- [1] - A. Demartino, *Calcestruzzi leggeri strutturali, Strumenti Ambiente Territorio Edilizia Urbanistica*, Maggioli Editore, 1998.
- [2] - UNICEMENTO, UNI 7548-1: *Calcestruzzo leggero con argilla o scisti espansi. Definizione e classificazione*, Milano, 1992.
- [3] - D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi, E. Gugliandolo, *Experimental investigation on the compressive strength of foamed concrete: Effect of curing conditions, cement type, foaming agent and dry density*, 2017.
- [4] - Y.H. Mugahed Amran, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, M.H.R. Khudhair, F. Hejazi, A. Alaskar, F. Alrshoudi, A. Siddika, *Performance properties of structural fibred-foamed concrete*, 2020.
- [5] - D. Meyer, *Foamed cementitious materials*, student paper, ETH Zurich Research Collection, 2004.
- [6] - Allied Foam Tech Corp., Montgomeryville, *Lightweight cement/concrete*, manuale tecnico, 2014.
- [7] - K. Ramamurthy, E.K. Kunhanandan Nambiar, G. Indu Siva Ranjani, *A classification of studies on properties of foam concrete*, 2009.
- [8] - D. Falliano, *Calcestruzzi schiumati estrudibili: le proprietà e le potenzialità di un materiale da costruzione innovativo*, 2018.
- [9] - C.T. Tam, T.Y. Lim, R. Sri Ravindrarajah, S.L. Lee, *Relationship between strength and volumetric composition of moist-cured cellular concrete*, Magazine of Concrete Research, 1987.
- [10] - D.K. Panesar, *Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents*, Construction and building materials, 2013.
- [11] - K. Ramamurthy, E.K. Nambiar, G.I.S. Ranjani, *A classification of studies on properties of foam concrete*, Cement and Concrete Composites, 2009.
- [12] - D. Falliano, L. Restuccia, E. Gugliandolo, *A simple optimized foam generator and a study on peculiar aspects concerning foams and foamed concrete*, 2020.

- [13] - A. Just, B. Middendorf, *Microstructure of high-strength foam concrete*, 2008.
- [14] - W. Hanselmann, E. Windhab, *Flow characteristic and modelling of foam generation in a continuous Rotor/Stator mixer*, Journal of food engineering, 1999.
- [15] - V. Khanna, V. Kumar, S. A. Bansal, *Mechanical properties of aluminium-graphene/carbon nanotubes (CNTs) metal matrix composites: Advancement, opportunities and perspective*, 2020.
- [16] - L. Hou, J. Li, Z. Lu, Y. Niu, J. Jiang, T. Li, *Effect of nanoparticles on foaming agent and the foamed concrete*, 2019.
- [17] - D. Zhang, R. Liang, H. Yang, Y. Song, L. Yang, C. Zhang, A. Liu, *Formation of helical polyphenyl nanostructures on carbon nanotubes*, 2020.
- [18] - J. Luo, D. Hou, Q. Li, C. Wu, C. Zhang, *Comprehensive performances of carbon nanotube reinforced foam concrete with tetraethyl orthosilicate impregnation*, 2016.
- [19] - S. Chuah, Z. Pan, J. G. Sanjayan, C. M. Wang, W. H. Duan, *Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide*, 2014.
- [20] - D. Falliano, D. De Domenico, G. Ricciardi, E. Gugliandolo, *Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density*, 2018.
- [21] - D. Falliano, L. Restuccia, G. A. Ferro, E. Gugliandolo, *Strategies to increase the compressive strength of ultra-lightweight foamed concrete Author links open overlay panel*, 2020.
- [22] - K.-J. Byun, H.-W. Song, S.-S. Park, *Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent*.