Università Politecnica delle Marche

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

Dipartimento Ingegneria Civile, Edile e dell'Architettura

VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE DI CONGLOMERATO BITUMINOSO RICICLATO A FREDDO REALIZZATO CON DIVERSE TIPOLOGIE DI EMULSIONI BITUMINOSE

EVALUATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COLD RECYCLED BITUMINOUS CONGLOMERATE MADE WITH DIFFERENT TYPES OF BITUMINOUS EMULSIONS

TESI DI LAUREA DI

Claudia Di Basilico

RELATORE

Prof. Ing. Maurizio Bocci

Anno Accademico 2018-2019

Sommario

Introduzione 5

Capitolo 1 - Riciclaggio del conglomerato bituminoso 6

1.1 La pavimentazione stradale 6

1.2 Degrado e manutenzione 9

1.3 Tecniche di riciclaggio 9

1.3.1 Riciclaggio a caldo 10

1.3.2 Riciclaggio a freddo in impianto e in situ 10

1.4 Emulsioni bituminose 15

1.5 Requisiti di capitolato 17

Capitolo 2 – Programma sperimentale 20

2.1 Piano sperimentale 20

2.2.1 Rap 22

2.2.2 Sabbia calcarea 25

2.2.3 Filler di recupero 27

2.2.4 Emulsioni bituminose 28

2.3 Procedure di laboratorio 30

2.3.1 Analisi granulometrica 31

2.3.2 Picnometro 33

2.3.3 Preparazione dei provini 39

2.3.4 Determinazione delle proprietà volumetriche 50

2.3.5 Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26) 53

2.3.6 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23) 61

Capitolo 3 – Risultati sperimentali 65

3.1 Elaborazione dati del picnometro 65

3.2 Elaborazione delle proprietà volumetriche 68

3.3 Mix Design miscele a freddo 68

3.4 Miscela CM 3,5%, filler 3% 73

3.4.1 Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in aria, [provino CM1] 74

3.4.2 Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM2] . 76

3.4.3 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in aria, [provino CM3] 79

3.4.4 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM4] . 81

3.4.5 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in aria, [provino CM5] .. 84

3.4.6 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM6] 86

3.5 Miscela MC 3,5%, filler 3% 89

3.5.1 Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in aria, [provino MC1] 89

3.5.2 Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino MC2] . 92

3.5.3 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in aria, [provino MC3] 94

3.5.4 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM4] . 97

3.5.5 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in aria, [provino MC5] .. 99

3.5.6 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino MC6] 102

3.6 Miscela CM 4%, filler 3% 104

3.6.1 Maturazione a 3 giorni 104

3.6.2 Maturazione a 7 giorni 107

3.6.3 Maturazione a 14 giorni 109

3.7 Miscela CM 4%, filler 3,5% 114

3.7.1 Maturazione a 3 giorni 114

3.7.2 Maturazione a 7 giorni 117

3.7.3 Maturazione a 14 giorni 119

3.8 Miscela CM 4,5%, filler 3% 122

3.8.1 Maturazione a 3 giorni 122

3.8.2 Maturazione a 7 giorni 124

3.8.3 Maturazione a 14 giorni 127

3.9 Miscela CM 4,5%, filler 4% 129

3.9.1 Maturazione a 3 giorni 130

3.9.2 Maturazione a 7 giorni 132

3.9.3 Maturazione a 14 giorni 135

3.10 Riassunto di tutte le miscele e capitolato 138

Conclusioni 153

Bibliografia e Sitografia 155

Introduzione

Le pavimentazioni stradali sono opere che nel corso degli ultimi decenni hanno avuto uno sviluppo notevole. Il corpo stradale è costituito da un insieme di strati sovrapposti, di materiali e di spessori diversi aventi funzione di sopportare complessivamente le azioni indotte dal traffico e di trasmetterle e distribuirle, opportunamente al terreno di appoggio o ad altre strutture. Il trasporto su strada è aumentato rispetto gli anni passati, in particolare è aumentato il traffico dei veicoli pesanti, accentuando così il degrado delle pavimentazioni e di conseguenza rendono inevitabili gli interventi di manutenzione. Le pavimentazioni stradali devono rispettare una serie di caratteristiche tali da garantire condizioni di confortevolezza e di sicurezza della circolazione stradale. La capacità di una pavimentazione di resistere alle sollecitazioni dei carichi e ambientali, determina la durabilità della pavimentazione. Quando una di queste funzioni viene meno sono necessari interventi di ripristino e manutenzione. Tali interventi devono essere eseguiti frequentemente perché, nel caso in cui non si intervenga tempestivamente, i fenomeni di degrado potrebbero interessare l'intero pacchetto stradale e quindi comportare l'asportazione e il rifacimento della rete. Da questo procedimento deriva una grande quantità di conglomerato bituminoso, che può essere riutilizzato per la costruzione della nuova pavimentazione. Tale processo è noto come riciclaggio del conglomerato bituminoso, detto anche fresato, il quale presenta aspetti positivi come vantaggi economici e ambientali. Nella presente tesi, il conglomerato bituminoso realizzato a freddo è studiato per strati di base. Successivamente verranno presentate varie miscele in cui verranno valutati due aspetti: la differenza delle caratteristiche meccaniche della miscela utilizzando prima emulsione bituminosa modifica e poi emulsione bituminosa non modificata con le stesse percentuali di emulsione e di filler; come secondo aspetto si valutano i cambiamenti delle caratteristiche meccaniche delle miscele al variare del quantitativo di emulsione e di filler, mediante prove di modulo a trazione indiretta (NAT) e di rigidezza tramite le prove di trazione indiretta. Infine, verranno eseguite delle prove per la determinazione delle proprietà volumetriche delle miscele prodotte, con lo scopo di valutare i vuoti presenti nel provino. Tale ricerca riporta studi sperimentali effettuati all’interno del Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile Architettura della Facoltà di Ingegneria dell’Università Politecnica delle Marche.

Capitolo 1 - Riciclaggio del conglomerato bituminoso

Nel settore delle pavimentazioni stradali col termine "riciclare", si intende qualsiasi possibilità di recuperare e riutilizzare il materiale fresato, per la produzione di un nuovo conglomerato bituminoso. In questo capitolo sarà illustrato il tema del riciclaggio dei leganti bituminosi, nello specifico delle miscele derivanti da riciclaggio a freddo. Il riciclaggio delle pavimentazioni stradali ha inizio in Italia all'incirca negli anni '70, grazie alla fresatura degli strati superficiali. Le motivazioni che spingono verso questa direzione, sono molteplici in quanto si ha una riduzione dell'impiego di materie prime vergini; riduzione dei territori da destinare a discarica; limitazione dell'inquinamento del suolo e dell'atmosfera, derivante dal trasporto e dall'incenerimento dei rifiuti; conservazione dell'energia; vantaggi economici e infine vantaggi tecnici.

1.1 La pavimentazione stradale

La pavimentazione stradale è per definizione quella struttura sovrastante un rilevato o il terreno in sito nelle trincee, atta a garantire la transitabilità del traffico veicolare, con lo scopo di assolvere a diverse funzioni. Essa è costituita da vari strati di diverso spessore ottenuti con miscele differenti, ogni strato ha una sua funzione e una corretta composizione. Gli strati più superficiali devono garantire regolarità, aderenza e minima rumorosità assicurando condizioni di sicurezza e comfort ai veicoli. Vi sono, invece, gli strati in profondità che hanno la funzione di sopportare i carichi veicolari e distribuirli riducendone l'intensità. Le miscele, con cui vengono realizzati gli strati, possono essere costituite da materiali granulari, i quali comprendono pietrisco e ghiaia e trasmettono i carichi applicati in profondità, o materiali legati che generano, al di sotto dell'impronta di carico, sollecitazioni di trazione nella metà inferiore dello strato e di compressione nella metà superiore. Le miscele utilizzate per le pavimentazioni sono le seguenti:

• *misto granulare,* costituito da una miscela non legata di aggregati ottenuti mediante trattamento di materiali naturali, artificiali o riciclati. Nella sovrastruttura stradale il misto granulare è impiegato per la costruzione di strati di fondazione;

• *misti cementati,* è un materiale ottenuto dalla miscelazione di misto granulare con cemento, utilizzabile come strato di fondazione nelle pavimentazioni stradali di tipo semirigido ed in

tutte le condizioni strutturali in cui si vuole incrementare notevolmente la capacità portante dello strato di fondazione su cui poggeranno i conglomerati bituminosi;

• *conglomerati bituminosi*, miscele composte da aggregati (materiali rocciosi di diversa granulometria) e leganti.

Le miscele di conglomerato bituminoso possono presentare caratteristiche fisiche e meccaniche molto differenti a seconda della granulometria e della qualità dell'inerte e quantità di legante.

I tre elementi principali della pavimentazione stradale sono: il manto, la struttura ed il sottofondo.

Il *manto* è lo strato più superficiale della pavimentazione e quindi deve essere dotato di resistenza notevole e caratteristiche geometriche perfette in quanto rappresenta il primo contatto con il carico; i materiali utilizzati dovranno pertanto avere delle formulazioni compositive specifiche, che non solo assolvano alle funzioni richieste, ma le mantengano elevate nel tempo. Inoltre, il manto, rappresenta una protezione di tutta la struttura della pavimentazione, in particolare nei confronti di due elementi: l'elemento traffico e l'elemento ambiente.

La *struttura* permette il trasferimento del carico dal manto al sottofondo. Anch'essa è composta da vari strati, con materiali e caratteristiche di resistenza differenti. Ogni strato riceve un carico dallo strato sovrastante, e lo diffonde su un'area più ampia della parte sottostante. La struttura è composta a sua volta da materiali granulari e da materiali legati: i primi, comprendenti pietrisco e ghiaia, trasferiscono i carichi applicati attraverso i singoli granuli; i materiali legati invece, che includono i materiali stabilizzati e l'asfalto, hanno il compito di ricevere i carichi verticali, che generano sollecitazioni di flessione, a causa del continuo passaggio di veicoli, con conseguente rottura a fatica.

Il *sottofondo* è costituito da terreno naturale, alla base del corpo stradale; le caratteristiche intrinseche dei materiali utilizzati, determinano una maggiore o minore resistenza del sottofondo stesso, influenzando la scelta del tipo di struttura sovrastante da adottare, che dovrà garantire una distribuzione del carico tale da non causare deformazioni permanenti.

Analizzando più in dettaglio gli strati che costituiscono una pavimentazione, possiamo distinguere: uno strato di usura, in conglomerato bituminoso; uno strato di collegamento, in conglomerato bituminoso, denominato "*binder*"; uno strato di base, sempre in conglomerato

bituminoso; uno strato di sottobase in misto cementato, utilizzato solamente per strade e autostrade con un volume notevole di traffico pesante; uno strato di fondazione, in misto granulare, stabilizzato meccanicamente (per mezzo di rulli compattatori particolari). Gli spessori dei vari strati possono cambiare, in funzione della tipologia di pavimentazione, che potrà essere flessibile, semi-rigida [Fig. 1.1], o rigida [Fig. 1.2]: in quest'ultimo caso lo strato superficiale è però costituito da conglomerato cementizio e non bituminoso; questo tipo di pavimentazione è per lo più utilizzato per piazzali di sosta aeroportuali.

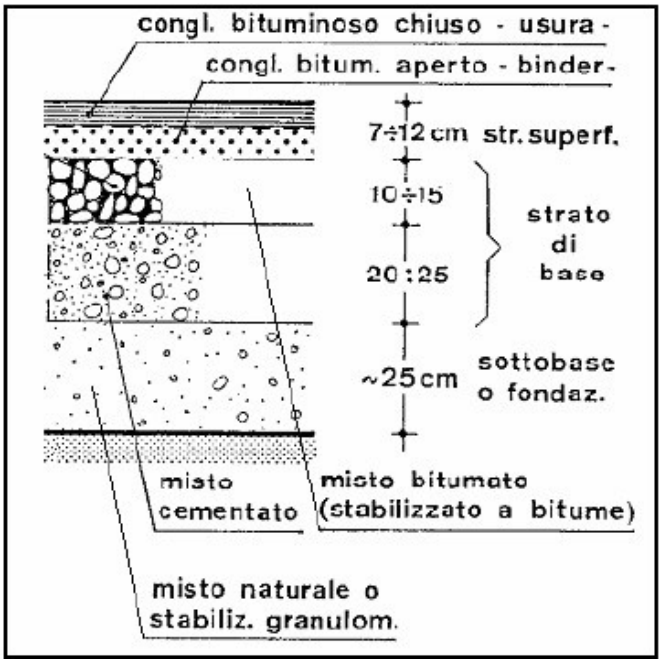


Fig. 1.1: Sovrastruttura stradale flessibile e semirigida

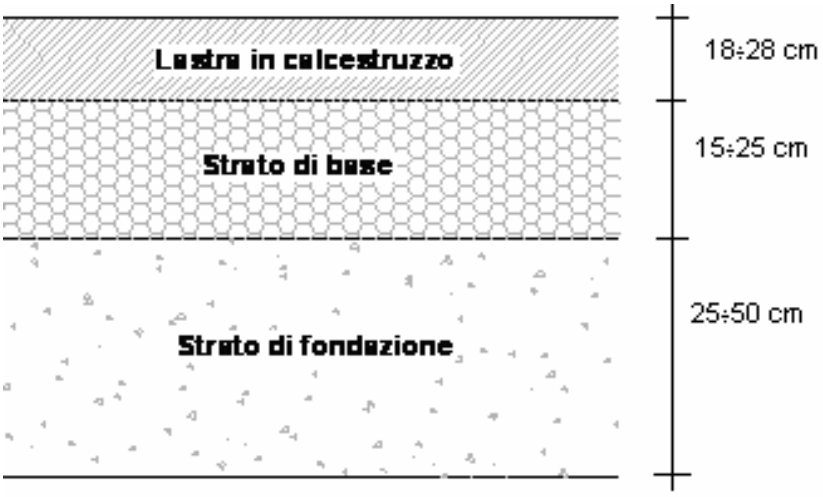


Fig. 1.2: Sovrastruttura stradale rigida

1.2 Degrado e manutenzione

La pavimentazione ha un arco di vita utile nel quale, se progettata in maniera corretta, è capace di mantenere i requisiti prestazionali. In alcuni casi, però, anche durante questo arco di tempo si possono verificare fenomeni di degrado. Tra le cause di degrado della pavimentazione stradale, vanno certamente menzionati i fattori ambientali ed il carico veicolare. I fattori ambientali interessano in prima istanza gli strati più superficiali della pavimentazione: basti pensare a come i raggi ultravioletti favoriscano l'indurimento e l'invecchiamento precoce del bitume, riducendo la propria elasticità; a causa di questo irrigidimento, gli sforzi di compressione e trazione a cui il manto è sottoposto, ne favoriscono la fessurazione, accentuata anche dalle continue contrazioni-dilatazioni termiche. Quando lo strato superficiale perde la propria capacità strutturale, gli strati inferiori sono sottoposti a maggiori aggressioni, soprattutto da parte dell'acqua che penetra dalle fessure, con un conseguente deterioramento, di tipo esponenziale. Un altro aspetto importante è il carico veicolare, il quale incide altrettanto significativamente in questo processo di degrado, in quanto ad ogni transito si genera una deformazione indotta, di tipo temporaneo, sulla pavimentazione, che nel caso di veicolo leggero è del tutto irrilevante, ma che nel caso di veicolo pesante assume un'entità non trascurabile, provocando deformazioni a fatica e fessurazioni. Per quanto riguarda la manutenzione stradale, ha come l'obiettivo quello di mantenere l'infrastruttura in buone condizioni di esercizio, grazie ad una normativa adeguata, leggi, e criteri di gestione economica. È opportuno un continuo monitoraggio della pavimentazione infatti, la tempistica d' intervento è tuttavia fondamentale per un reale risparmio economico. Un continuo monitoraggio della pavimentazione permette quindi di identificare il momento più opportuno per l'intervento, che sia esso un trattamento superficiale, un rinforzo, una ricostruzione parziale o totale, e di stimarne la vita utile residua.

1.3 Tecniche di riciclaggio

Come detto in precedenza, in questi ultimi anni il le infrastrutture hanno avuto uno sviluppo notevole e il trasporto su strada è aumentato, in particolar modo il volume relativo ai veicoli pesanti e il tipo di veicoli. Le tecniche più utilizzate che consentono di rimpiegare il materiale, classificate in funzione della procedura di miscelazione tra gli aggregati vergini e quelli di risulta, sono due:

- *riciclaggio a caldo;*

- *riciclaggio a freddo.*

La scelta del tipo di riciclaggio da eseguire generalmente dipende dalle esigenze e dall' intervento da realizzare nonché dalle possibilità economiche; sia il riciclaggio a caldo che quello a freddo può essere eseguito in impianto fisso che in sito. Il riciclaggio consente un risparmio di risorse non rinnovabili, come aggregati lapidei e bitume, ma anche di tutti i consumi relativi alla loro produzione, come impianti di frantumazione primaria o secondaria. La demolizione delle pavimentazioni non comporta più un consumo di risorse per lo smaltimento del fresato stesso e per la gestione dell'area di discarica: il materiale viene riutilizzato, sia a caldo che a freddo. Le tecniche in situ, inoltre, annullano il trasporto del fresato dal cantiere all'impianto, e conseguentemente del conglomerato dall'impianto al cantiere, permettendo un riutilizzo del materiale fino al 100% nel caso di riciclaggio a freddo. Più nello specifico, in seguito verrà analizzata la tecnica di riciclaggio a freddo.

1.3.1 Riciclaggio a caldo

Il riciclaggio a caldo consiste nell'adottare tutte quelle tecniche atte al riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto di confezionamento della miscela, è sufficientemente riscaldato ad una temperatura di oltre 150° C. Con il riciclaggio a caldo si ottengono miscele costituite da:

- aggregati vergini;
- conglomerato bituminoso di recupero in proporzioni variabili dal 20% al 50%;
- bitume tradizionale o modificato;
- eventuali additivi per riattivare il bitume invecchiato.

1.3.2 Riciclaggio a freddo in impianto e in situ

Il riciclaggio delle pavimentazioni prevede il riutilizzo di quel conglomerato che ha ormai perso le caratteristiche e le funzioni iniziali per le quali era stato destinato. Il "Reclaimed Asphalt Pavement" (RAP), comunemente chiamato fresato, è una miscela di inerti e bitume invecchiato. Il fresato è considerato un rifiuto non pericoloso e rientra in quei materiali da costruzione e demolizione; si tratta di un rifiuto certificato e classificato con codice CER 191302. Il riciclaggio a freddo presenta dei vantaggi che ne fanno un'alternativa sempre più utilizzata di riqualificazione e manutenzione della pavimentazione:

- permette l'utilizzo di un'elevata quantità di RAP (fino al 100% della massa degli aggregati lapidei).
- risparmia l'energia necessaria al riscaldamento degli aggregati e, in caso di riciclaggio *in situ*, al trasporto del materiale all'impianto;
- riduce l'impatto ambientale limitando i fumi emessi dal combustibile bruciato e dall'ossidazione del bitume contenuto nel fresato;
- limita lo sfruttamento delle risorse ambientali per la riduzione dell'attività estrattiva degli aggregati;
- riduce i costi, essendo garantita la medesima durabilità di una pavimentazione costruita con materiali vergini;

Riciclaggio in impianto (continuo e discontinuo)

Per riciclaggio a freddo intendiamo qualsiasi tecnica che permette il riutilizzo del conglomerato bituminoso, in cui l'aggregato lapideo di primo impiego, aggiunto all'atto del confezionamento, non è preventivamente riscaldato, ma aggiunto a temperatura ambiente. Il RAP, ottenuto dalla fresatura della vecchia pavimentazione, viene miscelato con emulsioni bituminose o bitume schiumato, agenti rigeneranti ed eventualmente con inerti vergini, per l'eventuale correzione della curva granulometrica. Il riciclaggio a freddo in impianto fisso, può essere effettuato sia con macchine ed attrezzature specifiche installate in modo permanente, sia con particolari impianti semoventi posti nei cantieri. Inoltre uno dei vantaggi del riciclaggio a freddo, consiste nel non dover ricorrere ad energia termica nei processi di produzione: ciò comporta notevoli vantaggi dal punto di vista economico, energetico ed ambientale.

Anche in questo caso esistono due tipologie di impianto:

- discontinuo;
- continuo.

Nel primo caso il ciclo sarà, per l'appunto, discontinuo, poiché il materiale verrà pesato, e raggiunto un determinato quantitativo, verrà inviato nel ciclo produttivo: la produzione oraria risulterà nettamente inferiore, ma a vantaggio della precisione del dosaggio stesso.

Nel secondo caso, invece, l'alimentazione dell'impianto avverrà in maniera continua, tramite l'immissione su nastri trasportatori degli inerti, in base a volumi prestabiliti: in questo caso la produzione oraria sarà sicuramente maggiore, ma con una minor precisione del dosaggio dei materiali. Come già detto, nel riciclaggio a freddo le miscele sono composte da materiale di

recupero, proveniente dalla fresatura o scarifica di una pavimentazione; legante bituminoso, sotto forma di emulsione bituminosa o schiuma di bitume; filler (additivi); acqua di aggiunta, per un miglioramento della lavorabilità; aggregati vergini di integrazione, per correggere la curva granulometrica degli inerti provenienti dal materiale di recupero.

L'impianto fisso è solitamente composto da:

- un sistema di frantumazione e riselezionatura del fresato;
- due o più predosatori per il fresato e per gli aggregati di integrazione;
- un silos per il cemento con abbinata una coclea a velocità variabile;
- un serbatoio di stoccaggio dell'emulsione bituminosa;
- un serbatoio per l'acqua con misuratore di portata;
- un mescolatore di tipo continuo a due alberi;
- rampe di spruzzatura per l'acqua con misuratore di portata;
- rampa per l'emulsione;
- attrezzature e strumenti di controllo e pesatura, al fine di garantire un costante controllo di processo;
- un nastro di carico del prodotto finito sull'autocarro, o apparecchiatura di scarico dal mescolatore.

Fig. 1.3 Impianto per la produzione di conglomerato a freddo

Dopo una preventiva frantumazione e riselezionatura del fresato, quest'ultimo e gli aggregati vergini di apporto necessari per la correzione della curva granulometrica, vengono convogliati al mescolatore, per mezzo di nastri trasportatori; qui avviene la miscelazione, assieme al legante, che può essere sotto forma di emulsione bituminosa o bitume schiumato, in

percentuali che vanno dal 3 al 6%, assieme all'acqua di aggiunta, utile per migliorare la lavorabilità della miscela, e assieme al filler; i possibili additivi posso essere calcarei o silicei, ma indubbiamente il più utilizzato è il cemento, aggiunto in percentuali che vanno dall'1 al 3%; la sua funzione è quella di migliorare le caratteristiche del conglomerato in termini di resistenza. Di solito non è presente il silo di stoccaggio del prodotto finito, in quanto il conglomerato riciclato a freddo, viene direttamente scaricato sugli automezzi di trasporto. Bisogna inoltre porre molta attenzione alla preparazione del fresato, prima del suo ingresso nell'impianto, al fine di valutarne correttamente le pezzature, le impurità e l'umidità. Una volta pronta la miscela, il conglomerato bituminoso viene caricato sui mezzi e portato in cantiere, per essere successivamente posto in opera e compattato, ricostituendo cosi la pavimentazione originaria.

Riciclaggio in situ

Vengono utilizzate delle macchine stabilizzatrici capaci di frantumare la vecchia pavimentazione e miscelarla sotto un'apposita campana con acqua, aggregato d'integrazione, cemento e leganti bituminosi (emulsione bituminosa e bitume schiumato). Sintetizzando quali siano i vantaggi del riciclaggio a freddo in situ, si possono citare:

- *Vantaggi ambientali:* il materiale recuperato dalla pavimentazione preesistente, si aggira attorno al 100%.
- *Buone caratteristiche prestazionali dello strato riciclato:* le modalità di realizzazione ed il controllo delle varie fasi di miscelazione, nonché della posa in opera del materiale riciclato, ne garantiscono prestazioni elevate.
- *Tempi brevi di costruzione*: i moderni treni di riciclaggio, hanno una produttività elevata, riducendo notevolmente i tempi di costruzione della pavimentazione rispetto a quelli tradizionali, e di conseguenza minimizzando tutti i fastidi che derivano dalla presenza di un cantiere, soprattutto in termini di circolazione.
- *Minor rischio di incidenti* (per l'assenza della fase di trasporto e per il minor numero di mezzi coinvolti).
- *Minor disagio per gli utenti* grazie alla collocazione delle apparecchiature lungo una sola corsia stradale.

Come detto in precedenza, il riciclaggio a freddo viene realizzato tramite opportune apparecchiature, che permettono la miscelazione in continuo del fresato/materiale in sito,

con emulsione bituminosa o bitume schiumato, sostanze stabilizzanti cementizie (calce, cemento, e sostanze simili), acqua e aggregati vergini di integrazione per la correzione del fuso granulometrico, in caso di necessità. Le possibili miscele utilizzate sono rappresentate dalle seguenti combinazioni: emulsione e cemento, bitume schiumato e cemento, solo emulsione, solo bitume schiumato o solo cemento. Il processo avviene in strada attraverso treni a unità singola o multipla, [Fig. 1.5]. Un treno di riciclaggio è costituito da un insieme di macchine operatrici semoventi, sarà composto da fresatrice- riciclatrice; mescolatrice (cisterna per l'acqua, dosatore e mescolatore); autocisterna contenente bitume a caldo; autocisterna per il rifornimento di acqua e infine rullo vibrante per la compattazione. I treni possono differenziarsi in base al tipo di macchinari utilizzati, in funzione delle modalità previste per l'intervento. La parte più importante di queste macchine, è costituita da un *tamburo di fresatura/miscelatura*, [Fig. 1.4], dotato di un notevole numero di utensili da taglio in acciaio temprato, che ruotando fresano la pavimentazione stradale ammalorata: la rotazione avviene in senso antiorario rispetto alla direzione di trattamento della pavimentazione.

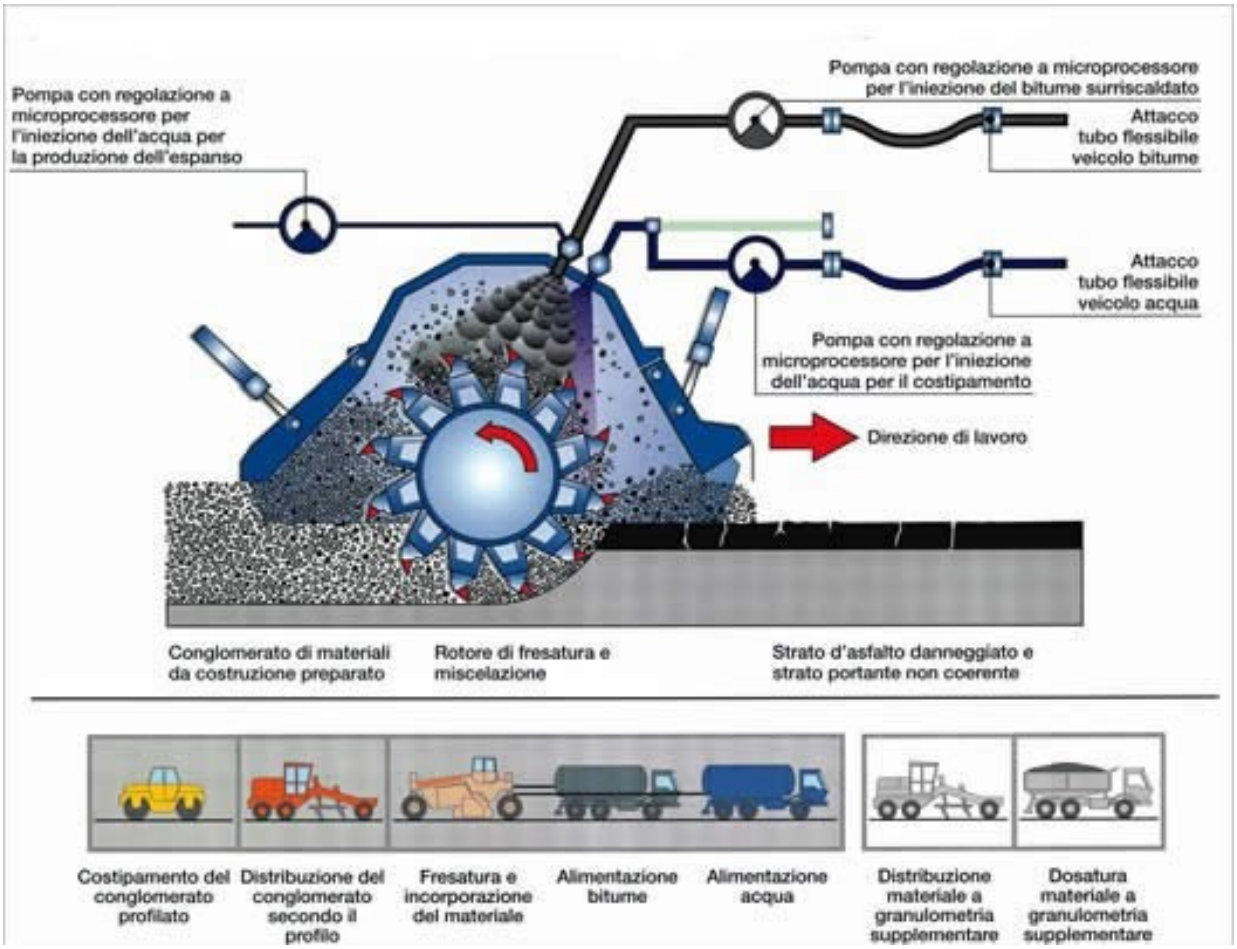


Fig. 1.4: Riciclaggio a freddo con bitume schiumato: schema a treno

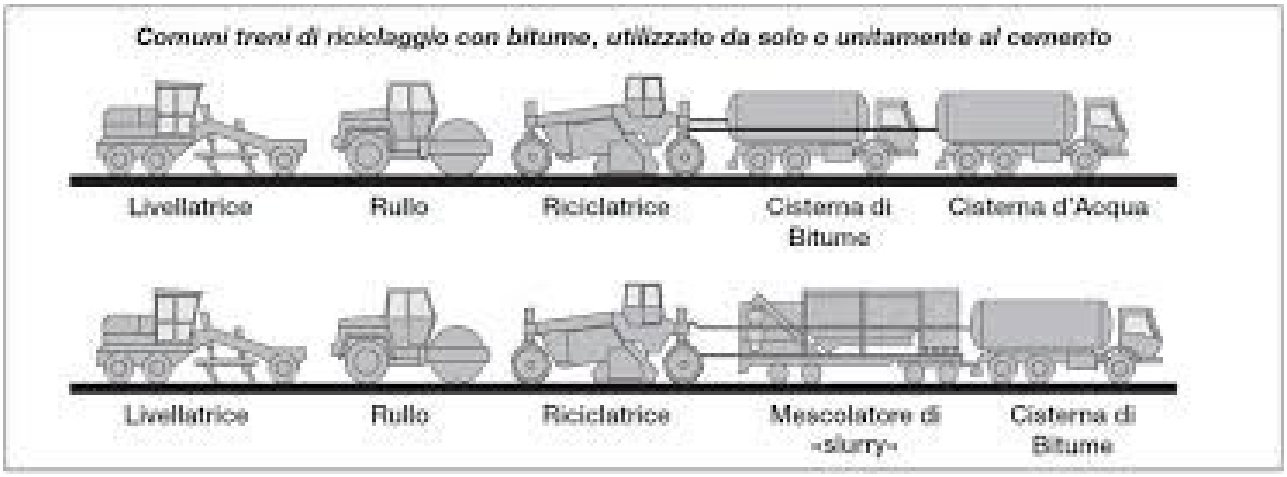


Fig. 1.5 Tipici treni di riciclaggio

1.4 Emulsioni bituminose

Un' emulsione è una dispersione di un liquido in un altro non miscibile, ottenuta in presenza di un prodotto emulsionante. Viene definita *emulsione acida* quella in cui l'elettroforesi conduce le particelle verso il catodo; *l'emulsione basica*, al contrario, presenta uno spostamento opposto delle particelle. Le emulsioni stradali sono costituite in modo che la fase dispersa è data dal legante idrocarburato, mentre l'acqua rappresenta la fase disperdente. L'impiego di emulsione bituminosa per i conglomerati riciclati a freddo permette di ottenere il bitume a temperatura ambiente, comportando i seguenti vantaggi:

- Riduzione delle emissioni in ambiente
- Salvaguardia della salute degli operai
- Minore impatto ambientale
- Riduzione dei costi

Il bitume si presenta sotto forma di goccioline disperse nell'acqua; quando l'acqua evapora rilascia il bitume. Generalmente la percentuale di bitume impiegata in un'emulsione bituminosa è compresa tra il 50 – 70%. Le emulsioni bituminose possono essere classificate in base al tenore di bitume, alla viscosità e alla velocità di rottura, dove per rottura di un'emulsione si intende la separazione fra il bitume e il liquido emulsionante.

La velocità di rottura è un aspetto fondamentale e si sviluppa in tre fasi, [Fig. 1.6]:

- *Decantazione*: separazione di acqua e bitume. Preso un fusto di emulsione prodotta, le gocce di bitume tendono a scendere per gravità e si addensano sul fondo;

- *Flocculazione*: le gocce di bitume tendono a sovrapporsi;
- *Coagulazione*: fusione delle gocce di bitume e formazione di coaguli;
- *Rottura*: l'acqua rimasta in superficie tende ad evaporare e rilascia solo il bitume.

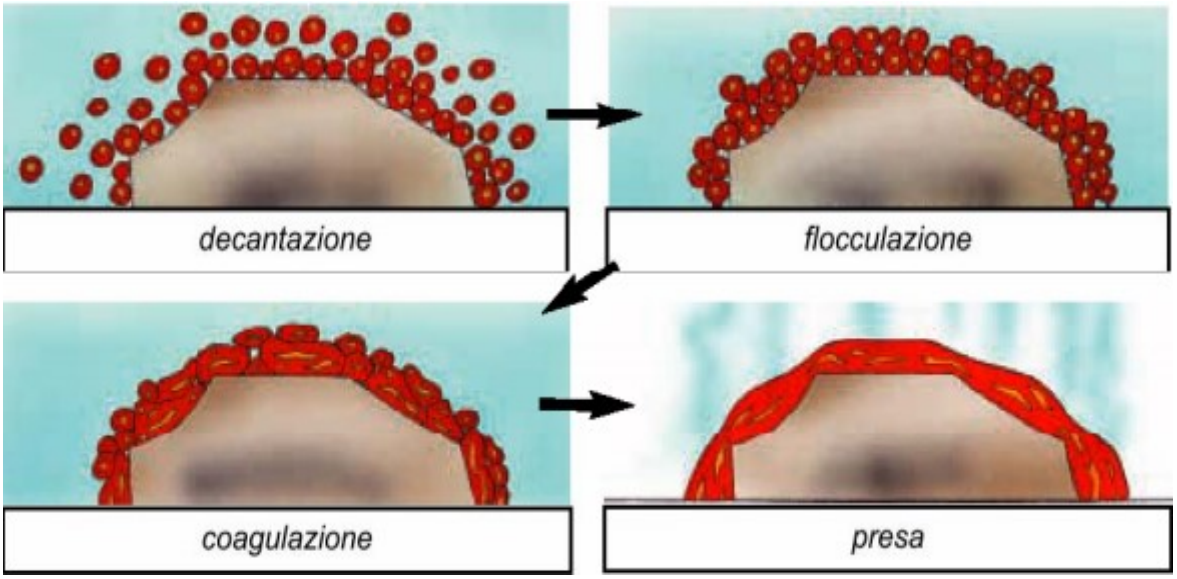


Fig. 1.6 Fasi di rottura di un'emulsione

I processi di rottura e di presa sono influenzati da molteplici fattori, tra essi assumono particolare importanza:

- la tipologia di aggregato, in termine di assortimento granulometrico, contenuto di vuoti e velocità di assorbimento dell'acqua;
- umidità della miscela prima e dopo il costipamento;
- temperatura degli aggregati e dell'aria;
- forze meccaniche derivanti dal pompaggio, dal costipamento e dal traffico;
- contenuto totale del liquido: definisce il rapporto umidità/densità dell'emulsione, è di notevole rilevanza perché il bitume e l'acqua agiscono da lubrificanti, favorendo il costipamento;
- modalità esecutive e tipologie di applicazione.

Un altro aspetto importante è l'affinità dell'agente emulsionante con il bitume. Infatti, se l'agente emulsionante è di origine cationica, rilascia sulla superficie del bitume cariche positive, mentre se l'agente emulsionante è di origine anionica, rilascia sulle particelle di bitume cariche negative. Generalmente le emulsioni che vengono utilizzate nel settore stradale sono emulsioni cationiche.

Le emulsioni bituminose vengono denominate in relazione:

- al tipo di emulsionante (cationico o anionico), alla percentuale di bitume impiegata, al tipo di bitume (semplice o modificato) e alla velocità di rottura. il primo termine: la lettera indica se l'emulsione è cationica (C) o anionica (A);
- il secondo termine: il numero indica la percentuale di bitume impiegato;
- il terzo termine: la lettera indica l'impiego di bitume semplice (B);
- il quarto termine: la lettera indica se il bitume è modificato con polimeri (P);
- il quinto termine: la lettera indica l'aggiunta di un flussante con una percentuale maggiore del 3% (F);
- l'ultimo termine: il numero indica la velocità di rottura e conseguentemente il tempo di rottura.

1.5 Requisiti di capitolato

In questo capitolo viene illustrato come le percentuali ottimali di emulsione bituminosa (di bitume modificato con polimeri) cemento, acqua e dell'eventuale integrazione di aggregati sono stabilite mediante uno specifico studio in laboratorio. Nel caso di riciclaggio del conglomerato bituminoso della pavimentazione esistente, per una corretta valutazione delle caratteristiche del materiale della tratta stradale interessata, devono esser eseguiti prelievi ogni 500 m, eventualmente intensificati in caso di disomogeneità. Quando è prevista la miscelazione con pulvimixer i campioni degli aggregati per lo studio della miscela devono esser prelevati in cantiere, subito dopo un passaggio di pulvimixer senza la stesa dei leganti. Prima di definire la giusta combinazione di leganti, deve essere determinato il contenuto ottimale di acqua sulla miscela granulare con il 2% in peso di cemento, secondo le indicazioni riportate nella Tabella 1.1.

I provini con diverso contenuto di acqua devono essere compattati con pressa giratoria (UNI EN 12697-31) nelle seguenti condizioni di prova:

- Tipo di fustella: NON drenata
- Angolo di rotazione: 1.25° ± 0.02°
- Velocità di rotazione: 30 rotazioni al minuto
- Pressione verticale: 600 kPa
- Dimensioni provino: 150 mm
- n° giri: 100

- Peso campione: 2800 g (comprensivi di cemento e acqua)

Nel caso in cui gli elementi più grossolani impediscano la produzione di provini geometricamente regolari deve essere eliminato il trattenuto al setaccio da 20 mm.

Cemento [%]	2,0					
Acqua [%]	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Provini [n°]	3	3	3	3	3	3

Tab.1.1 Contenuto ottimale di acqua con 2% di cemento

Ogni provino deve essere pesato prima e dopo la compattazione al fine di determinare la percentuale di (eventuale) acqua espulsa. I provini così ottenuti devono essere essiccati fino a peso costante in stufa a 40°C e sottoposti a prova per la valutazione della massa volumica (UNI EN 12697-6/procedura D). Il contenuto ottimo di acqua sarà quello che permette di raggiungere il valore più elevato di massa volumica della miscela (secca) e un quantitativo di acqua espulsa durante la compattazione minore dello 0,5%. Secondo la stessa procedura di compattazione e con il contenuto di acqua ottimo, devono essere confezionati provini con differenti quantità (percentuali riferite al peso degli inerti) di cemento ed emulsione bituminosa (di bitume modificato con polimeri), come indicato nella Tabella 1.2.

Acqua [%]	Contenuto ottimo								
Cemento [%]	1,5			2,0			2,5		
Emulsione bituminosa [%]	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0	3,0	3,5	4,0
Provini [n°]	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Tab. 1.2 confezionamento provini in base alle % di cemento e di emulsione bituminosa

Nel contenuto ottimo di acqua della miscela bisogna considerare anche l'acqua apportata dall'emulsione. I provini così confezionati devono subire una maturazione a 40 °C per 72 ore e successivamente devono essere sottoposti a prova di resistenza a trazione indiretta (UNI EN 12697/23), dopo un condizionamento per 4 ore in camera climatica a 25 °C. Tali provini devono fornire resistenza a trazione indiretta ITS > 0,35 MPa.

Sui provini confezionati con le miscele che soddisfano i requisiti di resistenza a trazione indiretta, maturati per 72 ore a 40 °C, si deve determinare il modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (spostamento orizzontale imposto 5±0.2 µm) secondo la Norma UNI EN 12697/26.

La miscela ottima di progetto sarà quella che fornisce il modulo di rigidezza a 20 °C più piccolo tra quelli che risultano maggiori di 3,0 GPa e resistenza a trazione indiretta dopo imbibizione maggiore del 70% di quella ottenuta su provini non immersi in acqua. Sulla miscela ottima si deve determinare la densità geometrica a 100 giri di pressa giratoria che costituisce il riferimento per il controllo della densità in sito.

Capitolo 2 – Programma sperimentale

Nel seguente capitolo vengono riportate tutte le operazioni eseguite in laboratorio, illustrando gli obiettivi del programma d'indagine, i materiali utilizzati, le apparecchiature adoperate e le metodologie di prova eseguite.

2.1 Piano sperimentale

Lo scopo dell'analisi condotta riguarda lo studio delle caratteristiche meccaniche di diverse miscele preparate con determinate percentuali di emulsione bituminosa e di filler. Per ogni tipo di miscela sono stati realizzati tre provini con maturazione in forno a 40°C a tre, sette e quattordici giorni; Lo studio è suddiviso in due punti:

1. Studio della variazione delle caratteristiche meccaniche di sei miscele realizzate con emulsione modificata (CM) e sei miscele realizzate con emulsione non modificata (MC) con stesse percentuali di emulsione bituminosa e di filler. In questo caso le miscele si differenziano per i giorni di maturazione (3, 7, 14) e per il tipo di condizionamento del provino (in aria e in acqua). Per ogni miscela si hanno provini tre provini con una maturazione di tre giorni con un condizionamento successivo in aria e 3 provini con maturazione di tre giorni con condizionamento in acqua di tre giorni a 40°C. Lo stesso procedimento vale per le miscele con maturazione in forno a sette e quattordici giorni.

- **MISCELA CON EMULSIONE BITUMINOSA 3,5% MODIFICATA (CM), FILLER 3%**

3 provini a tre giorni di maturazione	condizionamento in aria
3 provini a tre giorni di maturazione	condizionamento in acqua
3 provini a sette giorni di maturazione	condizionamento in aria
3 provini a sette giorni di maturazione	condizionamento in acqua
3 provini a quattordici giorni di maturazione	condizionamento in aria
3 provini a quattordici giorni di maturazione	condizionamento in acqua

Tab. 2.1 Schema per la realizzazione dei provini della miscela CM 3,5%, filler 3%

- **MISCELA CON EMULSIONE BITUMINOSA 3,5% NON MODIFICATA (MC), FILLER 3%**

3 provini a tre giorni di maturazione	condizionamento in aria
3 provini a tre giorni di maturazione	condizionamento in acqua
3 provini a sette giorni di maturazione	condizionamento in aria
3 provini a sette giorni di maturazione	condizionamento in acqua
3 provini a quattordici giorni di maturazione	condizionamento in aria
3 provini a quattordici giorni di maturazione	condizionamento in acqua

Tab. 2.2 Schema per la realizzazione dei provini della miscela MC 3,5%, filler 3%

2. Studio della variazione delle caratteristiche meccaniche di dodici impasti realizzati con emulsione bituminosa non modificata. Sono state realizzate quattro miscele in cui variano le percentuali di emulsione bituminosa e di filler; per ogni impasto si hanno quattro provini con maturazione a tre giorni, tre provini con maturazione a sette e quattordici giorni, con successivo condizionamento solo in aria.

MISCELE CON EMULSIONE BITUMINOSA MODIFICATA, (CM):

	Maturazione a tre giorni	Maturazione a sette giorni	Maturazione a quattordici giorni
Emulsione bit. 4%, filler 3%	4 provini	4 provini	3 provini
Emulsione bit. 4%, filler 3,5 %	4 provini	4 provini	4 provini
Emulsione bit. 4%, filler 3%	4 provini	4 provini	4 provini
Emulsione bit. 4,5%, filler 3%	4 provini	4 provini	4 provini
Emulsione bit. 4,5%, filler 4%	4 provini	4 provini	4 provini

Tab. 2.3 Schema per la realizzazione dei provini con varie % di emulsione bituminosa e di filler

Le analisi sperimentali sono state svolte interamente nel Laboratorio di Strade dell'Università Politecnica delle Marche tramite le seguenti fasi:

1) Determinazione della curva granulometrica di progetto delle miscele in modo tale da rientrare all'interno del fuso di riferimento del Capitolato;
2) Determinazione della massa volumica degli aggregati tramite picnometro;
3) Preparazione dei provini elencati precedentemente per impasto con diametro di 150 mm mediante l'utilizzo di miscelatrice e pressa giratoria;
4) Valutazione del modulo elastico in configurazione di trazione indiretta, utilizzando il NAT (Nottingham Asphalt Tester);
5) Determinazione della resistenza a trazione in configurazione di trazione indiretta.

2.2 Materiali

I materiali utilizzati per il confezionamento dei provini di conglomerato bituminoso sono stati: emulsioni bituminose modificate e non, fresato (RAP fine e RAP grosso), sabbia, filler e cemento.

2.2.1 Rap

E' un materiale proveniente dalla fresatura degli strati legati di pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Esso è costituito per il 93-97% in peso da aggregati litici e per il resto da bitume invecchiato. Il fresato è stato sottoposto ad una prova di estrazione del bitume invecchiato e successivamente la distribuzione granulometrica dell'aggregato contenuto nel fresato è stata determinata con gli stessi setacci usati con gli aggregati vergini, seguendo la procedura descritta dalla normativa UNI EN 933-1. Si sono ottenute così due pezzature: RAP grosso e RAP fino.

Si riportano di seguito le caratteristiche granulometriche del RAP (grosso e fino)

Campione	Pezzatura grossa
d [mm]	% passante
31,5	94,4
25	95,6
20	92,2
16	83,3
12,5	74,8
10	65,9
8	55,5
4	31,3
2	15,3
1	7,2
0,5	3,8
0,25	2,4
0,125	1,4
0,063	0,8
FONDO	0

Tab. 2.4 RAP Grosso

Fig. 2.1 RAP Grosso

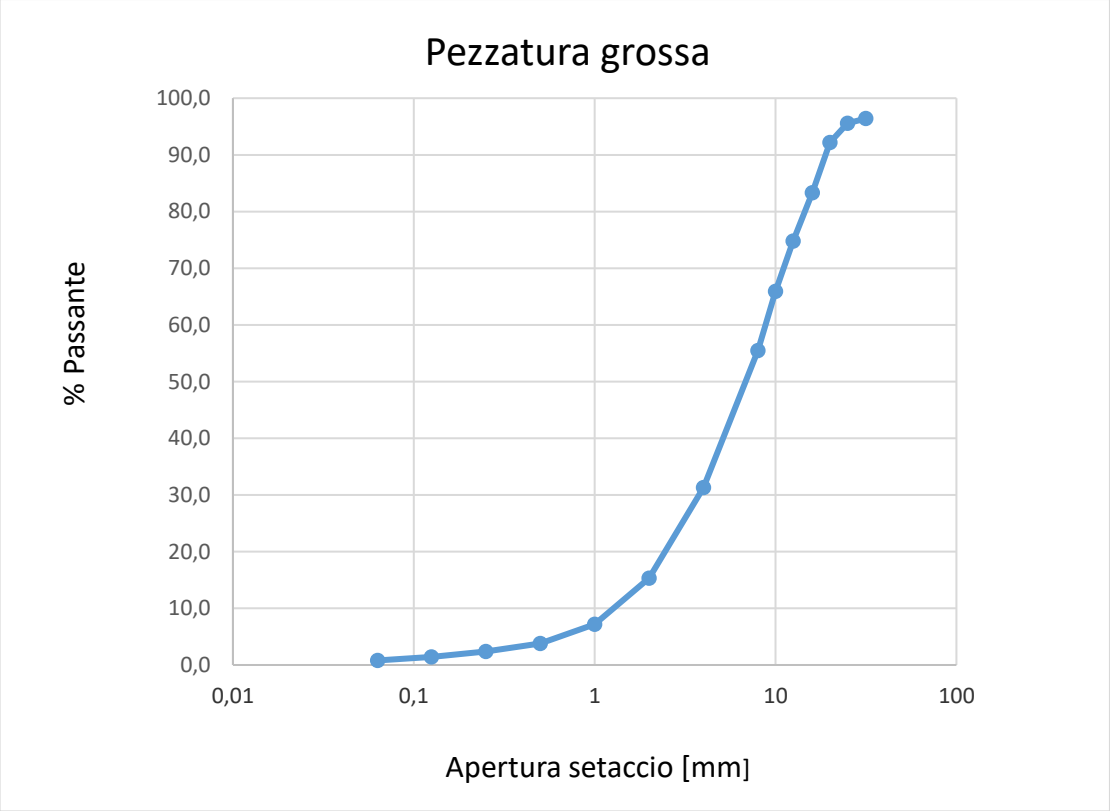


Fig. 2.2 Curva Granulometrica del RAP Grosso

Campione	Pezzatura fina
d [mm]	% passante
31,5	100
25	100
20	100
16	100
12,5	98
10	95
8	81,7
4	45,6
2	21,7
1	11,7
0,5	7,9
0,25	6,3
0,125	5,1
0,063	4,2
FONDO	0,1

Tab. 2.4 RAP Fino

Fig. 2.3 RAP Fino

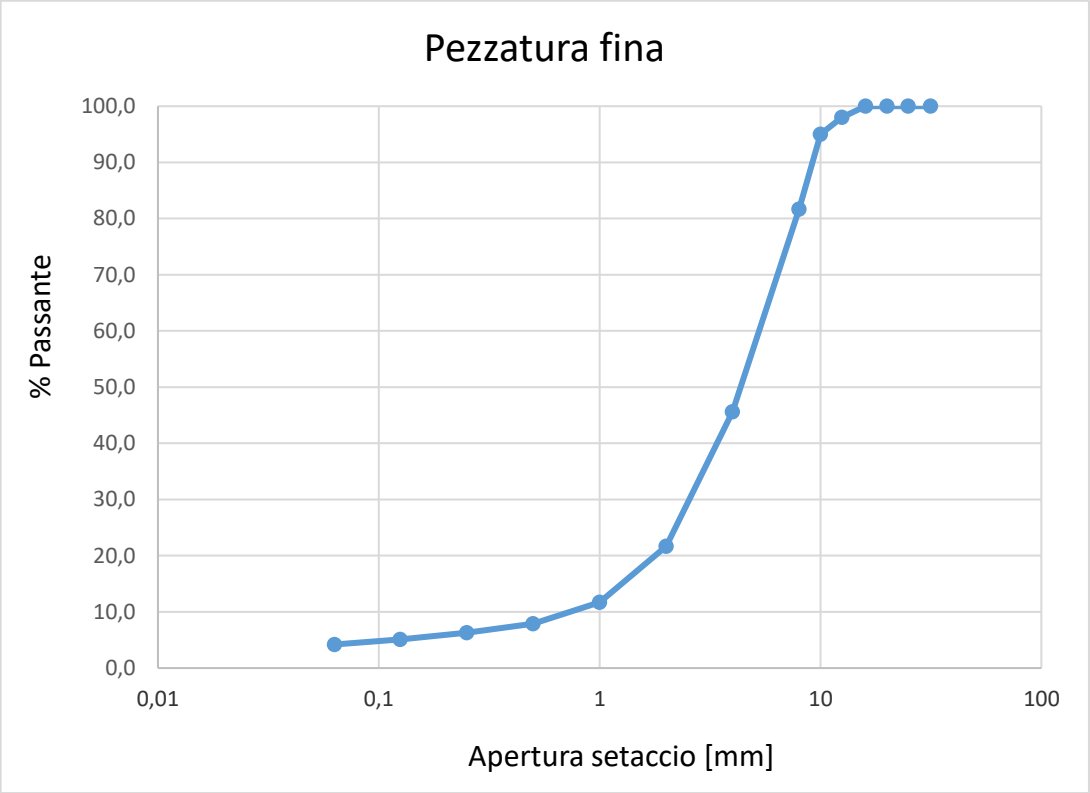


Fig. 2.4 Curva Granulometrica del RAP Fino

2.2.2 Sabbia calcarea

La sabbia utilizzata per la realizzazione di questa indagine sperimentale è di natura calcarea con pezzatura 0/6:

Campione	Sabbia calcarea
d [mm]	% passante
20	100
16	100
12,5	100
9,5	100
8	100
4	92,5
2	60,4
0,5	22,5
0,25	16
0,125	11,8
0,063	9,2
FONDO	0

Tab. 2.5 sabbia calcarea

Fig.2.5 Sabbia calcarea

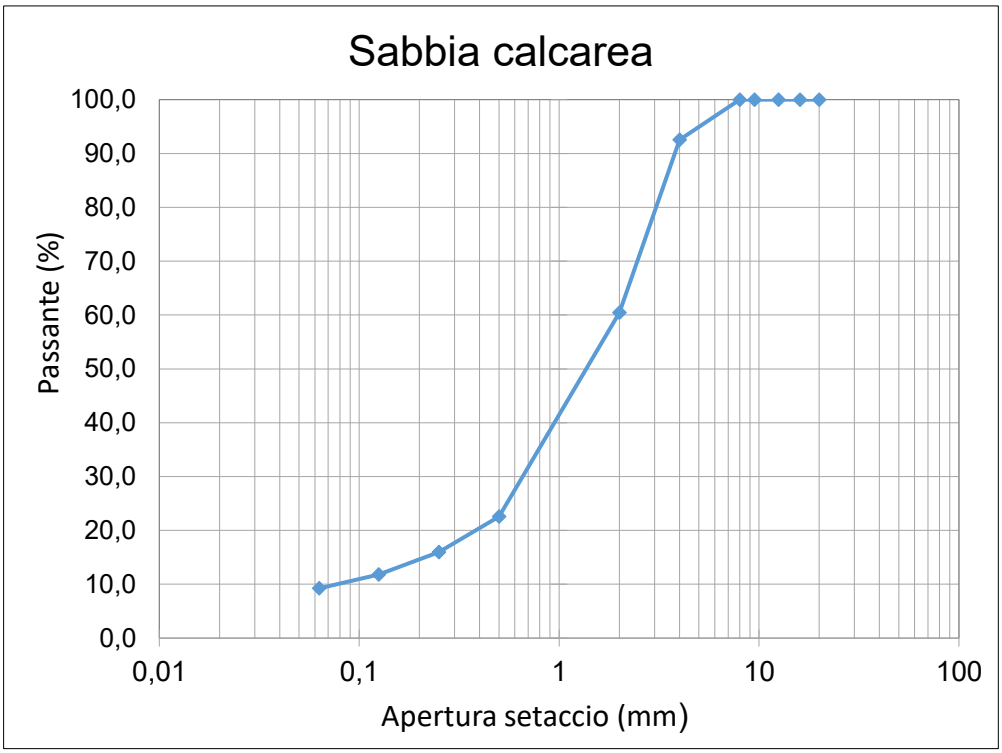


Fig. 2.6 Curva Granulometrica Sabbia calcarea

2.2.3 Filler di recupero

Il filler viene utilizzato nella produzione di conglomerati bituminosi per conferirgli una certa plasticità una volta unito al legante. Il filler è la frazione di aggregato avente dimensioni minori di 0,075 mm secondo la norma CNR 139 (la normativa UNI EN 933-1 invece richiede l'utilizzo del setaccio da 0,063 mm).

Campione	Filler di recupero
d [mm]	% passante
20	100
16	100
12,5	100
9,5	100
8	100
6,3	100
4	100
2	99
1	96
0,5	91,4
0,25	86,1
0,063	69,5
FONDO	0

Tab. 2.6 Filler di recupero

Fig. 2.7 Filler di recupero

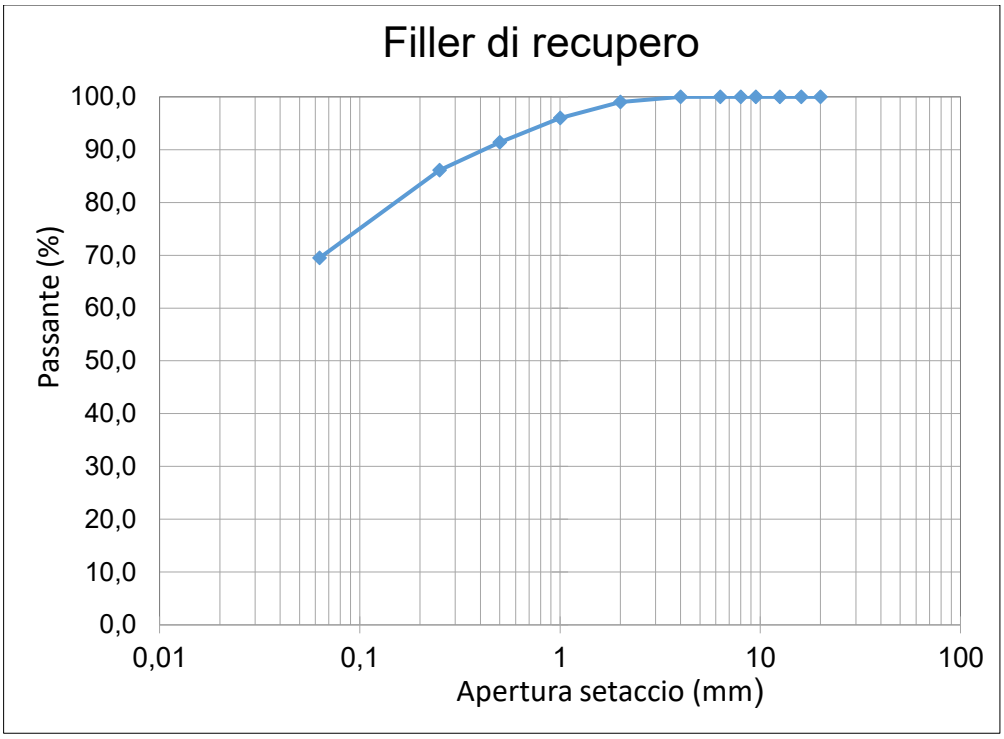


Fig. 2.8 Curva Granulometrica Filler di recupero

2.2.4 Emulsioni bituminose

Per realizzare le miscele sono state utilizzate due tipi di emulsioni bituminose:

- *RIGEVAL CM*

Tale emulsione è utilizzata per realizzare conglomerati bituminosi con la tecnica del riciclaggio a freddo di fresato stradale con cemento Portland e/o calce idrata. Si tratta di una miscela di bitume modificato, si utilizza principalmente per la lavorazione in impianto fisso. In tabella vengono riportate le caratteristiche fornite dall' azienda Valli Zabban. Il prodotto deve essere messo in opera a temperature comprese tra i 40°C e i 60°C e lo stoccaggio deve avvenire a temperature comprese tra i 10°C e i 70°C. Nel caso in cui lo stoccaggio è prolungato senza movimentazione, si raccomanda di miscelare il prodotto per rimuovere l'eventuale sedimento e una volta all'anno è consigliata la pulizia del serbatoio di stoccaggio ed è sconsigliato agitare l'emulsione con agitatori a pale; si potrebbero avere problemi in presenza di gelo.

INFORMAZIONI	
Codice di notifica O.N.	N. 1982
Numero certificato FPC	N. 1982 – CPR – 427
Anno di affissione marcatura	2012
Produttore	**VALLI ZABBAN S.p.A.** Via Danubio, 10 – 50019 Sesto Fiorentino FI
Sito produttivo	**Stabilimento di Bologna** Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna
Designazione	**C60BP10**
Riferimento DOP	Dichiarazione di prestazione n.01051036
Descrizione del prodotto	Emulsione di bitume modificato sovra stabilizzata specifica per la realizzazione di conglomerati bituminosi a freddo contenenti fresato stradale e con cemento Portland 325 e/o calce idrata. Il prodotto è formulato per lavorazioni in impianto fisso.
Applicazione (UNI/TR11362)	Riciclaggio a freddo

NORMA DI RIFERIMENTO: UNI EN 13808					
Caratteristiche dell'emulsione	**Norma di Riferimento**	**U.d.M.**	**Prestazione**		
			min	**max**	**Classe**
Contenuto di legante	UNI EN 1428	%	58	62	6
Stabilità alla miscelazione con cemento	UNI EN 12848	%		2	10
Viscosità a 40°C (tempo di effusso tazza 2 mm)	UNI EN 12846	sec	15	70	3
Adesività	UNI EN 13614	%	90		3
Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074)					
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		100	3
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	60		2
Coesione Force ductility test a 10°C	UNI EN 13589 UNI EN 13703	J/cm^2	2		6
Recupero di deformazione Ritorno elastico a 25°C	UNI EN 13398	%	75		4

Tab. 2.7 Caratteristiche emulsione bituminosa modificata CM

- RIGEVAL MC

Si tratta di un'emulsione di bitume distillato, sovra stabilizzata, utilizzata per la realizzazione di misti granulari legati a calce e cemento, contenenti o meno fresato stradale con la tecnica di riciclaggio a freddo. Tra le condizioni operative si consiglia di no agitare l'emulsione con agitatori a pale; si devono evitare riscaldamenti diretti con fluidi caldi aventi temperature superiori ai 100°C. La messa in opera deve avvenire, anche in questo caso, a temperature comprese tra i 40°C e i 60°C mentre lo stoccaggio deve avvenire a temperature comprese tra i 10°C e i 70°C.

INFORMAZIONI	
Codice di notifica O.N.	N. 1982
Numero certificato FPC	N. 1982 – CPR – 427
Anno di affissione marcatura	2012
Produttore	**VALLI ZABBAN S.p.A.** Via Danubio, 10 – 50019 Sesto Fiorentino FI
Sito produttivo	**Stabilimento di Bologna** Via del Traghetto, 42 – 40100 Bologna
Designazione	**C60B10**
Riferimento DOP	Dichiarazione di prestazione n.01051040
Descrizione del prodotto	Emulsione di bitume distillato, sovra stabilizzata, specifica per la realizzazione di stabilizzazioni di misti granulari legati a calce e cemento, contenenti o meno fresato stradale.
Applicazione (UNI/TR11362)	Riciclaggio a freddo

NORMA DI RIFERIMENTO: UNI EN 13808					
Caratteristiche dell'emulsione	**Norma di Riferimento**	**U.d.M.**	**Prestazione**		
			min	**max**	**Classe**
Contenuto di legante	UNI EN 1428	%	**58**	**62**	**6**
Stabilità alla miscelazione con cemento	UNI EN 12848	%		**2**	**10**
Viscosità a 40°C (tempo di efflusso tazza 2 mm)	UNI EN 12846	sec	**15**	**70**	**3**
Adesività	UNI EN 13614	%	**90**		**3**
Caratteristiche del legante recuperato tramite evaporazione (UNI EN 13074)					
Consistenza alla temperatura intermedia di esercizio Penetrazione a 25°C	UNI EN 1426	dmm		**100**	**3**
Consistenza alle temperature elevate di esercizio Punto di rammollimento P.A.	UNI EN 1427	°C	**43**		**6**

Tab. 2.8 Caratteristiche emulsione bituminosa modificata MC

2.3 Procedure di laboratorio

Nel presente paragrafo vengono illustrate nel dettaglio tutte le apparecchiature e le procedure di laboratorio per la preparazione e la valutazione delle miscele di conglomerato bituminoso tramite la tecnica di riciclaggio a freddo.

Lo studio è stato condotto su 6 miscele, suddiviso in due fasi:

- Prima fase:
  - Miscela CM 3,5%, filler 3%
  - Miscela MC 3,5%, filler 3%
- Seconda fase:
  - Miscela CM 4%, filler 3%
  - Miscela CM 4%, filler 3,5%
  - Miscela CM 4,5%, filler 3%
  - Miscela CM 4,5%, filler 4%.

Nella prima fase sono state utilizzate l'emulsioni con bitume modificato, CM, e l'emulsione con bitume non modificato MC. In questa fase sono state analizzate le variazione della caratteristiche meccaniche mantenendo costante la percentuale di emulsione bituminosa e la percentuale di filler. Per ogni miscela sono stati realizzati in totale 18 provini:

- 6 provini: 3 provini con maturazione del calcestruzzo a 3 giorni e 3 provini con maturazione a 3 giorni con successivo condizionamento in acqua a 40°C per 72 ore;
- 6 provini: 3 provini con maturazione del calcestruzzo a 7 giorni e 3 provini con maturazione a 7 giorni con successivo condizionamento in acqua a 40°C per 72 ore;
- 6 provini: 3 provini con maturazione del calcestruzzo a 14 giorni e 3 provini con maturazione a 14 giorni con successivo condizionamento in acqua a 40°C per 72 ore.

Nella seconda fase, è stata utilizzata solo l'emulsione con bitume modificato (CM); lo studio delle caratteristiche meccaniche in questa fase è stato eseguito variando le percentuali di emulsione bituminosa e di filler per 4 miscele. Per ogni miscela sono stati realizzati 10 provini:

- 4 provini con maturazione del calcestruzzo a 3 giorni;
- 3 provini con maturazione del calcestruzzo a 7 giorni;
- 3 provini con maturazione del calcestruzzo a 14 giorni.

Ogni provino è stato confezionato nel Laboratorio di Strade del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) della Facoltà di Ingegneria di Ancona.

2.3.1 Analisi granulometrica

L'analisi granulometrica consiste nella vagliatura del materiale, la quale, si effettua per mezzo di una serie di setacci disposti in ordine decrescente dall'alto verso il basso. I setacci possono essere a maglia circolare o maglia quadrata. Il diametro dei singoli granuli corrisponde rispettivamente al diametro della maglia circolare e alla diagonale della maglia quadrata. In particolare, per lo studio sono stati utilizzati setacci a maglia quadrata.

Fig. 2.9 Setaccio a maglia quadrata

Sono stati utilizzati quattordici setacci, [Fig. 2.10], posti uno sopra l'altro per ordine crescente delle dimensioni delle maglie da 0,063 mm a 31,5 mm. In figura 2.11 viene illustrata il vibro-vaglio, utilizzato per l'analisi in cui sono messi i setacci; la macchina viene lasciata in azione per 20 minuti.

Fig. 2.10 Setacci utilizzati per l'analisi granulometrica

Fig. 2.11 Vibro-vaglio

L'analisi granulometrica consiste nel determinare alcune grandezze: quali trattenuto parziale, trattenuto cumulativo, passante parziale e passante cumulativo. Il trattenuto parziale è il rapporto tra la massa del materiale sull'i-esimo setaccio e la massa iniziale del campione (espressa in percentuale). Esso corrisponde al materiale che viene trattenuto sul setaccio; conseguentemente si può determinare il passante parziale (complementare del trattenuto parziale). Il trattenuto cumulativo, invece, è la somma di tutti i trattenuti parziali fino al setaccio i-esimo che si considera. Il passante cumulativo è il complementare del trattenuto cumulativo.

2.3.2 Picnometro

Il picnometro è uno strumento in vetro utilizzato per determinare la densità di corpi liquidi e solidi, [Fig. 2.12]. Tale strumento è stato usato per determinare le masse volumiche e l'assorbimento degli aggregati.

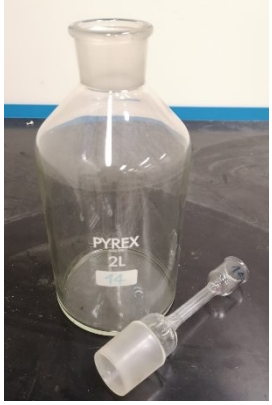


Fig. 2.12 Picnometro

Per prima cosa, il campione di RAP viene setacciato in due pezzature diverse:

- 4 mm- 31,5 mm;
- 0,063 mm- 4 mm.

Sono stati utilizzati quindi due picnometri, uno per l'aggregato fine e uno per l'aggregato grosso, all'interno dei quali è stato inserito il materiale come segue:

- Circa 1,5- 2 kg di pezzatura grossa, (4 mm- 31,5 mm), precedentemente setacciato;
- Circa 1 kg di aggregato di pezzatura fine, (0,063 mm- 4 mm).

Si procede inserendo l'acqua all'interno dei picnometri fino a sommergere tutto l'aggregato senza riempire il picnometro. Per eliminare l'aria intrappolata si utilizza una pompa per sottovuoto, [Fig. 2.13], per circa 20 minuti.

Fig. 2.13 Picnometro collegato alla pompa per sottovuoto

Dopo l'aspirazione dei vuoti, i picnometri vengono messi nella camera climatica a 20°C, insieme a delle bottiglie di acqua, per una notte.

Il giorno successivo, i picnometri vengono attaccati nuovamente alla pompa per sottovuoto per 15- 20 minuti; usando la bilancia di precisione, misuro la massa M2 data dal picnometro (asciugato esternamente), con il corrispondente tappo riempito di acqua fino al menisco che si trova sul tappo. Con il termometro ad ago, viene misurata la temperatura dell'acqua ottenendo T1 il cui valore deve essere pari a 22°C ±3°C.

Fig. 2.14 Bilancia di precisione, termometro ad ago

Fig. 2.15 Misura della massa e della temperatura

Arrivati a questo punto, si adottano due differenti procedure, una per gli aggregati di pezzatura grossa e uno procedura per gli aggregati di pezzatura fine:

- *Procedura per aggregati di pezzatura 4 mm- 31,5 mm*

Si pone nel lavandino un setaccio da 2 mm, sopra cui si svuota il picnometro contenente acqua e materiale, in modo tale che l'acqua scorre ma gli aggregati restano sul setaccio. Il materiale dal setaccio viene posto su una teglia larga con sopra il panno assorbente, [Fig. 2.16]; si inizia a tamponare con un panno fino a raggiungere la condizione di superficie satura, ovvero l'aggregato non deve avere più il film d'acqua sopra, ma deve essere ancora umido.

Fig. 2.16 Materiale in condizioni di superficie satura

Dopo aver raggiunto la condizione di superficie satura, si versa il materiale su una teglia di alluminio, precedentemente tarata (tara1). Si ottiene il peso M1, pesando la teglia con il

materiale e sottraendo la tara della teglia. Dopo aver annotato la massa, la teglia viene inserita all'interno del forno, [Fig. 2.17], a 40°C. Il giorno seguente, peso la teglia contenente il materiale asciutto e sottraendo la tara della teglia osi ottiene la massa M4.

Fig. 2.17 Forno

Come indicato nella figura 2.18, il picnometro viene riempito di acqua fino al menisco e misura la massa M3 e la temperatura che non deve variare più di 2°C da T1.

Fig. 2.18 Misura delle temperatura e della massa del picnometro con acqua

- *Procedura per aggregati di pezzatura 0,063 mm- 4 mm*

Si pone nel lavandino il setaccio da 0,063 mm e anche in questo caso si fa scorrere l'acqua attraverso il setaccio per recuperare il materiale. Si versa il materiale all'interno di una teglia di alluminio precedentemente tarata, tara1, e la si pone nel forno a 40°C per 30 minuti circa per togliere l'acqua in eccesso. Anche in questo caso devo raggiungere la condizione di superficie satura come segue:

si prendono un cono una spatolina e un pistone per battere e si pesano insieme alla teglia così da avere la tara; dopo ogni intervallo di tempo, la teglia viene tolta dal forno e viene inserito un po' di materiale all'interno del cono, dopo, tramite il pistone si danno 25 colpi sul materiale e togliendo il cono si valuta la condizione dell'aggregato; si deve ripete la procedura fino a raggiungere la condizione di superficie satura come in figura 2.21.

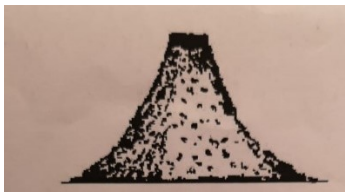


Fig. 2.19 Aggregati umidi

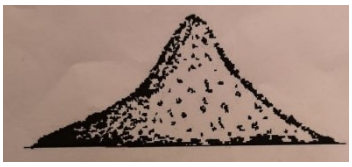


Fig. 2.20 Aggregati leggermente umidi

Fig. 2.21 Aggregati saturi con superficie essiccata

Fig. 2.22 Aggregato asciutto

Fig. 2.23 Teglia con materiale, spatola, pistone e cono

Una volta raggiunta la condizione di superficie satura, [Fig. 2.23], la teglia con tutti gli utensili viene pesata e sottraendo la tara si ottiene M1; successivamente la teglia viene rimessa in forno e dopo un giorno viene pesata nuovamente, (si fanno due pesate per vedere che la massa rimane costante) ottenendo M4. Anche in questo caso, il picnometro viene riempito di acqua fino al menisco e misura la massa M3 e la temperatura che non deve variare più di 2°C da T1.

Fig. 2.24 Aggregati in condizione di superficie satura

Infine, per entrambe le pezzature calcolo l delle masse volumiche e dell'assorbimento dell'acqua:

- Massa volumica apparente dei granuli

$$\rho a = \rho w * \frac{M4}{M4 - (M2 - M3)}$$

- Massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa

$$\rho rd = \rho w * \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)}$$

- Massa volumica dei granuli in condizioni di superficie satura

$$\rho ssd = \rho w * \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)}$$

- Assorbimento dell'acqua

$$WA_{24} = 100 * \frac{M1 - M4}{M4}$$

2.3.3 Preparazione dei provini

Per la preparazione dei provini ci sono state due fasi:

- *Fase 1, Preparazione aggregati*

Questa fase deve avvenire almeno 12 ore prima della fase successiva in quanto gli aggregati devono essere asciutti, vanno stesi a terra, [Fig. 2.25], oppure vanno messi in forno 40°C per il RAP e 100°C per gli aggregati vergini, fino al raggiungimento della massa costante.

Fig. 2.25 Materiale steso

Dopo aver ottenuto gli aggregati asciutti si passa alla preparazione del materiale all'interno dei secchi di plastica, in base alle relative ricette mostrate nelle seguenti tabelle; l'acqua di assorbimento viene aggiunta subito dopo. Infine si miscela manualmente, [Fig. 2.26], e si sigilla il secchio con un telo di plastica per evitare perdita di acqua.

Fig. 2.26 Materiale miscelato manualmente

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	3180	3180
RA2	**grosso**	3180	3180
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1352	1352
Filler	**di recupero**	239	239
Water (abs)		124,8	124,8
Cement	**C1-ref**	159	159
Emulsion		278	278
A di aggiunta		161	161

Tab. 2.9 Ricetta miscele CM e MC 3,5%, filler 3%

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	4240	4240
RA2	**grosso**	4240	4240
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1802	1802
Filler	**di recupero**	318	318
Water (abs)		166,4	166,4
Cement	**C1-ref**	212	212
Emulsion		477	477
Acqua di aggiunta		173	173

Tab. 2.10 Ricetta miscela CM 4,5%, filler 3% con maturazione del calcestruzzo a 3 giorni

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	3180	3180
RA2	**grosso**	3180	3180
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1352	1352
Filler	**di recupero**	239	239
Water (abs)		124,8	124,8
Cement	**C1-ref**	159	159
Emulsion		358	358
Acqua di aggiunta		130	130

Tab. 2.11 Ricetta miscela CM 4,5%, filler 3% con maturazione del calcestruzzo a 7 e 14 giorni

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	4187	4187
RA2	**grosso**	4187	4187
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1802	1802
Filler	**di recupero**	424	424
Water (abs)		164,7	164,7
Cement	**C1-ref**	212	212
Emulsion		477	477
Acqua di aggiunta		175	175

Tab. 2.12 Ricetta miscela CM 4,5%, filler 4% con maturazione del calcestruzzo a 3 giorni

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	3140	3140
RA2	**grosso**	3140	3140
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1352	1352
Filler	**di recupero**	318	318
Water (abs)		123,5	123,5
Cement	**C1-ref**	159	159
Emulsion		358	358
Acqua di aggiunta		131	131

Tab. 2.13 Ricetta miscela CM 4,5%, filler 4% con maturazione del calcestruzzo a 7 e 14 giorni

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	4240	4240
RA2	**grosso**	4240	4240
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1802	1802
Filler	**di recupero**	318	318
Water (abs)		166,4	166,4
Cement	**C1-ref**	212	212
Emulsion		424	424
Acqua di aggiunta		194	194

Tab. 2.14 Ricetta miscela CM 4%, filler 3% con maturazione del calcestruzzo a 3 giorni

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	3180	3180
RA2	**grosso**	3180	3180
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1352	1352
Filler	**di recupero**	239	239
Water (abs)		124,8	124,8
Cement	**C1-ref**	159	159
Emulsion		318	318
Acqua di aggiunta		145	145

Tab. 2.15 Ricetta miscela CM 4%, filler 3% con maturazione del calcestruzzo a 7 e 14 giorni

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	4214	4214
RA2	**grosso**	4214	4214
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1802	1802
Filler	**di recupero**	371	371
Water (abs)		165,5	165,5
Cement	**C1-ref**	212	212
Emulsion		424	424
Acqua di aggiunta		195	195

Tab. 2.16 Ricetta miscela CM 4%, filler 3,5% con maturazione del calcestruzzo a 3 giorni

ID	Name	Dosage oven-dried aggregates [g]	Dosage air-dried aggregates [g]
RA1	**fino**	3160	3160
RA2	**grosso**	3160	3160
VA1	**-**	0	0
VA2	**-**	0	0
VA3	**-**	0	0
VA4	**sabbia 0/6**	1352	1352
Filler	**di recupero**	278	278
Water (abs)		124,2	124,2
Cement	**C1-ref**	159	159
Emulsion		318	318
Acqua di aggiunta		146	146

Tab. 2.17 Ricetta miscela CM 4%, filler 3,5% con maturazione del calcestruzzo a 7 e 14 giorni

- Fase 2, Miscelazione

Il giorno seguente come prima operazione, è necessario bagnare il secchio della miscelatore e lasciarlo asciugare; nel frattempo vengono pesati cemento e acqua di aggiunta secondo ricetta e si mescola bene l'emulsione bituminosa per assicurarsi che bitume e acqua non siano separati. Dopo queste operazioni preliminari, si passa alla miscelazione che prevede la seguente procedura:

1. Si versano gli aggregati dal recipiente di plastica al recipiente del miscelatore versando metà della quantità di cemento e si esegue una miscelazione meccanica tramite miscelatore, [Fig. 2.27] e successivamente una miscelazione manuale di 1 minuto;
2. Viene versata anche la seconda metà del cemento e si ripete sia la miscelazione meccanica che manuale;
3. Si aggiunge metà dell'acqua e viene ripetuta sia la miscelazione meccanica che quella manuale;
4. A questo punto si aggiunge l'emulsione bituminosa facendo un piccolo fosso nel materiale e una volta versata l'emulsione, ricoprirla con un po' di materiale prima di aziona il miscelatore per 1 minuto;

5. Infine ai aggiunge la restante parte di acqua e si mescola per un minuto manualmente e dopo con il miscelatore. Inoltre è consigliato pulire le pale del miscelatore da eventuali aggregati più bitume.

Fig. 2.27 Miscelatore

Fig. 2.28 Emulsione bituminosa e cemento

Fig. 2.29 Fase finale della preparazione della miscela

Dopo aver preparato la miscela, [Fig. 2.29], si passa alla preparazione dei provini, tramite la pressa a taglio giratoria, [Fig. 2.30].

Fig. 2.30 Pressa a taglio giratoria

La pressa a taglio giratoria che consente di ottenere dei provini in conglomerato compattato che sono in grado di ben simulare le proprietà fisico-meccaniche di carote di pavimentazioni realizzate con la stessa miscela e prelevate in opera. La buona corrispondenza con la realtà è dovuta al fatto che durante la compattazione con tale apparecchiatura il conglomerato subisce una continua riorganizzazione interna dei suoi costituenti che lo porta, in analogia a quanto avviene in cantiere, ad assumere configurazioni corrispondenti a strutture via via più dense. Tale evoluzione è dovuta alla rotazione della fustella da 150 mm di diametro, [Fig. 2.31], al cui interno è inserito il conglomerato, e alla non coincidenza degli assi lungo cui agiscono le risultanti delle pressioni durante la compattazione.

Fig. 2.31 Fustella

Fig. 2.32 Piastra infinitamente rigida

La pressa giratoria a taglio realizza la compattazione della miscela attraverso l'applicazione contemporanea di una pressione assiale costante e di una rotazione, secondo un angolo di inclinazione di 1,25°. Una delle caratteristiche della compattazione tramite questa apparecchiatura è la possibilità di verificare ed analizzare come avviene l'addensamento dei provini di conglomerato al variare del numero di giri; aumentando il numero dei giri, l'altezza del materiale contenuto nella fustella tenderà a diminuire e parallelamente la densità aumenterà fino ad un valore massimo caratteristico del materiale stesso. Come illustrato dalla figura 2.33, l'apparecchiatura è composta da vari elementi tra cui un telaio di carico costituito da un supporto inclinabile, dove verrà inserita la fustella; un pistone di carico che permette l'applicazione del carico verticale; una base rotante e infine un sistema di acquisizione e controllo dei dati in cui viene registrato l'andamento dell'altezza del provino ad ogni giro.

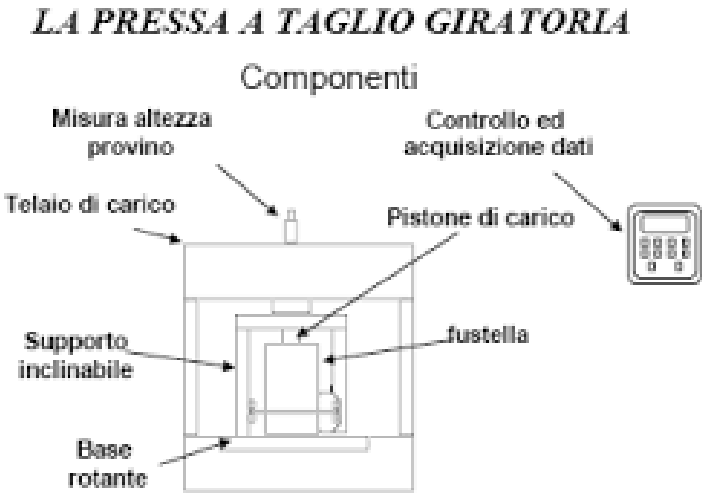


Fig. 2.33 Componenti della Pressa a taglio giratoria

A questo punto si apre l'aria compressa e si verifica che sia al di sopra di 700 kPa in quanto la norma stabilisce che la compattazione deve avvenire a una pressione di 600 kPa. Si accende il computer e si avvia il software, [Fig. 2.34], impostando sulla schermata principale, [Fig. 2.35], i dati del provino, ovvero il nome, il numero del provino, la densità massima, il diametro del provino e il numero di rivoluzioni che il macchinario deve compiere. Una fase importante è quella della lubrificazione del piano d'appoggio con il grasso perché si creano attriti che non rovinano la macchina e che non permettono a compattazione al meglio del provino. Il grasso va applicato sulla fustella, sugli snodi, sul pistone e sul piano d'appoggio; dopo questa fase ha inizio la prova. Il pistone scende finché non raggiunge il livello desiderato di pressione. Dopo

questa fase di assestamento, i supporti laterali si sollevano determinando un'inclinazione della fustella, che, di conseguenza, inizierà a ruotare.

Fig. 2.34 Schermata iniziale del software

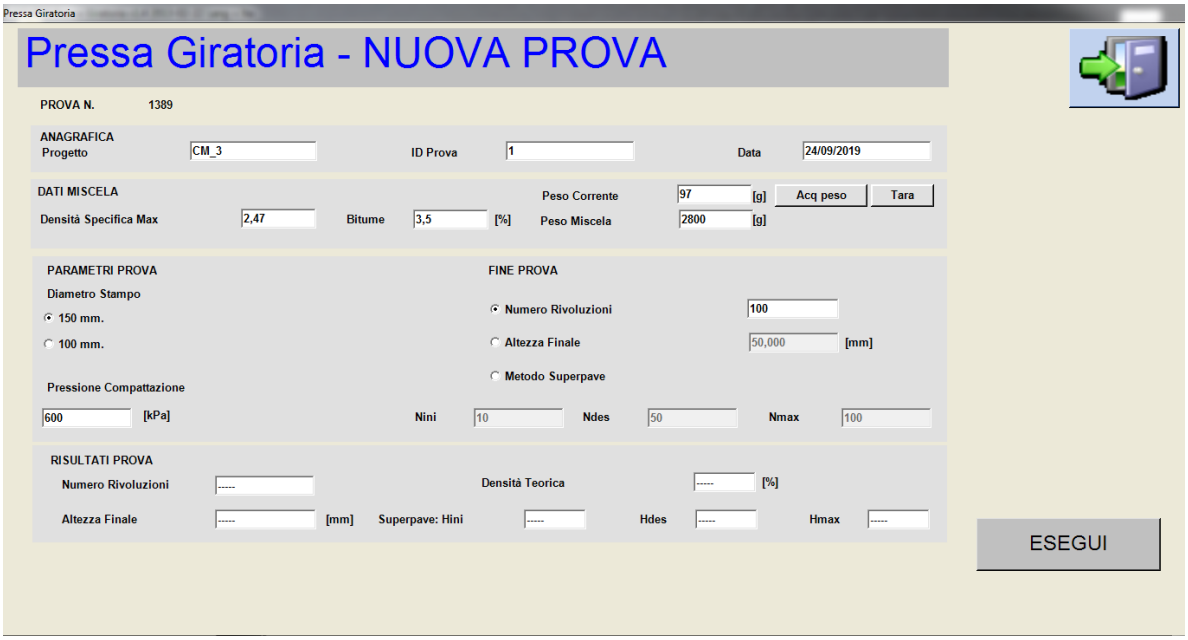


Fig. 2.35 Schermata principale pressa a taglio giratoria

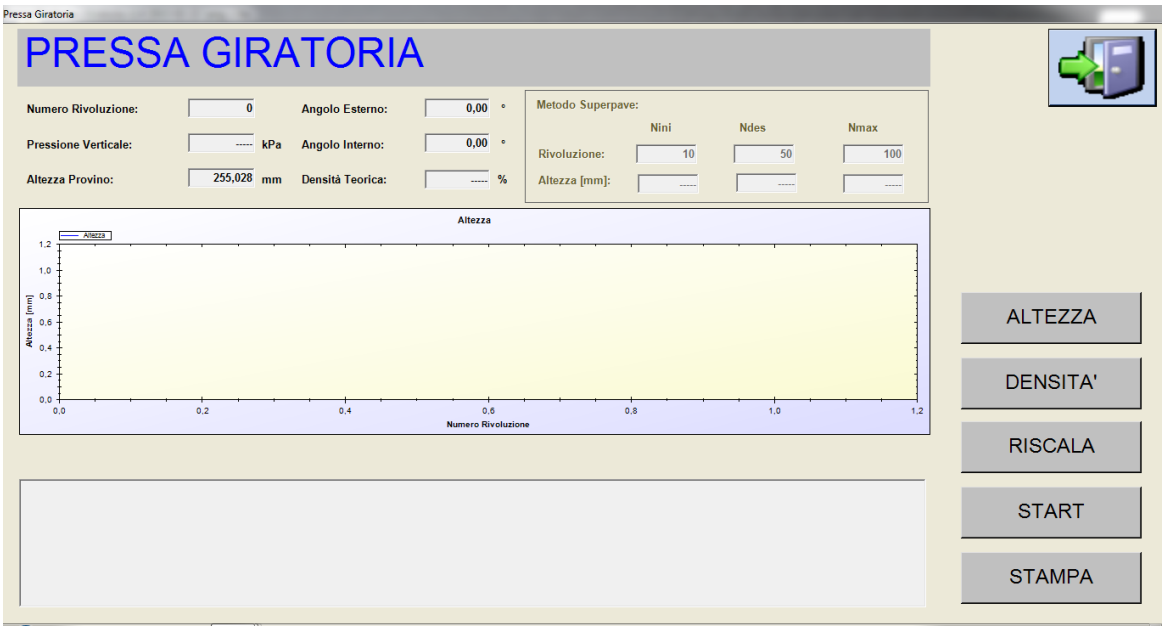


Fig. 2.36 Schermata di avvio prova

Il processo di compattazione prevede inoltre che, mentre la fustella ruota attorno al proprio asse ad una velocità prestabilita, il pistone imprime sulla miscela una pressione costante con un'applicazione in direzione inclinata rispetto all'asse della fustella. Raggiunta la massima compattazione del provino, ovvero raggiunto il numero di giri impostati prima di avviare la prova, il pistone risale, quindi è possibile estrarre la fustella dove al suo interno c'è il provino compattato, la massa della fustella verrà annotata prima di inserire il materiale all'interno, dopo aver inserito il materiale e dopo la compattazione. La prova si conclude con l'estrazione del provino, dopo aver incastonato la fustella all'estrattore rigido, mediante martinetto idraulico che lo solleva dal basso verso l'alto provocandone la fuoriuscita, [Fig. 2.37].

Fig. 2.37 Estrazione provino dalla fustella

Dopo aver estratto il provino e annotato la relativa massa, quest' ultimo verrà messo in forno per i tempi stabiliti nel capitolo *2.1 Piano sperimentale*.

2.3.4 Determinazione delle proprietà volumetriche

In questo capitolo vengono elencate le procedure per la determinazione delle proprietà volumetriche delle miscele prodotte, con lo scopo di valutare i vuoti presenti nel provino. La procedura utilizzata per lo studio è la seguente:

1. *Determinazione della massa volumica massima (UNI EN 12697-5)*

Si definisce massa volumica massima la massa per unità di volume, senza vuoti d'aria, di una miscela bituminosa ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica massima ρ_m del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando un procedimento matematico conformemente alla normativa UNI EN 12697-5, secondo cui:

$$\rho_m = \frac{100}{(p_a/\rho_a) + (p_b/\rho_b)}$$

dove:

- ρ_m: massa volumica massima della miscela in kg/m3;
- p_a: percentuale di aggregati nella miscela in m⁄m;
- ρ_a: massa volumica apparente degli aggregati in kg/m3;
- p_b: percentuale di legante nella miscela in m⁄m;
- ρ_b: massa volumica del legante a 25 °C in kg/m3.

2. *Determinazione della massa volumetrica apparente (UNI EN 12697-6)*

Si definisce massa volumica apparente la massa per unità di volume, inclusi i vuoti d'aria, di provino ad una temperatura di prova nota. Nel presente elaborato la massa volumica apparente ρ_b del conglomerato prodotto con la pressa a taglio giratoria è stata valutata utilizzando sia la procedura C(provino sigillato), sia la procedura D (procedura geometrica) in accordo con la normativa UNI EN 12697-6.

- *Procedura C: massa volumica apparente – provino sigillato*

Tale metodologia prevede le seguenti fasi:

- determinazione della massa del provino secco in aria (m1);

- scelta della massa volumica dell'acqua alla temperatura di prova (ρw);
- sigillatura del provino in modo che i vuoti interni del provino che fanno parte della composizione volumetrica del materiale non siano riempiti e che vi siano altri vuoti inclusi tra la sigillatura ed il provino o nel materiale sigillante. Una volta sigillato, il provino deve essere inaccessibile all'acqua quando sommerso. Per la sigillatura si impiega la cera di paraffina, che viene sciolta all'interno di una pentola, [Fig. 2.38]; successivamente ci si immerge il provino fino alla sua completa copertura.
- determinazione della massa del provino asciutto sigillato (m2);
- immersione del provino nel bagno d'acqua e determinazione della massa del provino sigillato immerso in acqua (m3), [Fig. 2.39].

Fig. 2.38 Scioglimento della paraffina

Fig. 2.39 Bagno d'acqua e bilancia per la pesata idrostatica

Terminata tale procedura si può calcolare la massa volumica apparente del provino sigillato (ρbsea) semplicemente utilizzando la seguente formula:

$$\rho_{bsea} = \left(\frac{m1}{\left(\frac{m2 - m3}{\rho w}\right) - \frac{m2 - m1}{\rho sm}}\right)$$

dove:

- ρb: massa volumica apparente sigillata in kg/m3;
- m1: massa del provino asciutto in g;
- m2: massa del provino sigillato asciutto in g;
- m3: massa del provino sigillato in acqua in g;
- ρw: massa volumica dell'acqua in kg/m3;
- ρsm: massa volumica del materiale sigillante (paraffina nel caso in esame) pari a 0,9 kg/dm3.

- *Procedura D: massa volumica apparente – provino sigillato*

La procedura D prevede di misurare le dimensioni del provino in millimetri e di determinare la massa del campione secco (m_1). La massa volumica geometrica (ρ_{bgeom}) per provini cilindrici si calcola come segue:

$$\rho_{bgeom} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \cdot h \cdot d^2} \cdot 10^6$$

dove:

- ρ_b: massa volumica apparente del provino in kg/m3;
- m_1: massa del provino asciutto in g;
- h: altezza del provino in mm;
- d: diametro del provino in mm.

3. *Determinazione del volume dei vuoti (UNI EN 12697-8)*

Le proprietà volumetriche delle miscele studiate nella presente indagine sono state determinate, in termini di contenuto di vuoti residui dei provini compattati, in accordo a

quanto prescritto dalla normativa UNI EN 12697-8. Il volume dei vuoti si ricava utilizzando la massa volumica massima e la massa volumica apparente mediante la seguente formula:

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \cdot 100$$

2.3.5 Prova di modulo a trazione indiretta (UNI EN 12697-26)

Nel capitolo seguente viene illustrato lo studio del modulo di rigidezza a trazione indiretta tramite l'apparecchiatura NAT (*Nottingham Asphalt Tester*). Tale apparecchiatura consente di applicare un carico di compressione in una direzione e di misurare la deformazione tramite trasduttori nella direzione ruotata di 90° rispetto a quella di applicazione del carico. La determinazione del modulo di rigidezza con il NAT avviene mediante una prova di trazione indiretta ripetuta. Nel corso della sperimentazione, le prove di modulo sono state eseguite secondo quanto stabilito dalla rispettiva normativa UNI EN 12697-26 con modalità a deformazione controllata. Le prove devono essere eseguite su almeno due diametri del provino (con un angolo tra i due diametri di 90°±2°). Il macchinario è collegato ad un computer e attraverso il software dell'apparecchiatura è possibile controllare il tempo di picco (rise time), il carico fissato, la deformazione di target fissata o il carico imposto, il coefficiente di Poisson, la temperatura di prova. Tramite un sistema di gestione verrà effettuata una taratura durante gli impulsi di condizionamento prima della prova vera e propria. Gli impulsi di condizionamento servono anche ad assestare il carico sulla superficie del campione. Nella prova di trazione indiretta ripetuta, il modulo del campione è funzione della sua stessa geometria, della deformazione orizzontale, del rise time, della temperatura di prova e del coefficiente di Poisson. Analizzando lo stato di sollecitazione si possono definire, in corrispondenza del diametro orizzontale, le sollecitazioni medie e massime nelle direzioni x (trazione) ed y (compressione) date dalle seguenti espressioni:

$$\sigma_{x,max} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \qquad \sigma_{x,media} = \frac{0{,}273 \cdot P}{d \cdot t}$$

$$\sigma_{y,max} = \frac{-6 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot t} \qquad \sigma_{y,media} = \frac{-P}{d \cdot t}$$

In cui P è il carico applicato, d è il diametro del campione e t è lo spessore del campione. Si può, inoltre, determinare il modulo di rigidezza elastica in funzione di tale distribuzione teorica delle sollecitazioni che può essere rappresentato in termini di deformazioni di un elemento soggetto ad uno stato biassiale di tensioni. La deformazione orizzontale ε_x dell'elemento è:

$$\varepsilon_{x,media} = \frac{\sigma_{x,media}}{E} - \nu \frac{\sigma_{y,media}}{E}$$

Dove ν è il coefficiente di Poisson e E è il modulo elastico del materiale.

La deformazione orizzontale dei campioni Δ si ottiene sostituendo le espressioni ricavate per le tensioni medie nella precedente formula, moltiplicando la deformazione media per il diametro del campione, si ottiene:

$$\Delta = \frac{0{,}273 \cdot P}{E \cdot t} + \nu \frac{P}{E \cdot t}$$

Da cui è possibile ricavare il modulo elastico del materiale, come indicato nelle seguente equazione:

$$E = \frac{P}{\Delta \cdot t} \cdot (0{,}273 + \nu)$$

La versione del software utilizzata fornisce anche un valore di modulo corretto da un fattore AF (Adjustment Factor), che tiene conto della forma dell'onda di carico impostata. Qualora il rapporto tra l'area sottesa dalla curva di carico e quella data dal prodotto del rise-time per il carico di picco non sia pari a 0,60±0,10, viene proposta una correzione al modulo ricavato attraverso la seguente equazione:

$$E' = E[1 - 0{,}322(\log(E) - 1{,}82)(0{,}60 - k)]$$

Dove E' è il modulo di rigidezza aggiustato ad un rapporto di 0,60 in MPa, k è il rapporto tra le aree e E è il modulo di rigidezza in MPa. Affinché la prova possa essere considerata correttamente eseguita, si devono ottenere curve di carico e di deformazione il più regolari possibile, i tempi di picco intorno ad una tolleranza di ±4 ms ed una deformazione di 5,0±0,2 µm.

Il modulo è influenzato dalle seguenti variabili:

- *temperatura:* affinché sia valida la formula per il calcolo del modulo E, occorre che quest'ultimo risulti uguale sia a compressione che a trazione. Questa affermazione può essere considerata vera solo per temperature sotto i 25°C. In questo studio le prove di modulo sono state eseguite alla temperatura di 20°C;
- *rise-time (tempo di picco):* a causa della natura viscoelastica del legante, la risposta meccanica dei conglomerati dipende fortemente dal tempo di applicazione del carico. In

particolare il rise-time, in prove di carico di tipo impulsivo, indica il tempo necessario al carico pulsante di raggiungere il valore massimo. Una variazione del tempo di picco su una prova di tipo impulsivo crea, sulla rigidezza del conglomerato, gli stessi effetti di una variazione della frequenza di carico su una prova di tipo ciclico (sinusoidale). La relazione che lega la frequenza di carico (espressa in Hz) con il tempo di picco (in ms) è la seguente:

$$f = \frac{1000}{4 \cdot \mathrm{r_i}}$$

- *deformazione orizzontale imposta:* a causa del comportamento non lineare, le proprietà meccaniche del conglomerato dipendono dal livello di deformazione imposta durante la prova. Nel caso in esame, le prove sono state effettuate imponendo una deformazione pari a 3 µm;
- *numero di colpi di condizionamento iniziale:* tali impulsi servono anche ad assestare le strisce di carico sulla superficie del campione; è necessario scegliere accuratamente il numero di colpi per il condizionamento iniziale. Utilizzando un basso numero di colpi si favoriscono tempi di prova più brevi, ma a discapito di misurazioni affidabili. Il BSI (British Standard Institute) suggerisce un numero di colpi di condizionamento pari a 5, ma da indagini sperimentali si è visto come questo numero di colpi non sia da ritenere sufficiente. Pertanto nella presente sperimentazione, tutte le prove sono state eseguite dopo 10 colpi iniziali di condizionamento.

Il macchinario è composto da vari elementi ed è posto all'interno di una camera climatica che permette il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di prova, nel caso in esame 20°C. La temperatura all'interno della camera, viene misurata tramite un apposito termometro a sonda collegato con un display digitale posto sul pannello superiore della macchina. L' elemento fondamentale è la cella di carico la quale è collegata al computer che la controlla e ne registra i dati. La cella di carico supporta un carico massimo pari a 20 kN a cui subito sotto è collegato il pistone che permette l'applicazione del carico alla testa di carico posta a contatto con il provino.

Fig. 2.41: Cella di carico del NAT con al di sotto il castelletto contenente il provino

Per il montaggio dei trasduttori in posizione corretta, si utilizzano due strumenti illustrati in figura 2.42. In tale illustrazione si possono notare i trasduttori (2) che vengono inseriti nei loro appositi fori, le viti che consentono di mettere in posizione corretta i trasduttori (1), il telaio al cui interno va posto il provino da testare (3), i morsetti di fissaggio che collegano il provino al telaio (4), il canale che permette il centramento del provino (5), le barre che permettono di posizionare i trasduttori a metà del provino (6), le viti che tengono in posizioni tali barre (7) ed infine la leva che permette di abbassare il supporto al telaio che sostiene i trasduttori (8).

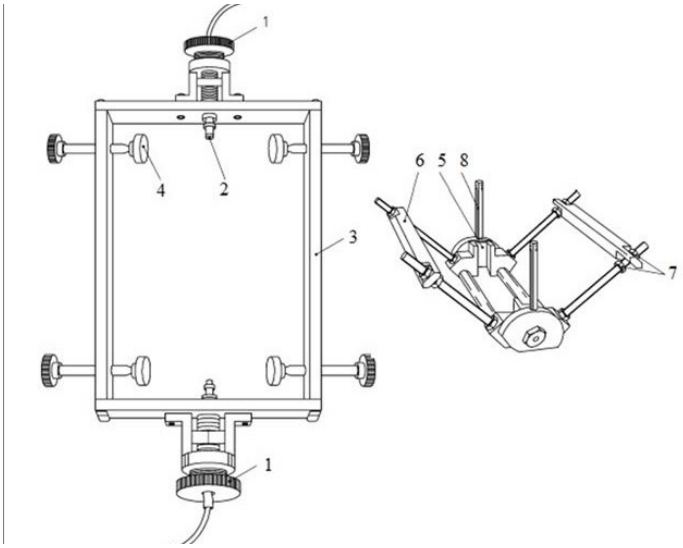


Fig. 2.42: Componenti del castelletto

Prima di iniziare la procedura atta alla realizzazione del test, le altezza dei provini sono state misurate tramite calibro con una precisione non inferiore a 0,1 mm, in quanto l'altezza finale derivante dal compattatore giratorio risulta essere imprecisa. Per tale dato, si è misurata l'altezza su quattro punti, e si è presa come altezza del provino da testare la media dei quattro valori misurati. Si illustra ora in dettaglio come è stata effettuata la misurazione del modulo a trazione indiretta. Innanzitutto è stato usato un software grazie al quale è possibile il controllo di tutte le fasi della prova. La schermata iniziale del software è quella indicata in figura 2.43.

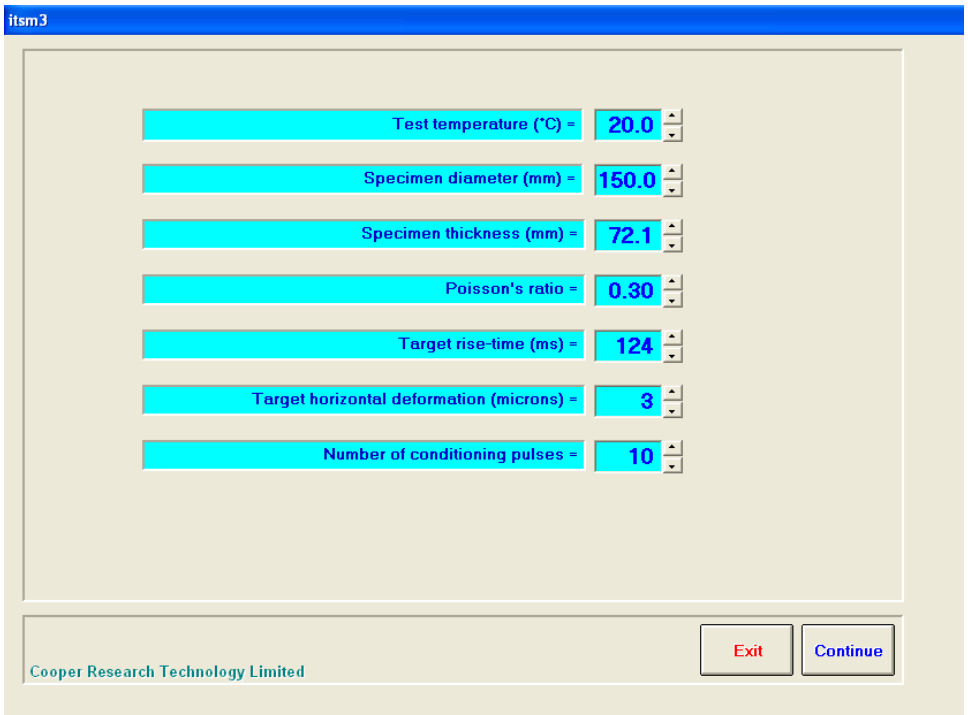


Figura 2.43: Schermata iniziale del software ITSM con dati input

La prima fase di prova consiste quindi nell'inserimento dei dati relativi al provino da testare all'interno del software. Come si può notare dalla figura precedente vanno inseriti i seguenti parametri:

- Test Temperature [°C]: temperatura alla quale viene effettuata la prova;
- Specimen Diameter [mm]: diametro del provino sottoposto a test;
- Specimen Thickness [mm]: altezza del provino sottoposto a test;
- Poisson's Ratio: modulo di Poisson. Come definito dalla norma, in mancanza di una sua specifica misurazione è assunto pari a 0,35;
- Target Rise-Time [ms]: tempo in ms che la macchina impiega per applicare il carico di picco necessario a raggiungere la deformazione indicata;

- Target horizontal Deformation [µm]: deformazione che la macchina deve far raggiungere al provino;
- Number of Conditioning Pulses : numero di impulsi di pre-carico, ovvero impulsi utili alla macchina ad auto-calibrarsi per far raggiungere al provino una deformazione di 3 µm.

Nella finestra più piccola in alto a destra va invece inserita la denominazione del provino, cioè il nome di riferimento che comparirà nel rapporto finale. Dopo aver inserito i dati appena elencati cliccando su Continue si passa alla schermata successiva, figura 2.44. Essa è utile al controllo del pistone pneumatico; infatti una volta che il provino è stato montato sull'apposito "castelletto" con la relativa barra di carico posta al di sopra, si deve portare a contatto con essa il pistone che permette l'applicazione del carico. Questa operazione è effettuata automaticamente dal software, cliccando sul pulsante *Make Contact.*

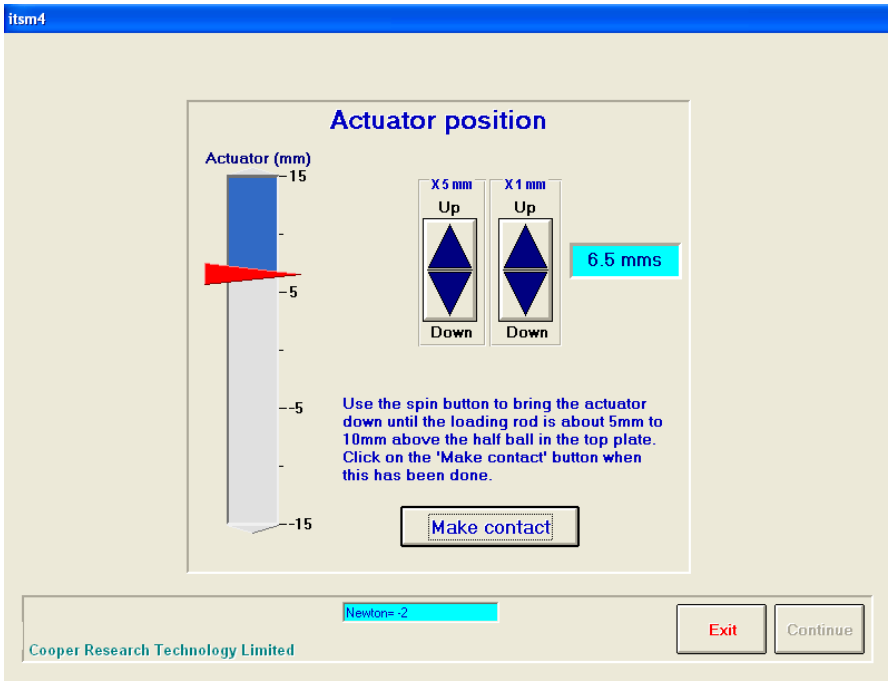


Figura 2.44: Schermata con il comando "Make contact"

La schermata successiva è utile al controllo dei trasduttori; come si può notare dalla Figura 2.45, i trasduttori per misurare correttamente la deformazione vanno regolati finché le due freccette diventano rosse come in Figura 2.46. Se i trasduttori non fossero così regolati la macchina misurerebbe una deformazione che non è quella reale del provino.

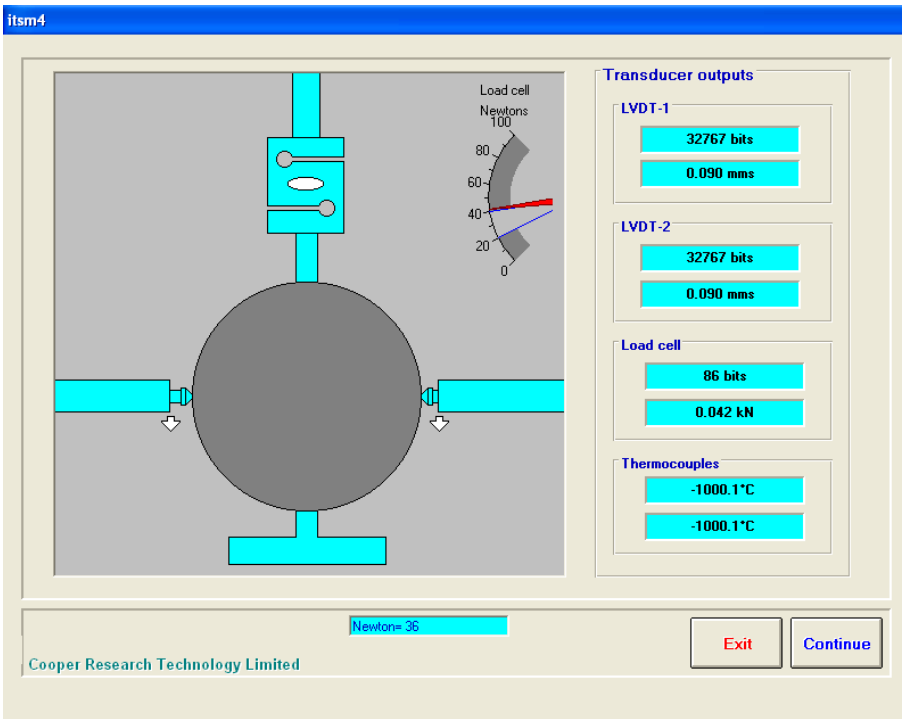


Fig. 2.45: Schermata prima della regolazione dei trasduttori

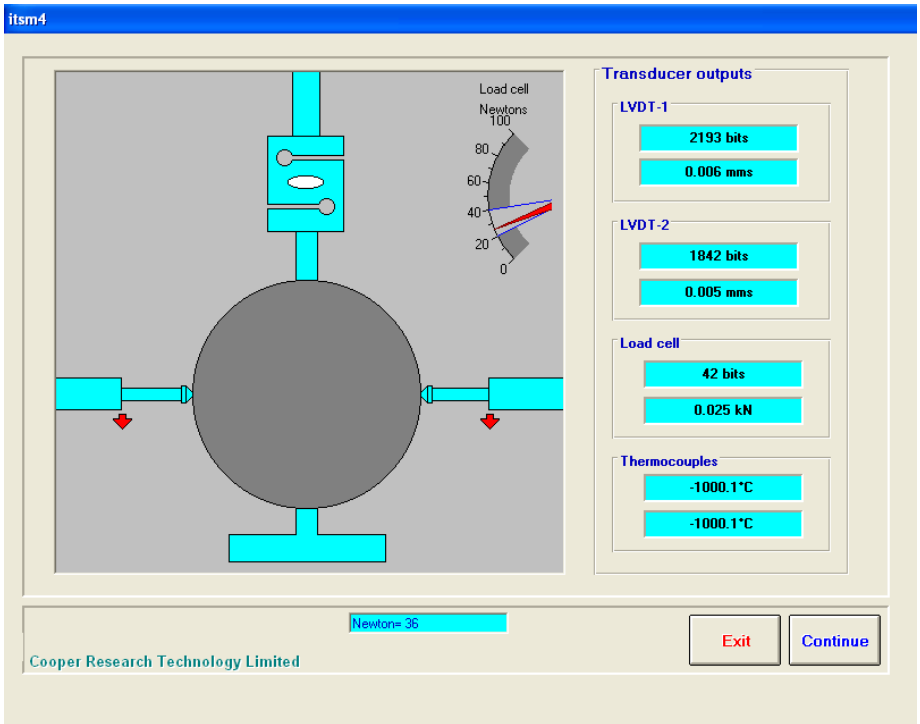


Figura 2.46: Schermata dopo la regolazione dei trasduttori

A questo punto si prosegue il test passando alla schermata visualizzata in figura 2.47, dove vengono visualizzati i dati che la macchina misura ed applica durante i 10 impulsi di pre-carico.

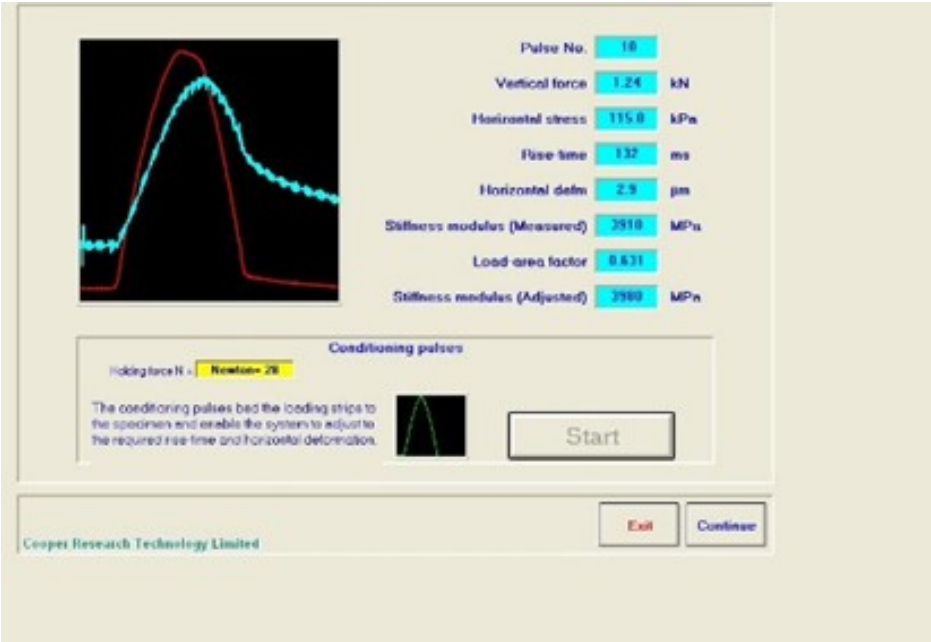
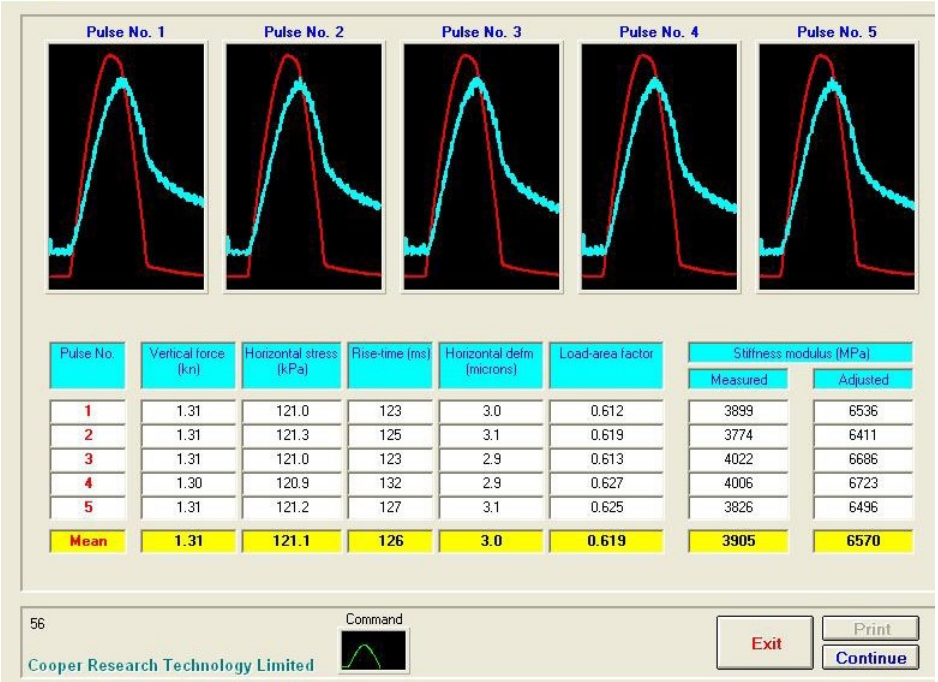


Figura 2.47: Schermata degli impulsi pre-carico

Infine si clicca su Start Test per eseguire la prove e al termine vengono visualizzati i 5 impulsi e i relativi risultati, Fig. 2.48. Ad ogni impulso si visualizzano tutti i parametri descritti appena sopra, con l'aggiunta dei valori medi di ogni parametro.



Pulse No.	Vertical force (kn)	Horizontal stress (kPa)	Rise-time (ms)	Horizontal defm (microns)	Load-area factor	Stiffness modulus (MPa)	
						Measured	Adjusted
1	1.31	121.0	123	3.0	0.612	3899	6536
2	1.31	121.3	125	3.1	0.619	3774	6411
3	1.31	121.0	123	2.9	0.613	4022	6686
4	1.30	120.9	132	2.9	0.627	4006	6723
5	1.31	121.2	127	3.1	0.625	3826	6496
Mean	**1.31**	**121.1**	**126**	**3.0**	**0.619**	**3905**	**6570**

Figura 2.48: Applicazione dei 5 impulsi di prova e visualizzazione dei risultati

Dopo aver preso nota dei risultati ottenuti, il provino viene tolto da dentro al macchinario e viene smontato il castelletto, per ripetere il test sul secondo diametro. Il software, ripeterà tutti i passaggi sopra elencati per il primo diametro anche per il secondo. Una volta ottenuti i risultati relativi anche al secondo diametro si effettua un confronto. Secondo la norma i moduli calcolati sui due diametri possono differire fino ad un massimo del 20%.

2.3.6 Prova di Trazione Indiretta (UNI EN 12697-23)

In questo capitolo viene illustrata la prova di Trazione, che può avvenire a una temperatura compresa tra i 3 e i 5 °C; nel caso in esame la temperatura è stata impostata a 25°C. Tale prova consiste nella rottura del provino tramite compressione, fino ad arrivare alla rottura, la quale avviene per trazione in direzione perpendicolare a quella di applicazione del carico. Come detto precedentemente la prova è stata eseguita con condizionamento dei provini a 25°C; infatti prima della realizzazione della prova, i provini vengono tenuti per almeno 3 ore nella camera climatica a 25°C. Come si può notare dalla figura 2.49, l'apparecchiatura utilizzata per l'esecuzione di tale prova è costituita da un sistema di carico, formato da due piatti paralleli infinitamente rigidi: la testa di carico inferiore è fissata ad una base munita di due guide verticali lungo le quali scorre, senza apprezzabile attrito mediante due manicotti, la testa di carico superiore.

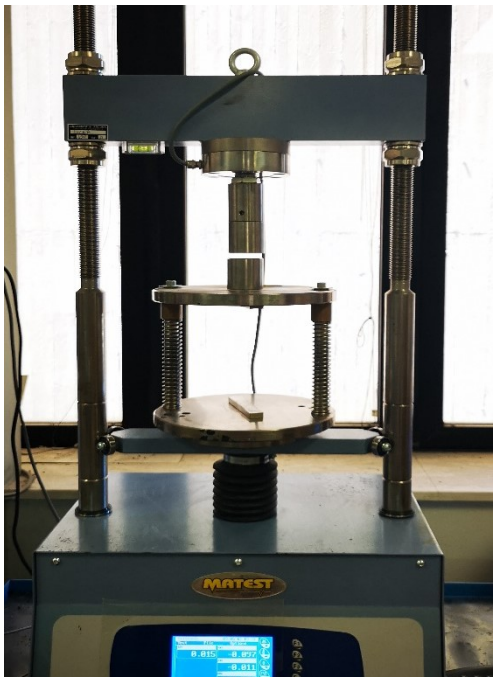


Fig. 2.49 Apparecchiatura per la prova di trazione Indiretta

Un volta sistemato il provino in maniera corretta, la prova può proseguire tramite un pannello di controllo oppure in remoto con un computer tramite il software *UTMII*. Nel controllo in remoto, si impostano parametri di prova si ottengono in output oltre alla curva carico-corsa, tutti i punti che formano tale curva, il carico di rottura a compressione e la deformazione a compressione. I principali parametri di prova sono il diametro e altezza del provino, velocità di avanzamento e carico di fine prova. Durante la prova, la testa di carico inferiore viene fatta avanzare ad una velocità costante di 50±2 mm⁄min. Il sistema di controllo, mediante due comparatori, permette di misurare sia la deformazione (verticale ed orizzontale) subita dal provino durante l'applicazione del carico, che il carico stesso. La prova, in accordo con la norma UNI EN 12697-23, viene svolta in controllo di deformazione. La prova termina quando avviene la rottura del provino, [Fig. 2.50], successivamente si chiede al software di calcolare e archiviare i dati; nelle figure seguenti si possono vedere i passaggi principali eseguiti con UTM II.

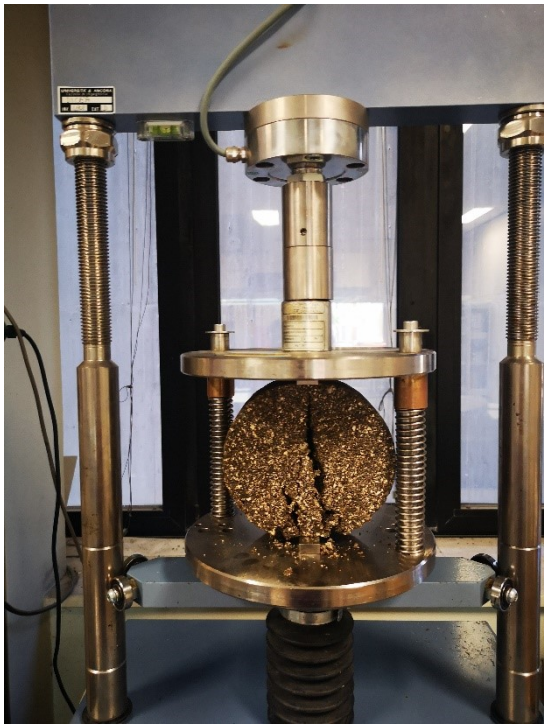


Fig. 2.50 Provino durante la fase di rottura

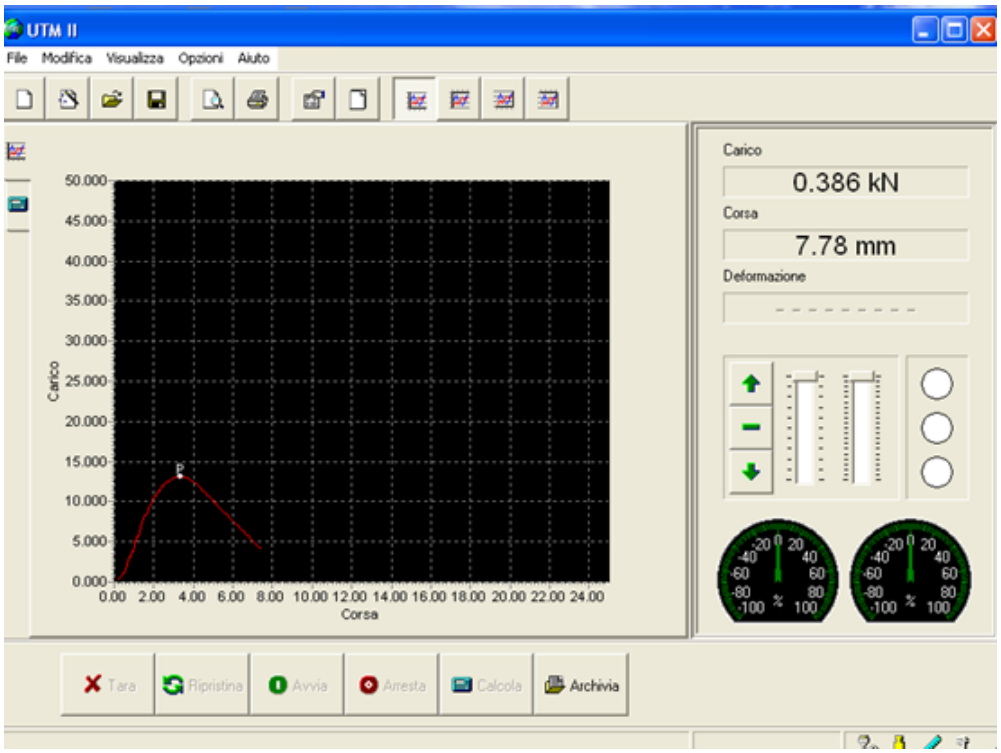


Fig. 2.51 Curva sforzo- deformazione ottenuta dopo l'applicazione del carico

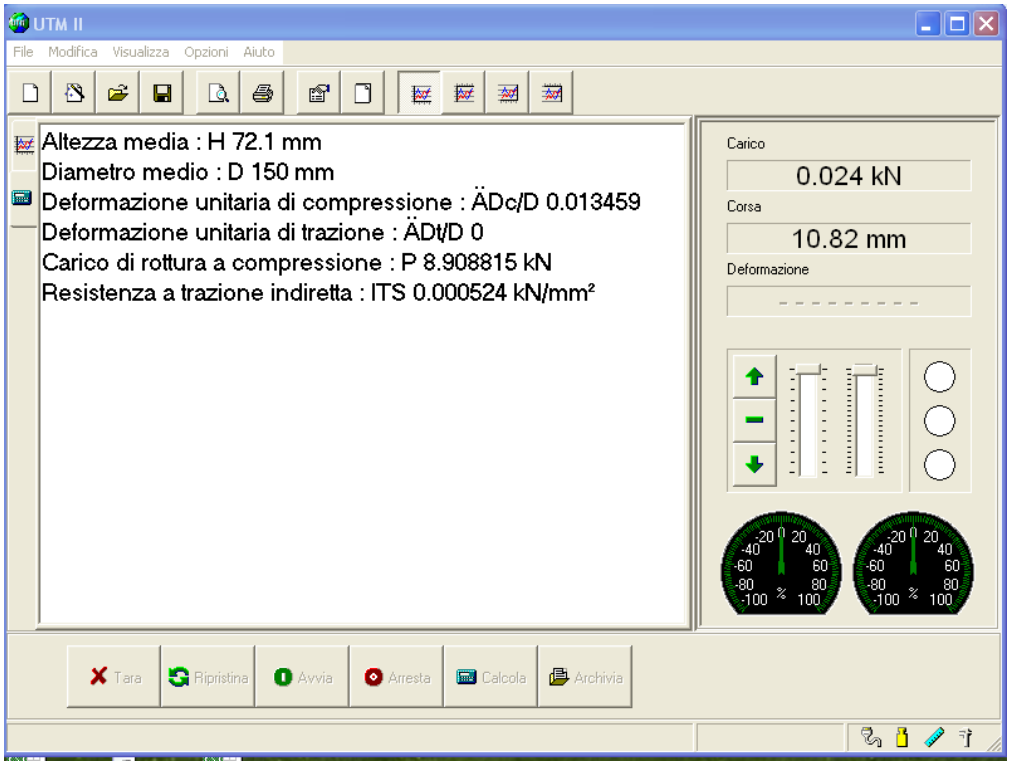


Fig. 2.52 Schermata con i dati elaborati dal software

Fig. 2.53 Provini rotti a seguito della prova a trazione indiretta

Dopo aver analizzato i risultati ottenuti dalla prova si passa al calcolo della Resistenza a Trazione Indiretta ITS (Indirect Tensile Strength), cioè la massima tensione di trazione applicata al provino, a partire dal carico di picco e dalle dimensioni del provino, mediante la seguente espressione:

$$\mathrm{ITS} = \frac{2 \cdot \mathrm{P_{max}}}{\pi \cdot \mathrm{t} \cdot \mathrm{D}}$$

dove Pmax è il carico massimo in N, t e d: altezza e diametro del provino in mm.

Successivamente, si determina il coefficiente di trazione indiretta CTI (Indirect Tensile Coefficient) con la seguente equazione:

$$\mathrm{CTI} = \frac{\pi \cdot \mathrm{d} \cdot \mathrm{ITS}}{2 \cdot \mathrm{Dt}}$$

dove Dt è la deformazione verticale a rottura in mm.

Noti tutti i punti deformazione verticale-carico della prova, è possibile ricostruire la curva di carico e calcolare l'energia di frattura, come area sottesa da tale curva. In fine si calcola ITS ratio (ITSr) come il rapporto tra la Resistenza a trazione indiretta del provino condizionato in acqua e quella del provino condizionato in aria, con la seguente formula:

$$\mathrm{ITSr} = \frac{\mathrm{ITS\ wet}}{\mathrm{ITS\ dry}} * 100$$

Capitolo 3 – Risultati sperimentali

In questo capitolo vengono illustrati i risultati sperimentali, con l'utilizzo di tabelle e grafici, ottenuti dalle procedure di laboratorio elencate nel *Capitolo 2.3.*

3.1 Elaborazione dati del picnometro

In seguito vengono illustrati i risultati della procedura descritta nel Capitolo 2.3.2. Sono stati utilizzati fogli di calcoli Excel all'interno del quale sono stati inseriti i dati ottenuti dalla prova

M1: massa netta dell'aggregato in condizioni di superficie satura

M2: massa del picnometro + aggregato + acqua fino al menisco

M3: massa del picnometro pieno d'acqua (la temperatura dell'acqua non deve differire di 2°C da T1)

M4: massa netta dell'aggregato asciutto post essiccazione nel forno

Mdry: massa lorda letta sulla bilancia degli aggregati in cond. asciutta post essiccazione nel forno

Mssa: massa lorda letta sulla bilancia degli aggregati in condizione di superficie satura

T1: temperatura dell'acqua in corrispondenza della pesata per M2 (22°C+-3°C)

tara1: tara della teglia di alluminio (per aggregati fini è somma teglia+spatola+cono+pistone)

ρw: massa volumica dell'acqua a T1

ρa: massa volumica apparente dei granuli

ρrd: massa volumica dei granuli pre-essiccati in stufa

ρssd: massa volumica dei granuli in condizione SSA

WA_{24}: Assorbimento dell'acqua

La massa volumica dell'acqua viene calcolata in relazione alla temperatura T1, tramite la tabella 3.1.

Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione *K*	Massa volumica dell'acqua kg/m³	Temperatura dell'acqua °C	Fattore di correzione *K*	Massa volumica dell'acqua kg/m³
10	1,002 7	999,8	20	1,001 2	998,3
11	1,002 6	999,7	21	1,001 0	998,1
12	1,002 5	999,6	22	1,000 7	997,8
13	1,002 3	999,4	23	1,000 5	997,6
14	1,002 2	999,3	24	1,000 3	997,4
15	1,002 1	999,2	25	1,000 0	997,1
16	1,001 9	999,0	26	0,999 7	996,8
17	1,001 7	998,8	27	0,999 5	996,6
18	1,001 6	998,7	28	0,999 2	996,3
19	1,001 4	998,5	29	0,998 9	996,0
20	1,001 2	998,3	30	0,998 6	995,7

Tab. 3.1 Determinazione della massa volumica dell'acqua in relazione alla temperatura

- RAP FINO

- Pezzatura compresa tra 4 mm- 31,5 mm

M1 [g]	694,1
M2 [g]	4217,5
M3 [g]	3799,7
M4 [g]	682,4
T1 [°C]	21
ρw [g/cm3]	0,9981
tara1 [g]	22,5
Mssa [g]	716,6
Mdry [g]	704,9

ρA [g/cm3]	2,57
ρRD [g/cm3]	2,47
ρSSD [g/cm3]	2,51
WA24	1,71

T1	21
Tinf	21
ρwinf [g/cm3]	998,1
Tsup	21
ρwsup [g/cm3]	998,1
ρw [g/cm3]	998,10

Tab. 3.2 Elaborazione Picnometro pezzatura fina compresa tra 4 mm- 31,5 mm

- Pezzatura compresa tra 0,063mm- 4 mm

M1 [g]	645,2
M2 [g]	4187,2
M3 [g]	3800,1
M4 [g]	635,3
T1 [°C]	21
ρw [g/cm3]	0,9981
tara1 [g]	982,5
Mssa [g]	1627,7
Mdry [g]	1617,8

ρA [g/cm3]	2,55
ρRD [g/cm3]	2,46
ρSSD [g/cm3]	2,50
WA24	1,56

T1	21
Tinf	21
ρwinf [g/cm3]	998,1
Tsup	21
ρwsup [g/cm3]	998,1
ρw [g/cm3]	998,10

Tab. 3.3 Elaborazione Picnometro pezzatura fina compresa tra 0,063 mm- 4 mm

- RAP GROSSO

- Pezzatura compresa tra 4mm- 31,5mm

M1 [g]	658,6
M2 [g]	4198,7
M3 [g]	3801,5
M4 [g]	645,6
T1 [°C]	21,6
ρw [g/cm3]	0,99798
tara1 [g]	24,1
Mssa [g]	682,7
Mdry [g]	669,7

ρA [g/cm3]	2,59
ρRD [g/cm3]	2,46
ρSSD [g/cm3]	2,51
WA24	2,01

T1	21,6
Tinf	20
ρwinf [g/cm3]	998,3
Tsup	21
ρwsup [g/cm3]	998,1
ρw [g/cm3]	997,98

Tab. 3.4 Elaborazione Picnometro pezzatura grossa compresa tra 4 mm- 31,5 mm

- Pezzatura compresa tra 0,063 mm- 4 mm

M1 [g]	649,3
M2 [g]	3642,4
M3 [g]	3252,2
M4 [g]	639,9
T1 [°C]	22
ρw [g/cm3]	0,9978
tara1 [g]	798,3
Mssa [g]	1447,6
Mdry [g]	1438,2

ρA [g/cm3]	2,56
ρRD [g/cm3]	2,46
ρSSD [g/cm3]	2,50
WA24	1,47

T1	22
Tinf	22
ρwinf [g/cm3]	997,8
Tsup	23
ρwsup [g/cm3]	997,6
ρw [g/cm3]	997,80

Tab. 3.5 Elaborazione Picnometro pezzatura grossa compresa tra 0,063 mm- 4 mm

- Sabbia calcarea

- Pezzatura compresa tra 4mm- 31,5mm

M1 [g]	588
M2 [g]	3642,7
M3 [g]	3248,5
M4 [g]	579,9
T1 [°C]	22
ρw [g/cm3]	0,9978
tara1 [g]	27,5
Mssa [g]	615,5
Mdry [g]	607,4

ρA [g/cm3]	3,12
ρRD [g/cm3]	2,99
ρSSD [g/cm3]	3,03
WA24	1,40

T1	22
Tinf	22
ρwinf [g/cm3]	997,8
Tsup	22
ρwsup [g/cm3]	998,7
ρw [g/cm3]	997,80

Tab. 3.6 Elaborazione Picnometro Sabbia calcarea compresa tra 4 mm- 31,5 mm

- Pezzatura compresa tra 0,063 mm- 4 mm

M1 [g]	606,6
M2 [g]	3662,3
M3 [g]	3250,8
M4 [g]	601,2
T1 [°C]	22
ρw [g/cm3]	0,9978
tara1 [g]	537,4
Mssa [g]	1144
Mdry [g]	1138,6

ρA [g/cm3]	3,16
ρRD [g/cm3]	3,07
ρSSD [g/cm3]	3,10
WA24	0,90

T1	22
Tinf	22
ρwinf [g/cm3]	997,8
Tsup	22
ρwsup [g/cm3]	997,8
ρw [g/cm3]	997,80

Tab. 3.7 Elaborazione Picnometro Sabbia calcarea compresa tra 0,063 mm- 4 mm

3.2 Elaborazione delle proprietà volumetriche

In seguito verranno illustrati i dati ottenuti per valutare le caratteristiche volumetriche con lo scopo di valutare i vuoti presenti nel provino; Tale studio è stato condotto solo sui provini con maturazione a 3 giorni in forno a 40 °C, tramite le due procedure: la procedura C (provino sigillato), la procedura D (procedura geometrica) in accordo con la normativa UNI EN 12697-6.

Codice provino	ρb_{geom} [g/cm3]	ρb,sea [g/cm3]	Vm,geom [%]	Vm,sea [%]
CM4.5,F4,3/4	2,139	2,217	13,7	10,5
CM4.5,F3,3/4	2,136	2,194	13,8	11,5
CM4,F3.5,3/4	2,150	2,189	13,3	11,7
CM4,F3,3/4	2,152	2,206	13,2	11,0
CM 3/4	2,112	2,199	14,8	11,3

Tab. 3.8 Dati elaborati della procedure a provino sigillato e procedura geometrica per determinare il volume dei vuoti

Dove:

- ρgeom.: massa volumica geometrica in g/cm3;
- ρsea: massa volumica provino sigillato in g/cm3;
- Vm, geom.: volume dei vuoti in %;
- Vm, sea: volume dei vuoti provino sigillato in %;

3.3 Mix Design miscele a freddo

La curva granulometrica di progetto della miscela dei provini utilizzati per lo sviluppo della presente tesi è stata studiata in modo tale da rientrare all'interno del fuso di riferimento del Capitolato di Bolzano. Tale fuso granulometrico è costituito da due curve granulometriche ideali che fissano il limite superiore e quello inferiore. La curva granulometrica di progetto risulterà idonea se ricade all'interno del fuso. Il Capitolato riporta un fuso per aggregati di dimensioni maggiori rispetto a quelle degli aggregati utilizzati nel presente studio; pertanto il Fuso riportato nel capitolato di Bolzano è stato modificato al Dmax pari a 22,5 mm. I setacci e le relative percentuali di passante di riferimento (max e min) che determinano il fuso di riferimento sono riportati in Tabella 3.9.

Fuso Base Bolzano aggiustato Dmax 22,5					
Setaccio [mm]	Min [mm]	Max [mm]	Centro fuso	Mix di progetto	Errore
80	100	100	100	100,0	0,0
63	95	100	97,5	100,0	6,3
31,5	85	100	92,5	97,9	28,9
16	70	95	83	90,3	60,5
8	50	75	63	66,8	18,1
4	30	42	36	37,0	0,9
2	20	35	28	21,9	31,2
0,5	10	18	14	9,7	18,2
0,063	4	8	6	5,3	0,4
					164,6

Tab. 3.9 Tabella di riferimento del Capitolato di Bolzano

La curva granulometrica di progetto è stata ottenuta aggiungendo la sabbia calcarea e il filler di recupero al RAP fino e al RAP grosso, presenti secondo le seguenti percentuali:

- RAP grosso 40%
- RAP fino 40%
- Sabbia calcarea 17%
- Filler di recupero 3%

Per ogni miscela è stata elaborata una precisa ricetta contenente le percentuali dei materiali utilizzati nel dettaglio. Le ricette sono state illustrate nel *Capitolo 2.3.3.* Con l'aggiunta della sabbia calcarea e del filler, la curva di progetto ricade nel fuso, come si può vedere dai seguenti grafici con le varie percentuali di filler. Inoltre, i risultati dell'analisi granulometrica del RAP grosso, RAP fino, Sabbia calcarea e del Filler di recupero sono stati esposti rispettivamente nei *Capitoli 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3,* e vengono riassunti nelle seguenti tabelle.

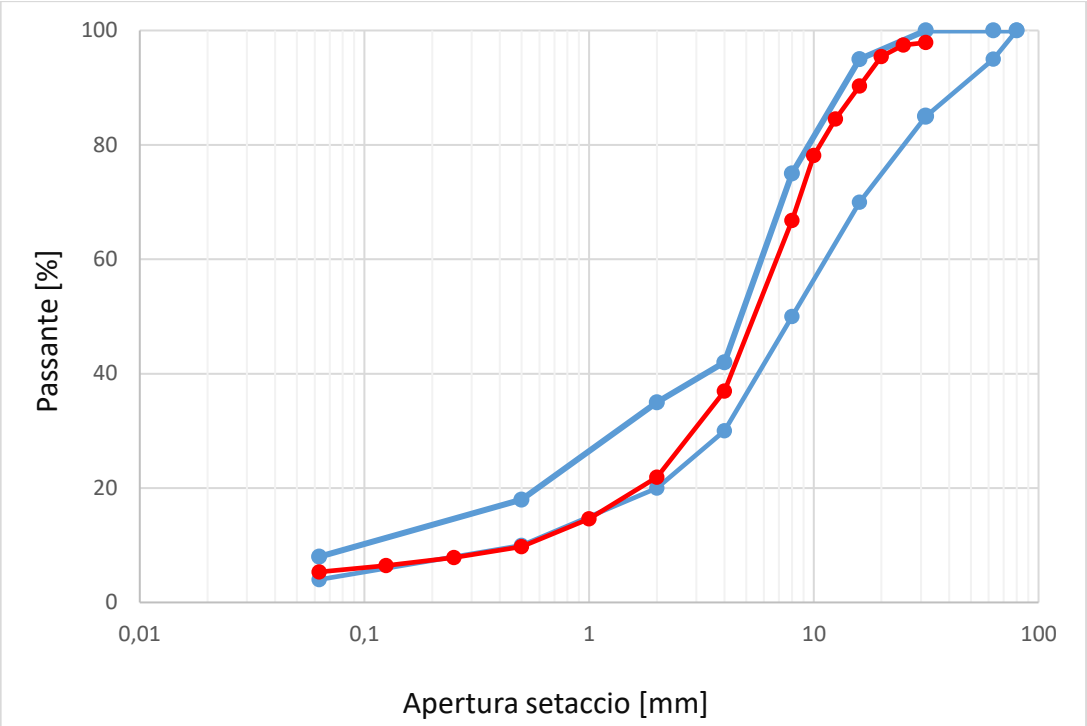


Fig. 3.1 Curva di progetto che ricade nel fuso, filler 3%

	RAP grosso		RAP fino		Sabbia	Filler	totale
	>4						
%fresati	40%	0%	40%	0%	17%	3%	100%
setaccio	%passante						
31,5	94,7	100,0	100,0	100,0	100	100	97,9
25	93,6	100,0	100,0	100,0	100	100	97,4
20	88,6	100,0	100,0	100,0	100	100	95,4
16	75,7	100,0	100,0	100,0	100	100	90,3
12,5	63,3	100,0	98,0	100,0	100	100	84,5
10	50,4	100,0	95,0	100,0	100	100	78,2
8	35,2	100,0	81,7	100,0	100	100	66,8
4	0,0	100,0	45,6	100,0	92,5	100	37,0
2	0,0	48,8	21,7	47,4	60,4	99	21,9
1	0,0	23,0	11,7	25,4	41,5	95,4	14,6
0,5	0,0	12,3	7,9	17,0	22,5	91,4	9,7
0,25	0,0	7,8	6,3	13,6	16,0	86,1	7,8
0,125	0,0	4,6	5,1	10,9	11,8	79,2	6,4
0,063	0,0	2,6	4,2	9,0	9,2	69,5	5,3

Tab. 3.10 Tabella riassuntiva dell'analisi granulometrica, filler 3 %

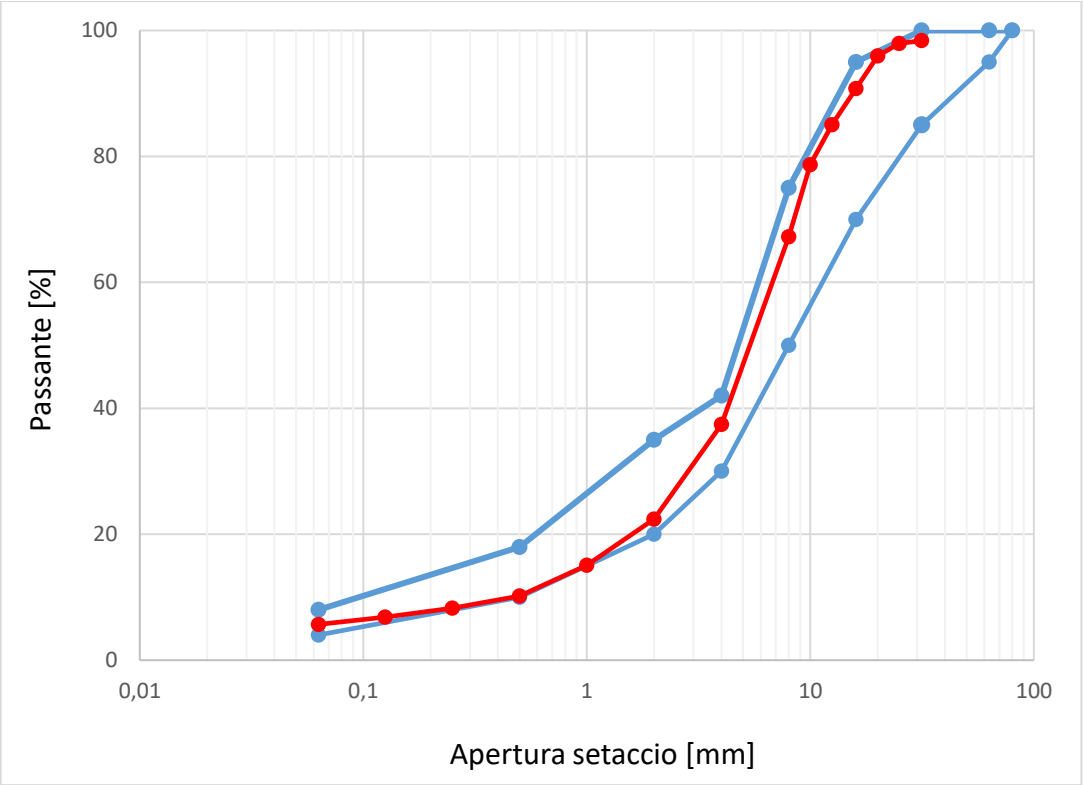


Fig. 3.2 Curva di progetto che ricade nel fuso, filler 4%

	RAP grosso		RAP fino		Sabbia	Filler	totale
	>4						
%fresati	40%	0%	40%	0%	17%	4%	101%
setaccio	%passante						
31,5	94,7	100,0	100,0	100,0	100	100	98,9
25	93,6	100,0	100,0	100,0	100	100	98,4
20	88,6	100,0	100,0	100,0	100	100	96,4
16	75,7	100,0	100,0	100,0	100	100	91,3
12,5	63,3	100,0	98,0	100,0	100	100	85,5
10	50,4	100,0	95,0	100,0	100	100	79,2
8	35,2	100,0	81,7	100,0	100	100	67,8
4	0,0	100,0	45,6	100,0	92,5	100	38,0
2	0,0	48,8	21,7	47,4	60,4	99	22,9
1	0,0	23,0	11,7	25,4	41,5	95,4	15,6
0,5	0,0	12,3	7,9	17,0	22,5	91,4	10,6
0,25	0,0	7,8	6,3	13,6	16,0	86,1	8,7
0,125	0,0	4,6	5,1	10,9	11,8	79,2	7,2
0,063	0,0	2,6	4,2	9,0	9,2	69,5	6,0

Tab. 3.11 Tabella riassuntiva dell'analisi granulometrica, filler 4 %

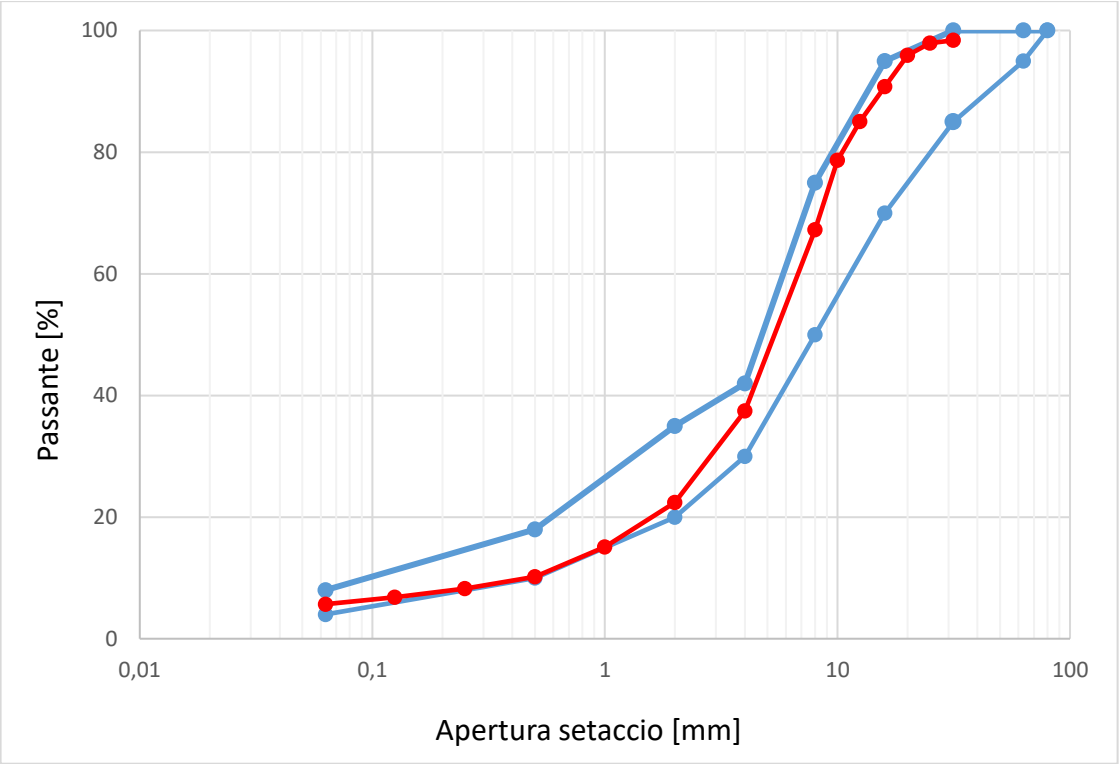


Fig. 3.3 Curva di progetto che ricade nel fuso, filler 3,5%

	RAP grosso		RAP fino		Sabbia	Filler	totale
	>4						
%fresati	40%	0%	40%	0%	17%	3,5%	101%
setaccio	%passante						
31,5	94,7	100,0	100,0	100,0	100	100	98,4
25	93,6	100,0	100,0	100,0	100	100	97,9
20	88,6	100,0	100,0	100,0	100	100	95,9
16	75,7	100,0	100,0	100,0	100	100	90,8
12,5	63,3	100,0	98,0	100,0	100	100	85,0
10	50,4	100,0	95,0	100,0	100	100	78,7
8	35,2	100,0	81,7	100,0	100	100	67,3
4	0,0	100,0	45,6	100,0	92,5	100	37,5
2	0,0	48,8	21,7	47,4	60,4	99	22,4
1	0,0	23,0	11,7	25,4	41,5	95,4	15,1
0,5	0,0	12,3	7,9	17,0	22,5	91,4	10,2
0,25	0,0	7,8	6,3	13,6	16,0	86,1	8,3
0,125	0,0	4,6	5,1	10,9	11,8	79,2	6,8
0,063	0,0	2,6	4,2	9,0	9,2	69,5	5,7

Tab. 3.12 Tabella riassuntiva dell'analisi granulometrica, filler 4 %

3.4 Miscela CM 3,5%, filler 3%

Successivamente verranno illustrati i risultati sperimentali della Pressa a taglio giratoria e della prova di Trazione indiretta relativi ai provini realizzati con l'emulsione bituminosa CM al 3,5% e filler 3%, tramite grafici che rappresentano la compattazione delle curve, la perdita di umidità e la rottura del provino, dove:

- n° rivoluzioni [N] sono il numero di giro che compie la fustella nella pressa a taglio giratoria;
- Altezza del campione [mm] rappresenta l'altezza del provino in corrispondenza di una precisa rivoluzione;
- Tara 1 [g] è la massa della fustella più il lubrificante;
- Tara 2 [g] corrisponde alla massa dei dischetti di carta;
- Tara 3 [g] è il peso del piattino su cui viene messo il provino;
- M1 [g] è la massa del provino non compattato più il peso della fustella;
- M2 [g] è la massa del provino dopo la compattazione più il peso della fustella;
- M3 [g] è la massa del provino dopo x giorni più il peso del piattino;
- M è la massa netta del provino;
- Loss è l'umidità;
- P [KN] e Δv [mm] sono rispettivamente il carico e lo spostamento nella prova di Trazione indiretta;

3.4.1 Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in aria, [provino CM1]

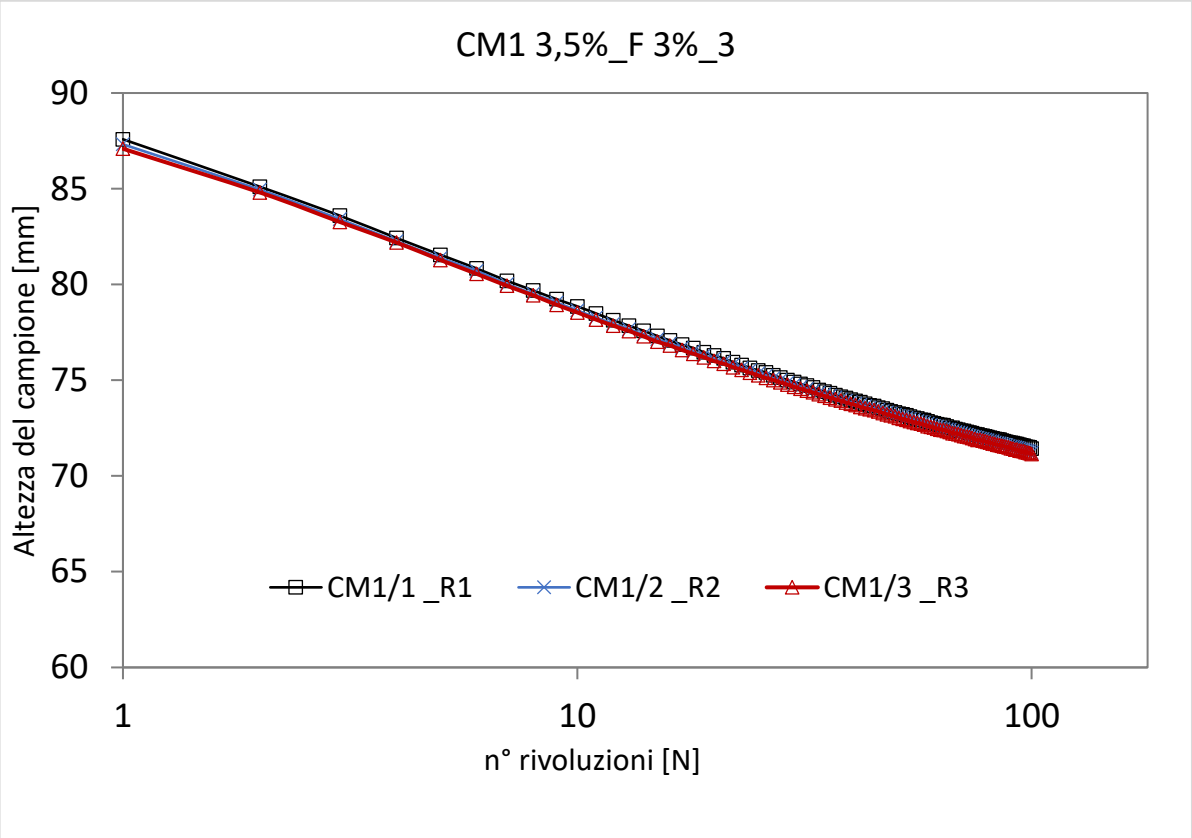


Fig. 3.4 Curve di compattazione Provini CM1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24827	-	-	2802	-
	0	-	-	-	-	49	2851	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2751	2702	3,50%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24824	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	46	2848	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2749	2700	3,57%
3	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24826	-	-	2801	-
	0	-	-	-	-	47	2849	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2744	2695	3,75%

Tab. 3.13 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

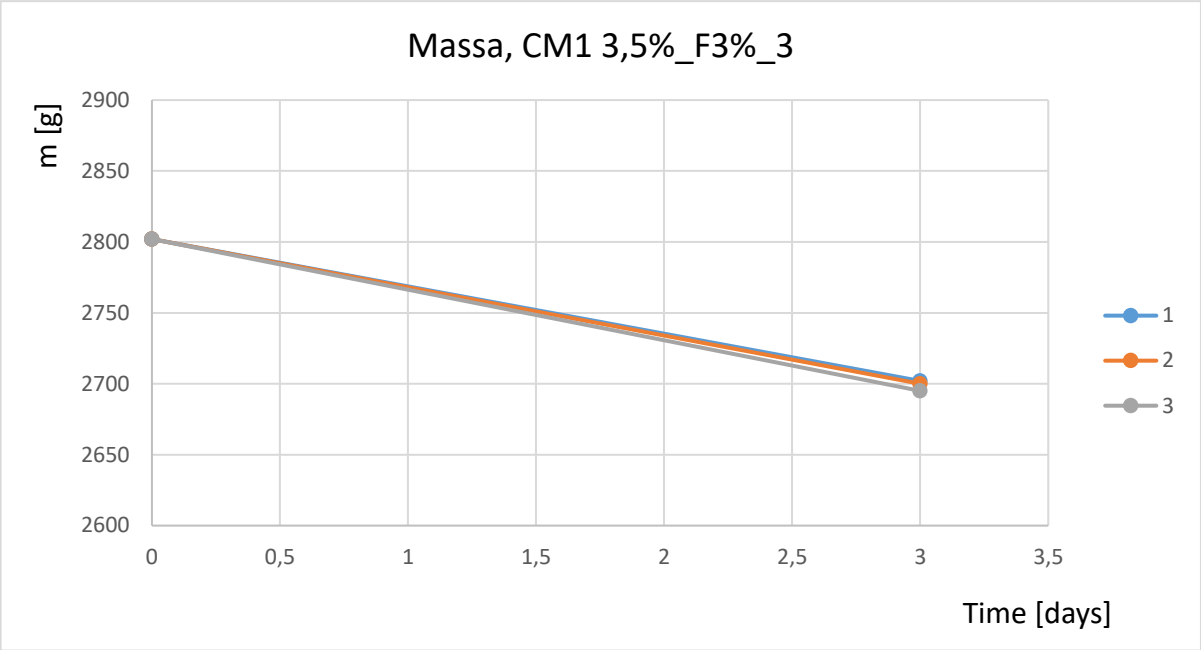


Fig. 3.5 Andamento della massa nel tempo, Provini CM1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

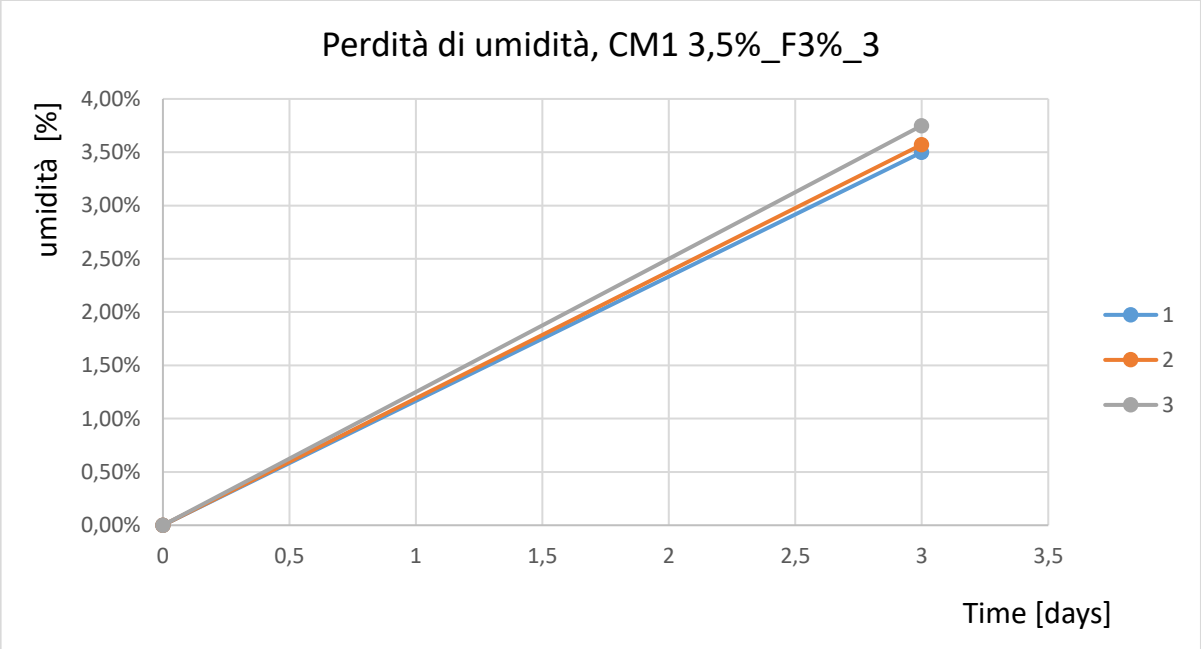


Fig. 3.6 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

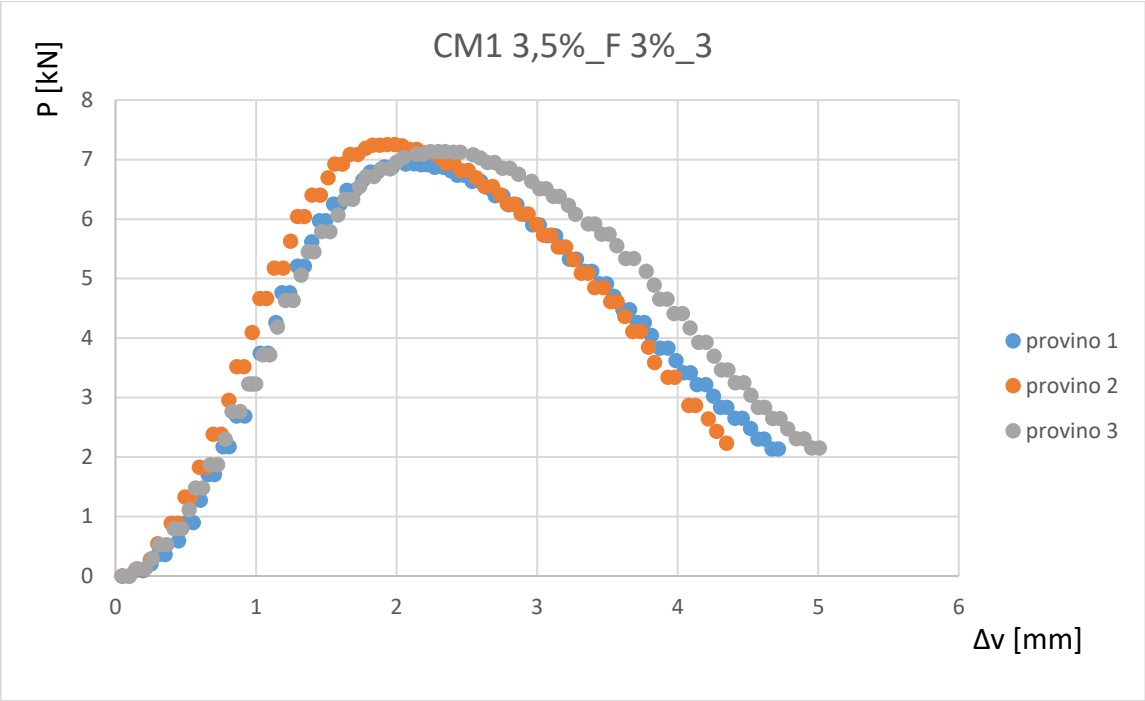


Fig. 3.7 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini CM1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

3.4.2 Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM2]

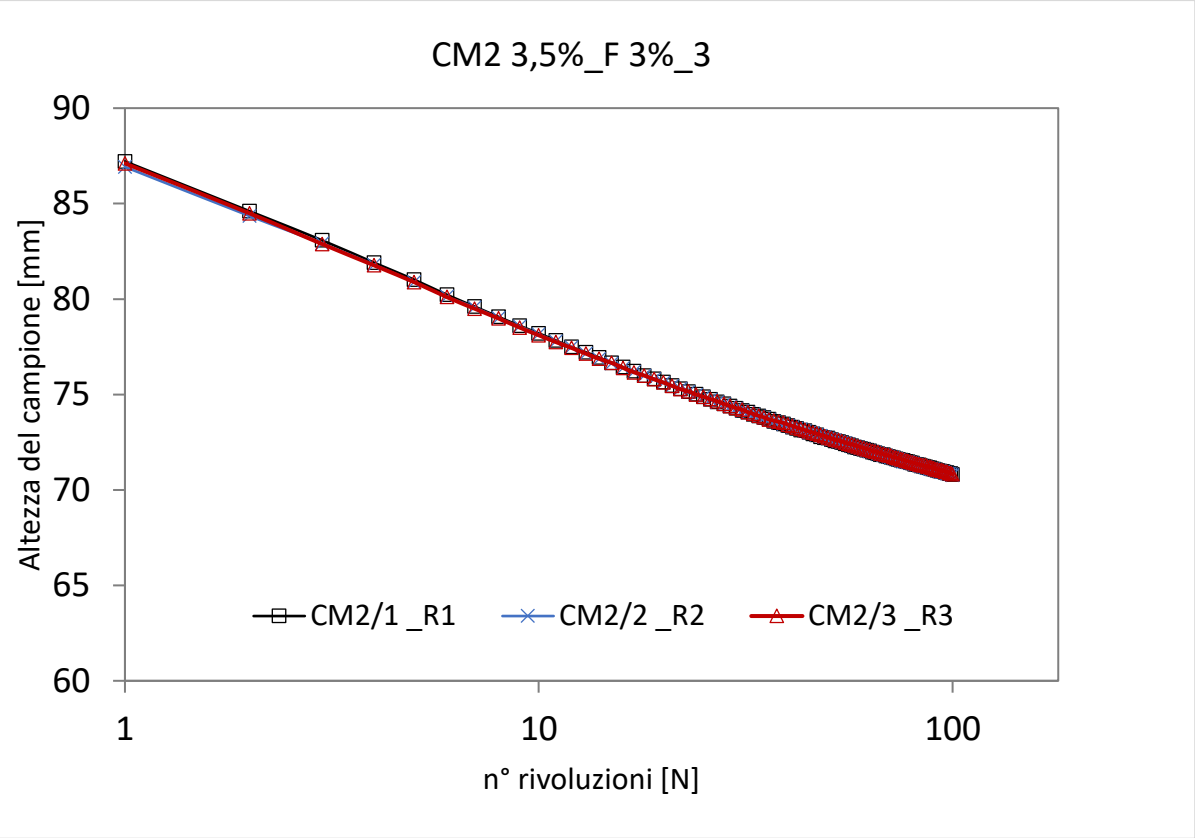


Fig. 3.8 Curve di compattazione Provini CM2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24819	-	-	2796	-
	0	-	-	-	-	49	2846	2797	0,11%
	3	-	-	-	-	-	2754	2705	3,39%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24824	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	48	2850	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2760	2711	3,18%
3	pre-compatt.	22019	2	24821	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2802	-
	0	-	-	-	-	42	2843	2801	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2764	2715	3,04%

Tab. 3.14 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

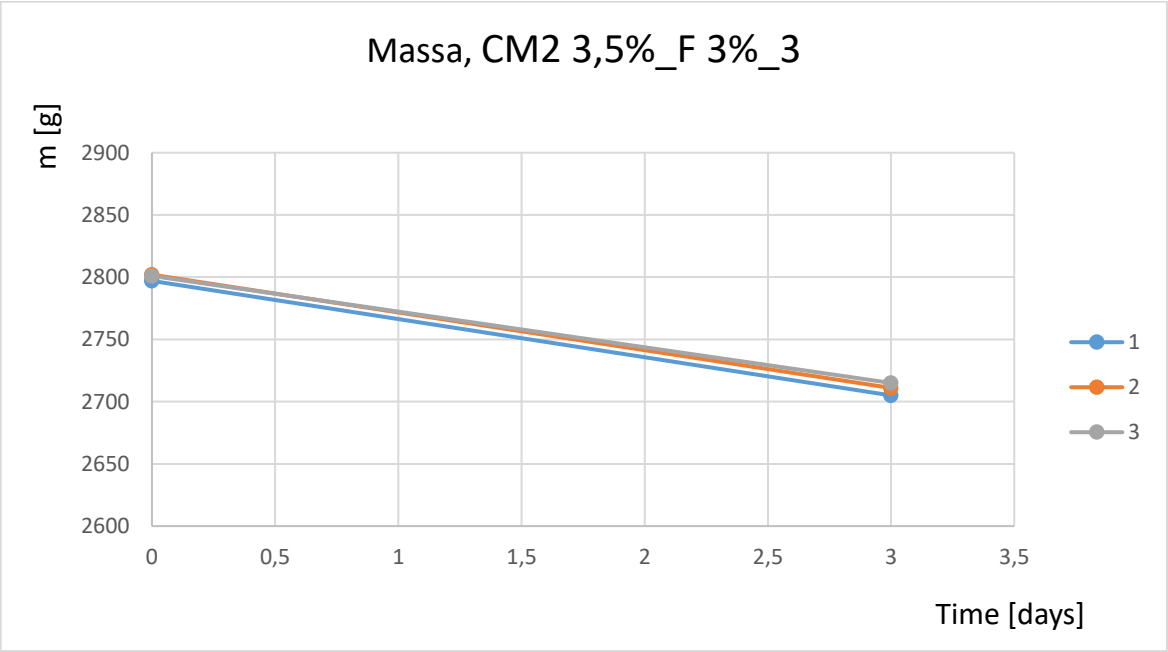


Fig. 3.9 Andamento della massa nel tempo, Provini CM2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

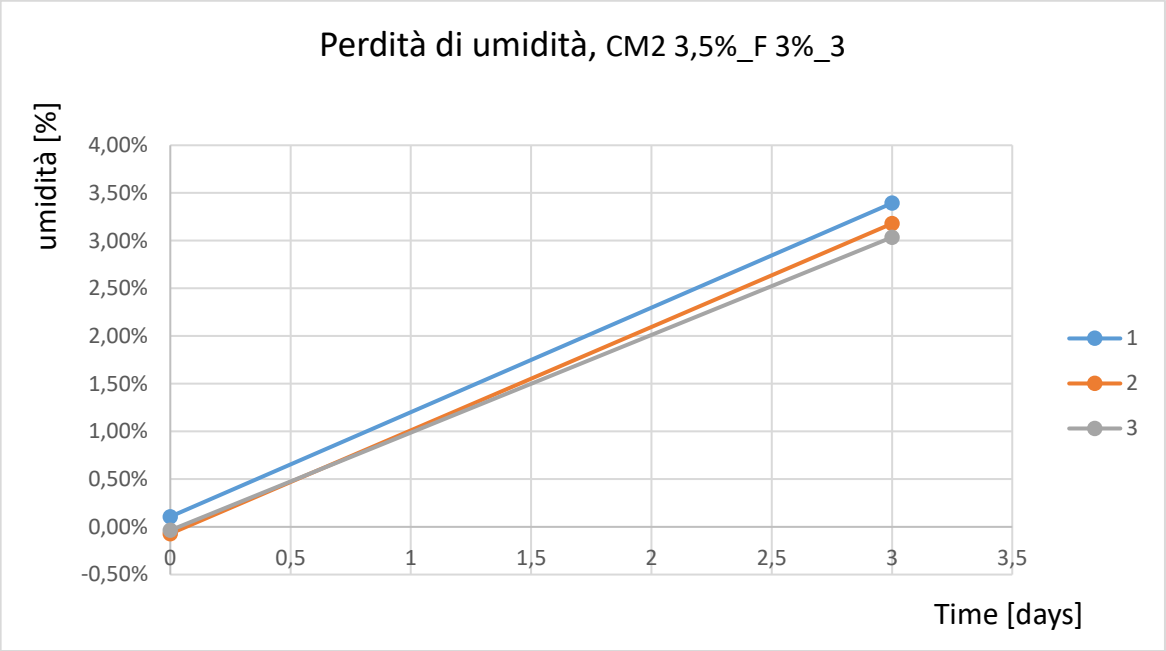


Fig. 3.10 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

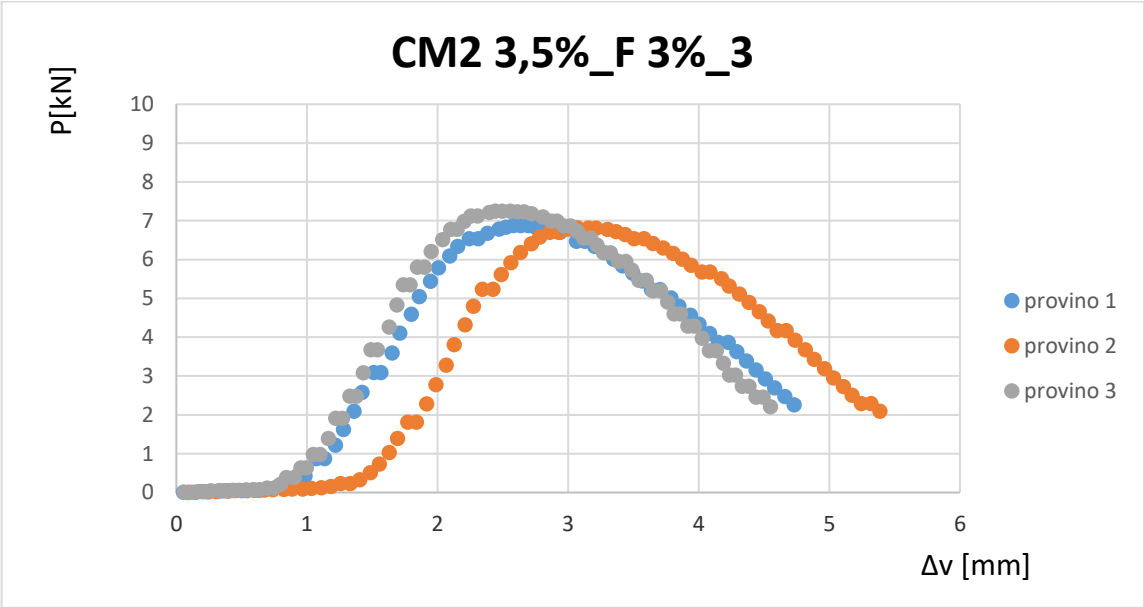


Fig. 3.11 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini CM2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

3.4.3 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in aria, [provino CM3]

Nel grafico illustrato nella figura 3.12, sono stati analizzati solo due provini in quanto durante la compattazione del terzo, nell'apparecchiatura si sono verificati degli errori. Di conseguenza anche per le altre prove sono stati analizzati sono due provini.

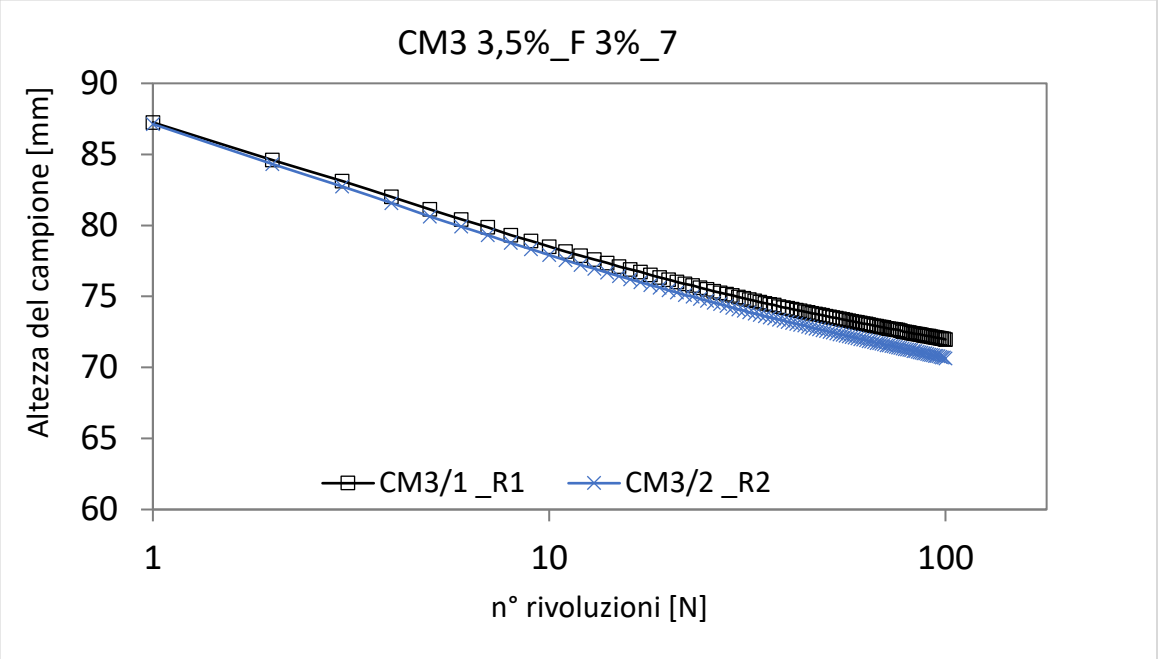


Fig. 3.12 Curve di compattazione Provini CM3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22020	2	24822	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24825	-	-	2803	-
	0	-	-	-	-	45	2848	2803	0,00%
	3	-	-	-	-	-	-		
	7	-	-	-	-	-	2740	2695	3,75%
2	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24820	-	-	2795	-
	0	-	-	-	-	44	2840	2796	0,14%
	3	-	-	-	-	-	-		
	7	-	-	-	-	-	2736	2691	3,89%

Tab. 3.15 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

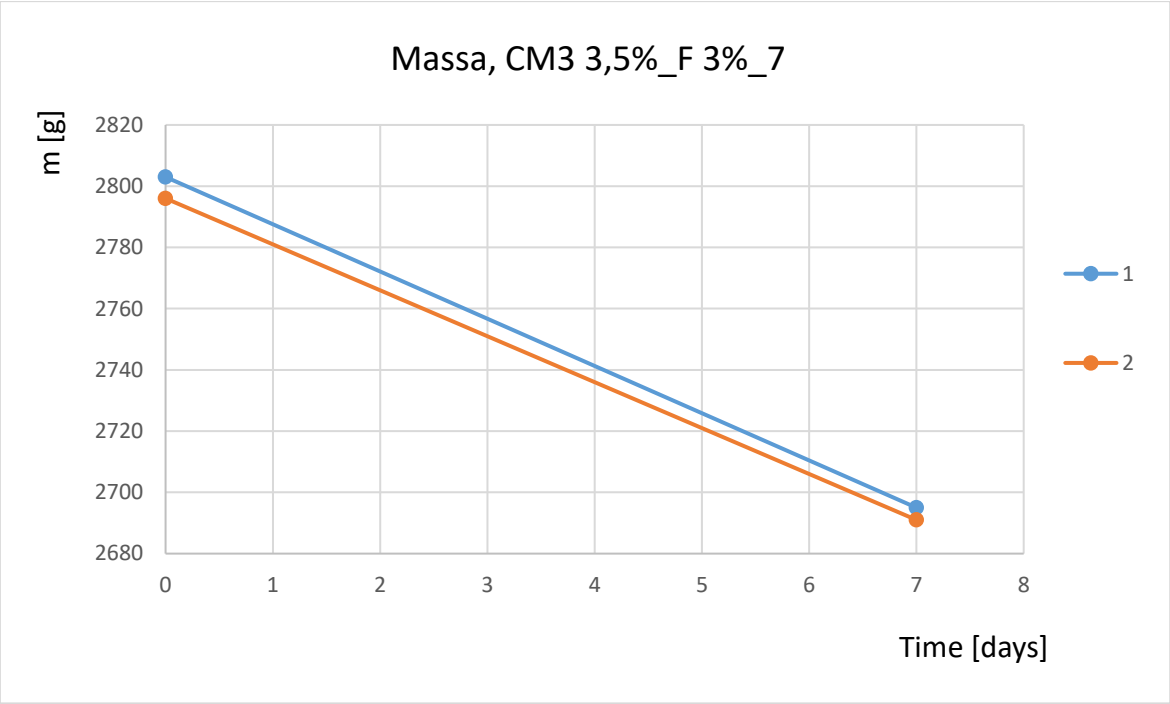


Fig. 3.13 Andamento della massa nel tempo, Provini CM3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

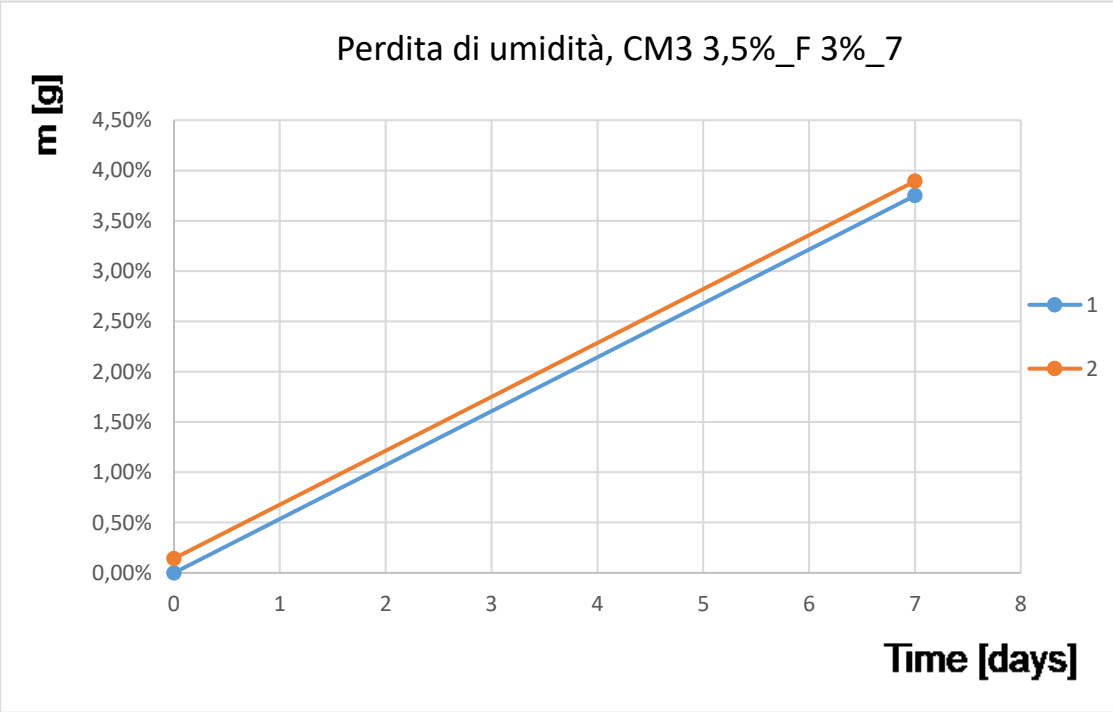


Fig. 3.14 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

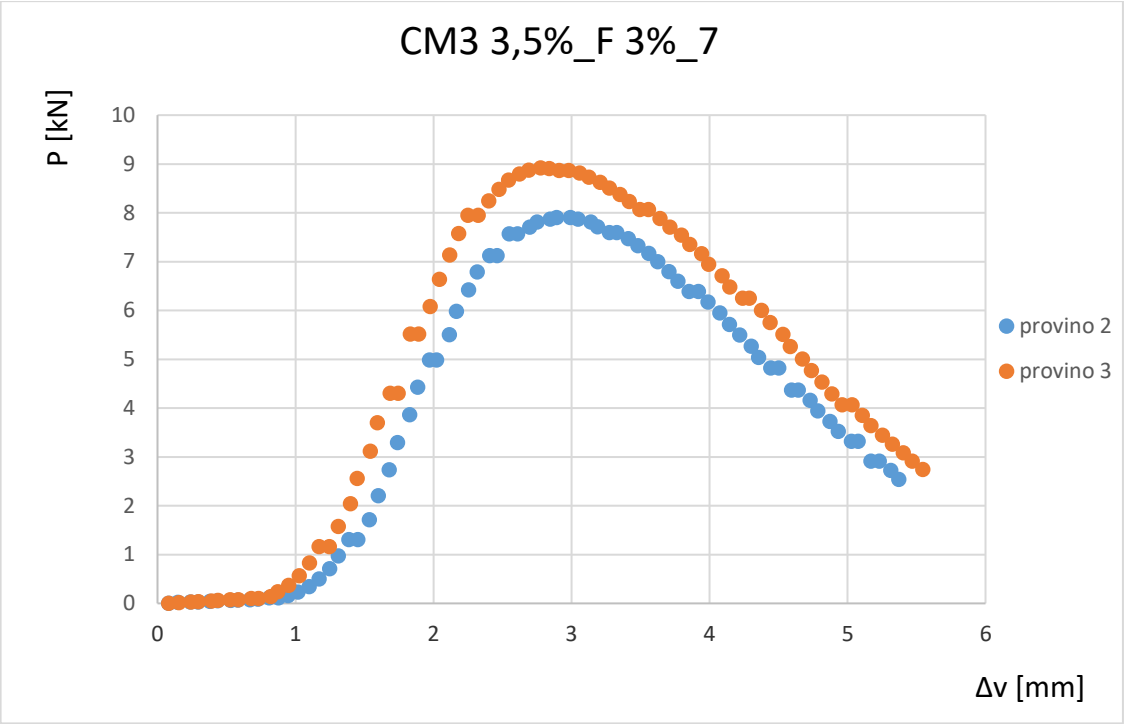


Fig. 3.15 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini CM3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

3.4.4 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM4]

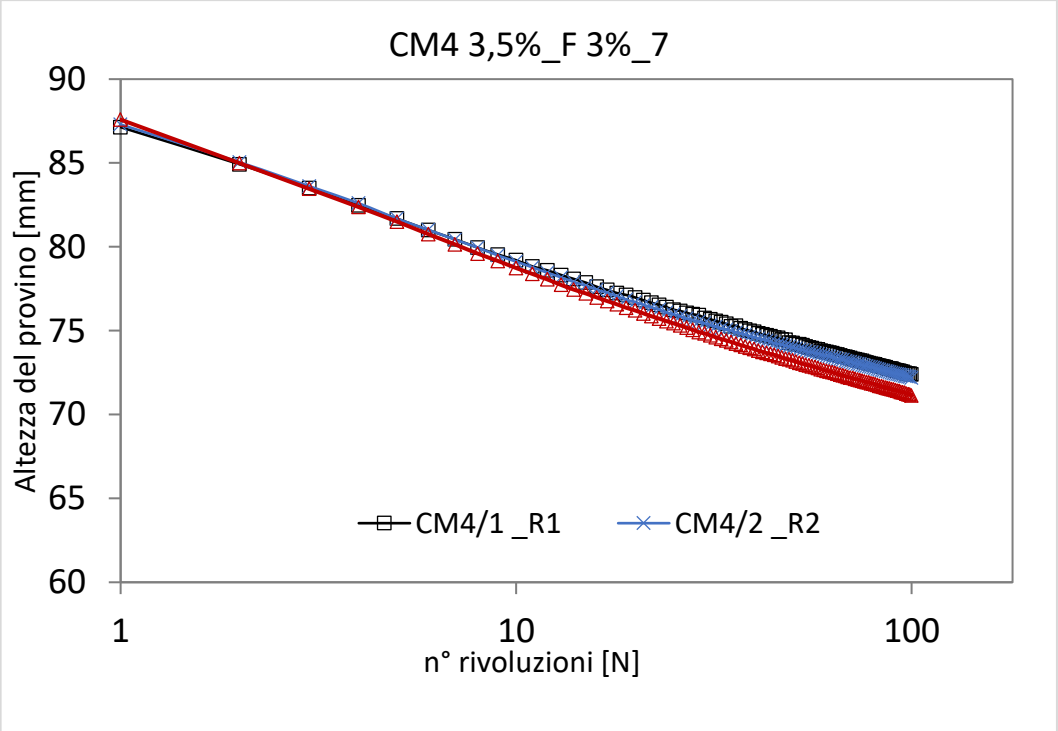


Fig. 3.16 Curve di compattazione Provini CM4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22018	2	24820	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24821	-	-	2801	-
	0	-	-	-	-	45	2847	2802	-0,07%
	3	-	-	-	-	-	2750	2705	3,39%
	7	-	-	-	-	-	2738	2693	3,82%
2	pre-compatt.	22018	2	24820	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24821	-	-	2801	-
	0	-	-	-	-	45	2847	2802	-0,07%
	3	-	-	-	-	-	2754	2709	3,25%
	7	-	-	-	-	-	2744	2699	3,61%
3	pre-compatt.	22019	2	24821	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2802	-
	0	-	-	-	-	44	2845	2801	-0,04%
	3	-	-	-	-	-	2751	2706	3,36%
	7	-	-	-	-	-	2741	2696	3,71%

Tab. 3.16 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

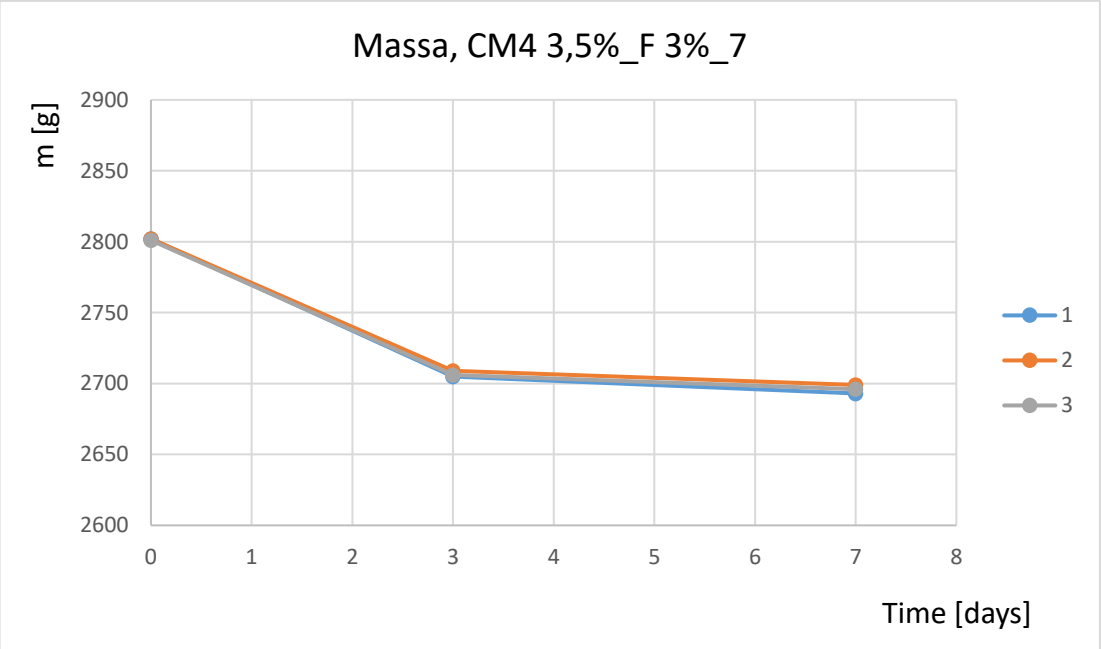


Fig. 3.17 Andamento della massa nel tempo, Provini CM4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

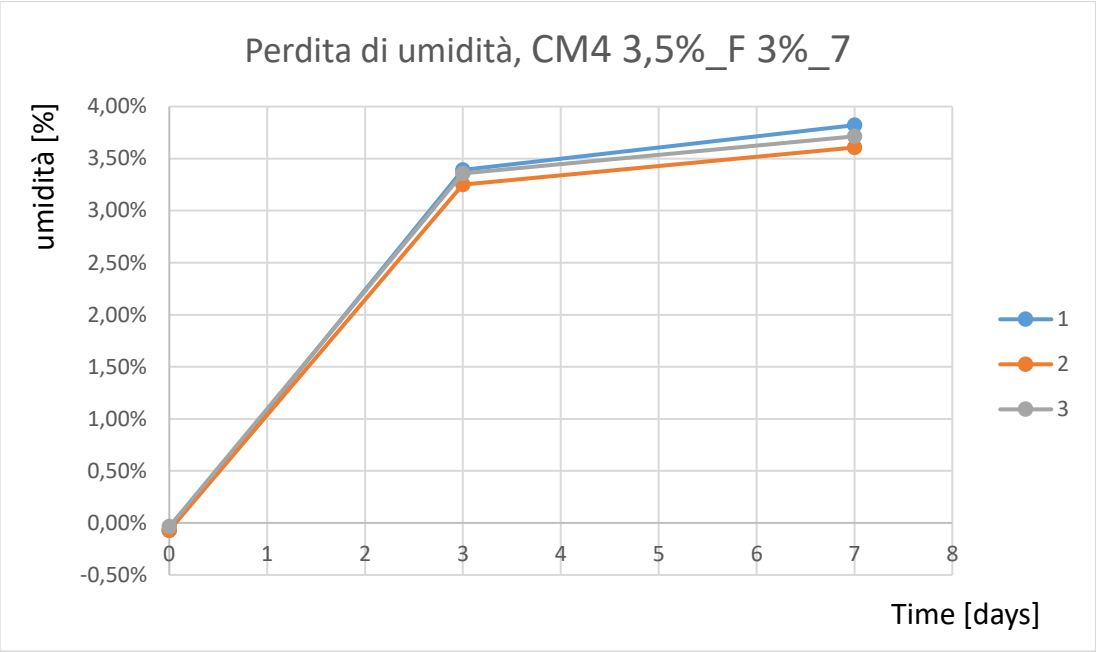


Fig. 3.18 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

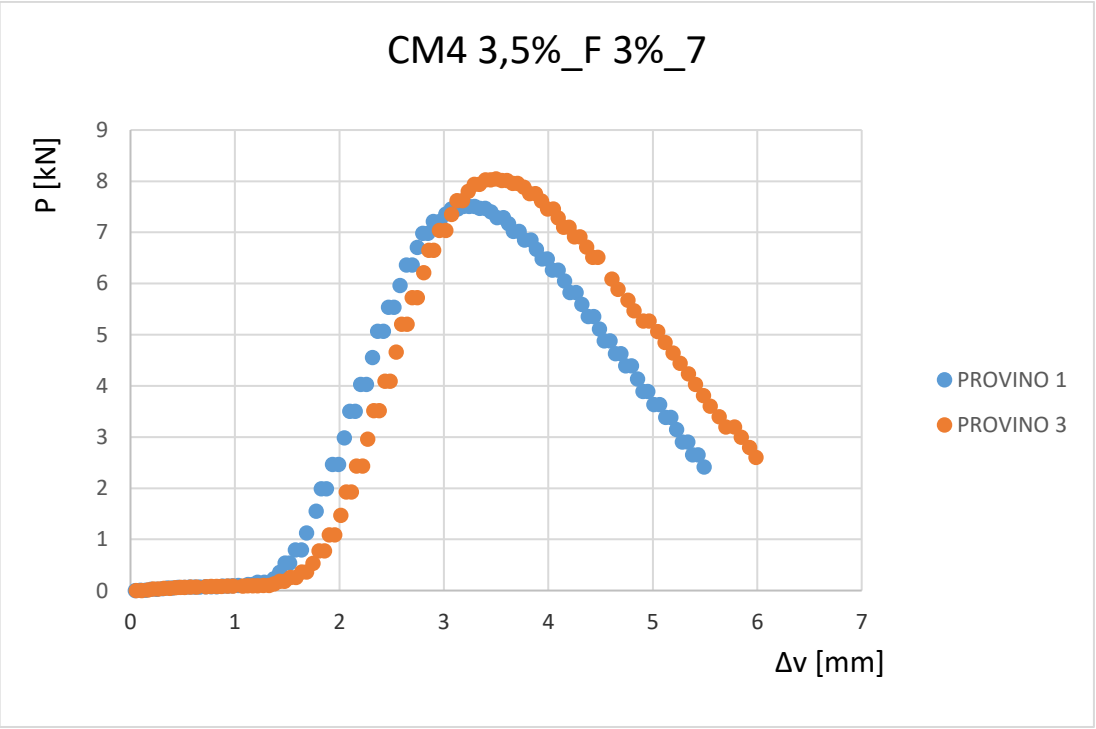


Fig. 3.19 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini CM4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

3.4.5 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in aria, [provino CM5]

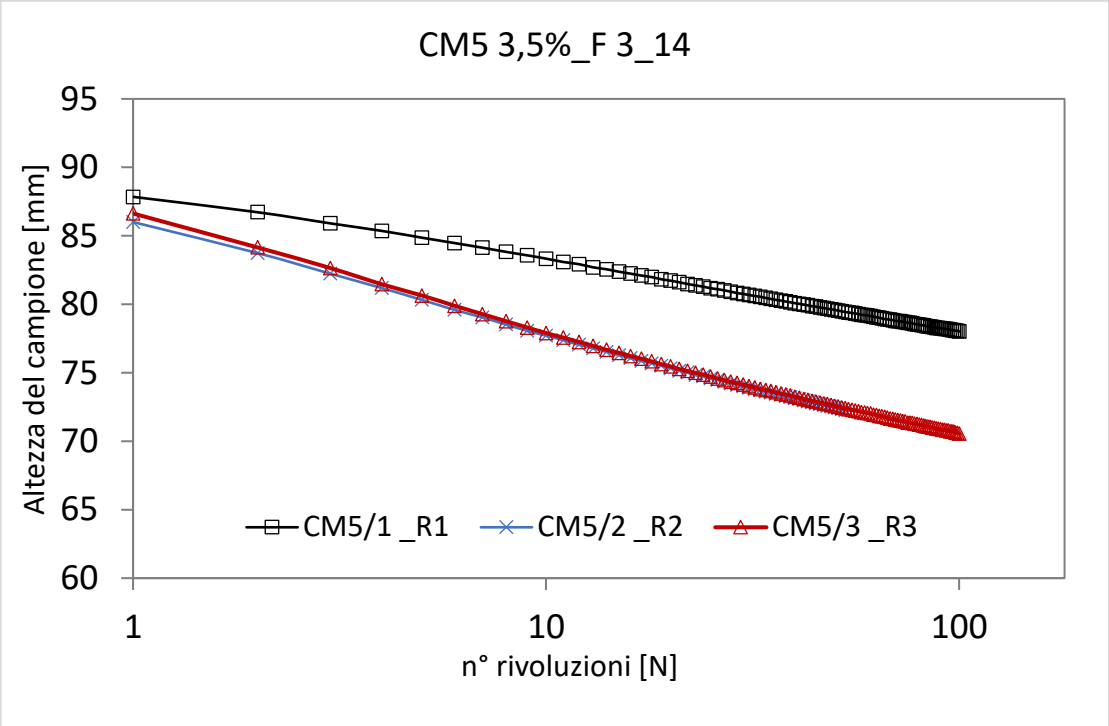


Fig. 3.20 Curve di compattazione Provini CM5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compaction	22018	2	24820	-	-	-	2800	-
	post-compaction	-	-	-	24821	-	-	2801	-
	0	-	-	-	-	48	2850	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2733	2685	4,11%
	7	-	-	-	-	-	2735	2687	4,04%
	14	-	-	-	-	-	2733	2685	4,11%
2	pre-compaction	22018	2	24820	-	-	-	2802	-
	post-compaction	-	-	-	24820	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	45	2834	2789	0,39%
	3	-	-	-	-	-	2737	2689	3,96%
	7	-	-	-	-	-	2745	2697	3,68%
	14	-	-	-	-	-	2737	2689	3,96%
3	pre-compaction	22018	2	24820	-	-	-	2802	-
	post-compaction	-	-	-	24819	-	-	2799	-
	0	-	-	-	-	45	2836	2791	0,32%
	3	-	-	-	-	-	2746	2698	3,64%
	7	-	-	-	-	-	2753	2705	3,39%
	14	-	-	-	-	-	2746	2698	3,64%

Tab. 3.15 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

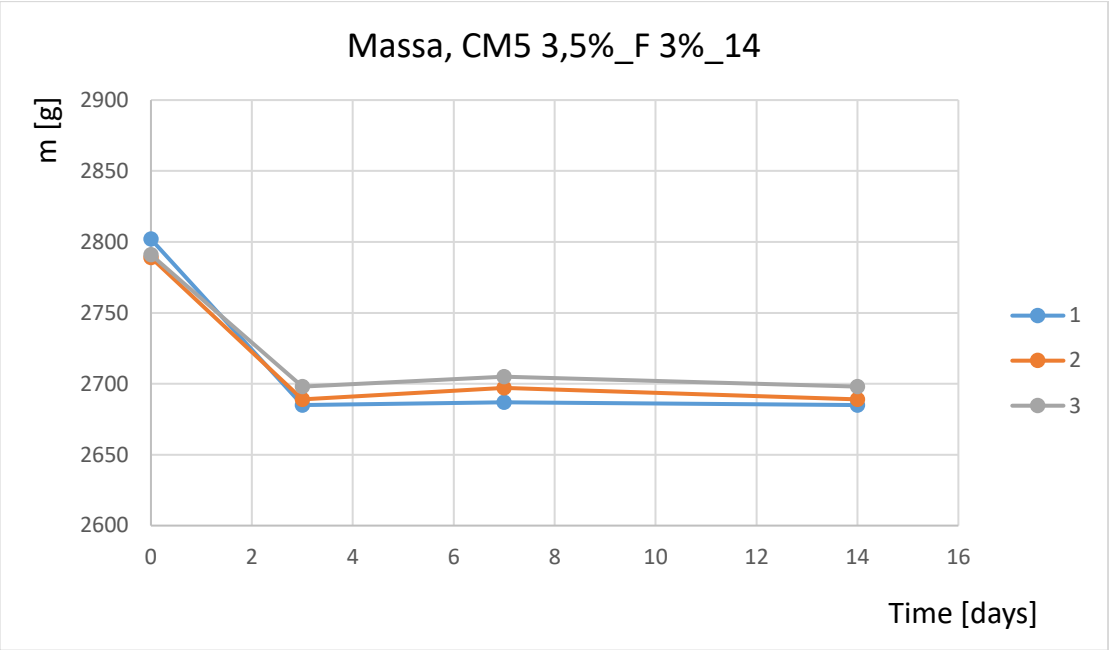


Fig. 3.21 Andamento della massa nel tempo, Provini CM5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

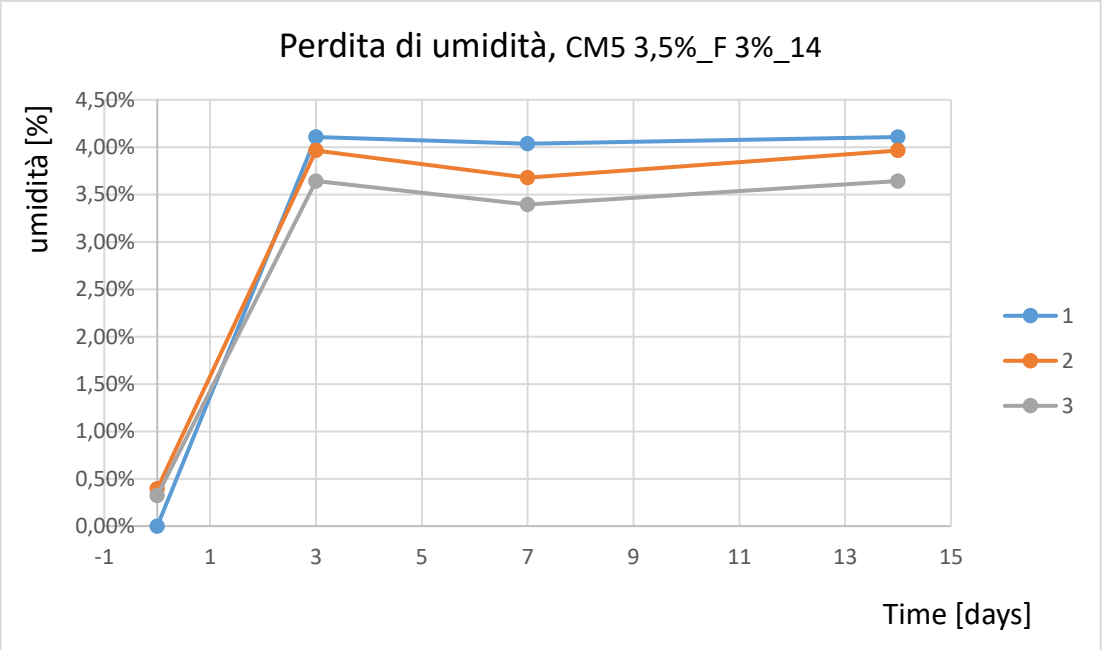


Fig. 3.22 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

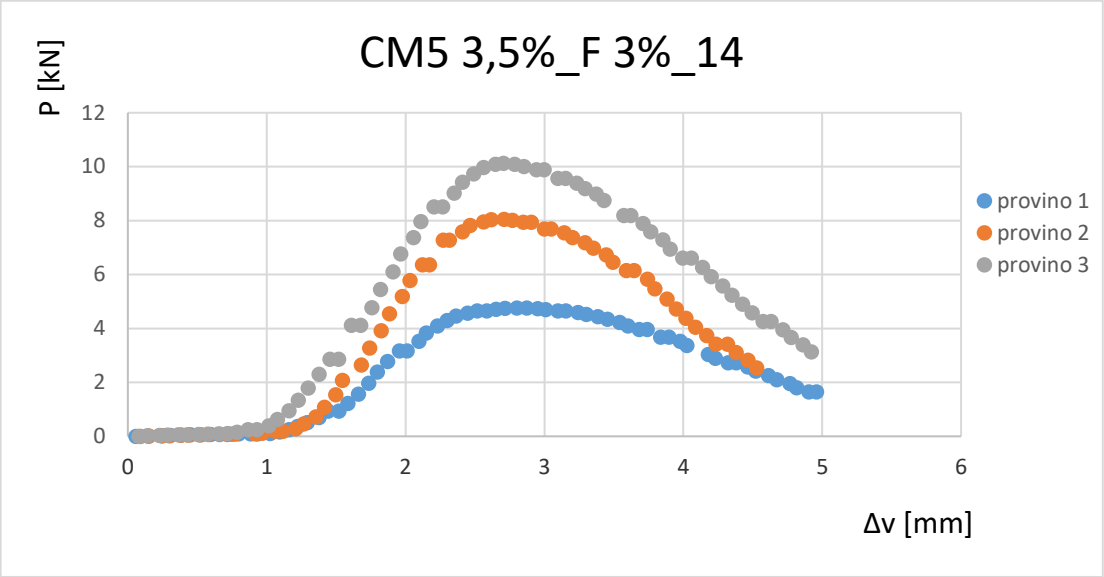


Fig. 3.23 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini CM5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

3.4.6 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM6]

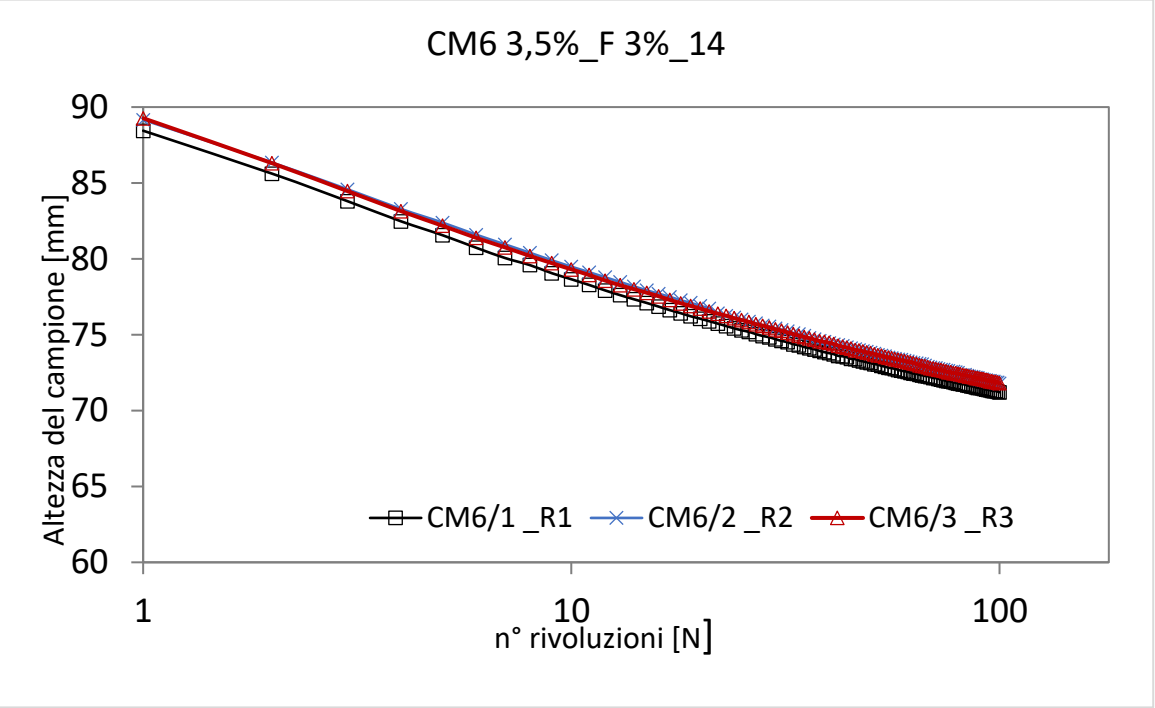


Fig. 3.24 Curve di compattazione Provini CM6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24827	-	-	2803	-
	0	-	-	-	-	45	2848	2803	-0,11%
	3	-	-	-	-	-	2765	2720	2,86%
	7	-	-	-	-	-	2755	2710	3,21%
	14	-	-	-	-	-	2750	2705	3,39%
2	pre-compatt.	22024	2	24826	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24829	-	-	2803	-
	0	-	-	-	-	45	2847	2802	-0,07%
	3	-	-	-	-	-	2775	2730	2,50%
	7	-	-	-	-	-	2766	2721	2,82%
	14	-	-	-	-	-	2761	2716	3,00%
3	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24828	-	-	2805	-
	0	-	-	-	-	42	2846	2804	-0,14%
	3	-	-	-	-	-	2773	2728	2,57%
	7	-	-	-	-	-	2765	2720	2,86%
	14	-	-	-	-	-	2761	2716	3,00%

Tab. 3.16 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

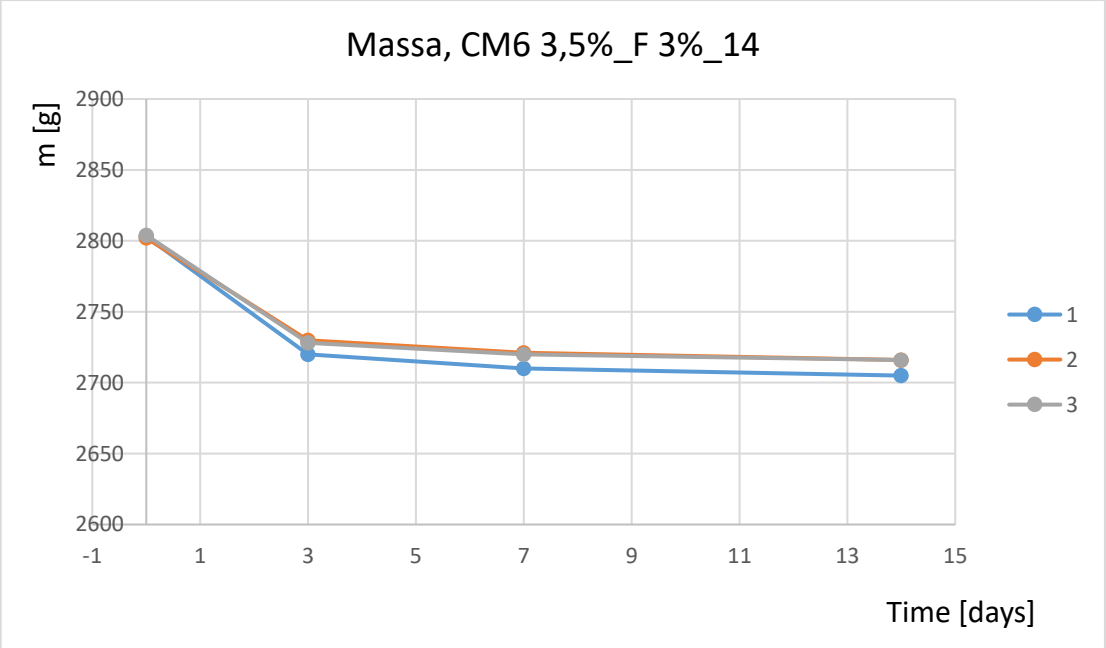


Fig. 3.25 Andamento della massa nel tempo, Provini CM6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

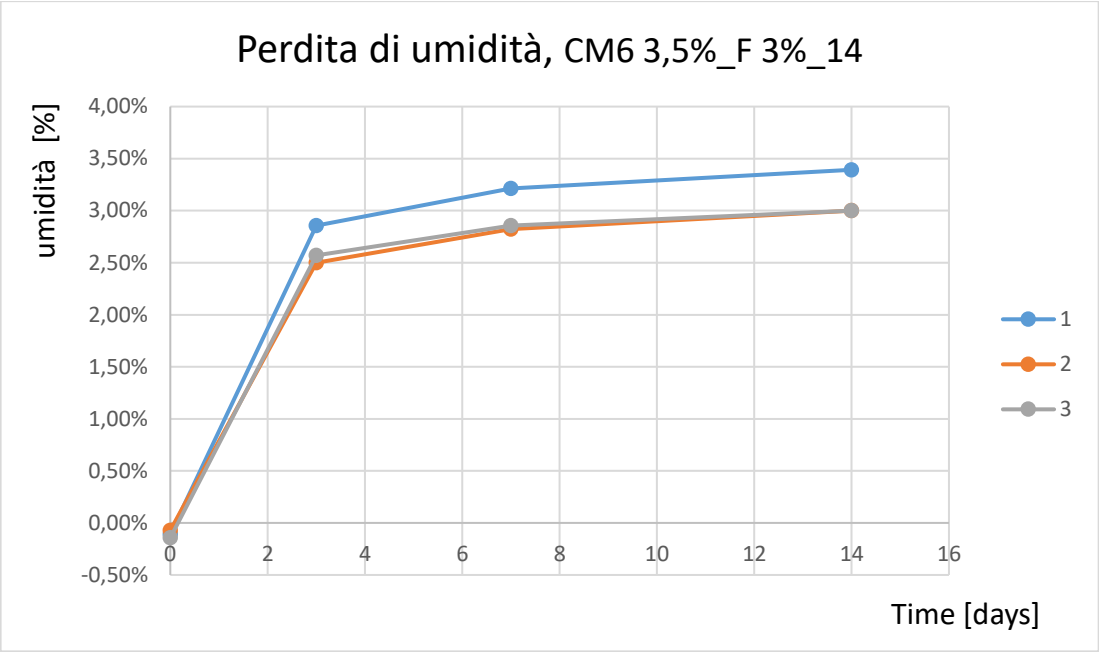


Fig. 3.26 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

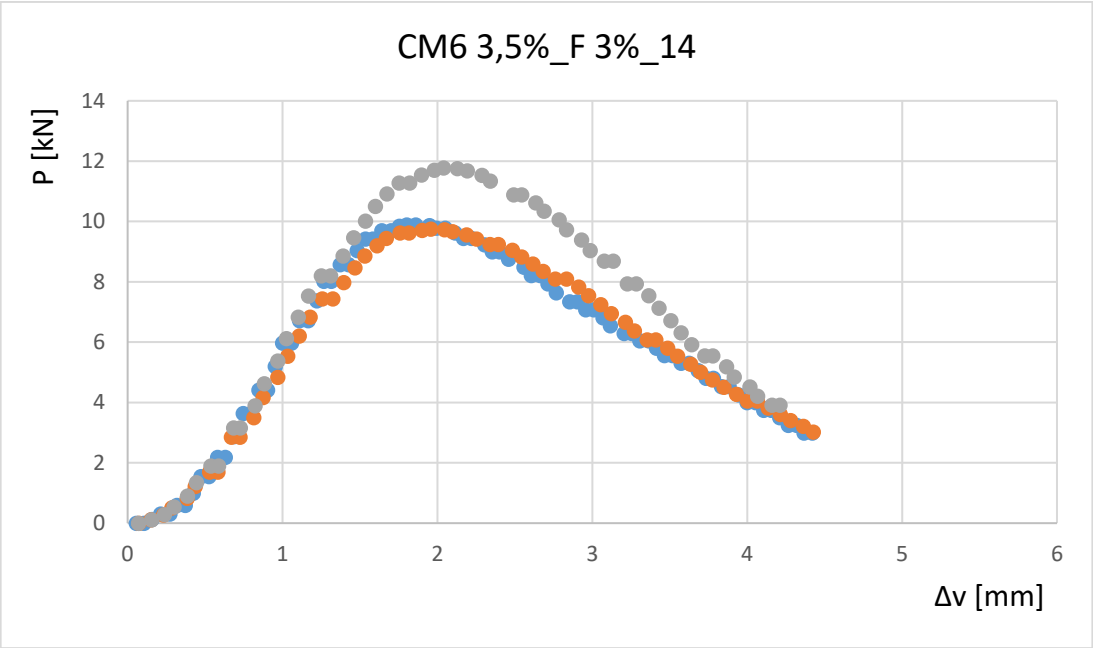


Fig. 3.27 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini CM6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

3.5 Miscela MC 3,5%, filler 3%

Successivamente verranno illustrati i risultati sperimentali della Pressa a taglio giratoria e della prova di Trazione indiretta relativi ai provini realizzati con l'emulsione bituminosa MC al 3,5% e filler 3%, tramite grafici che rappresentano la compattazione delle curve, la perdita di umidità e la rottura del provino. Le grandezze che seguono sono state già definite nel *Capitolo 3.3.*

3.5.1 Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in aria, [provino MC1]

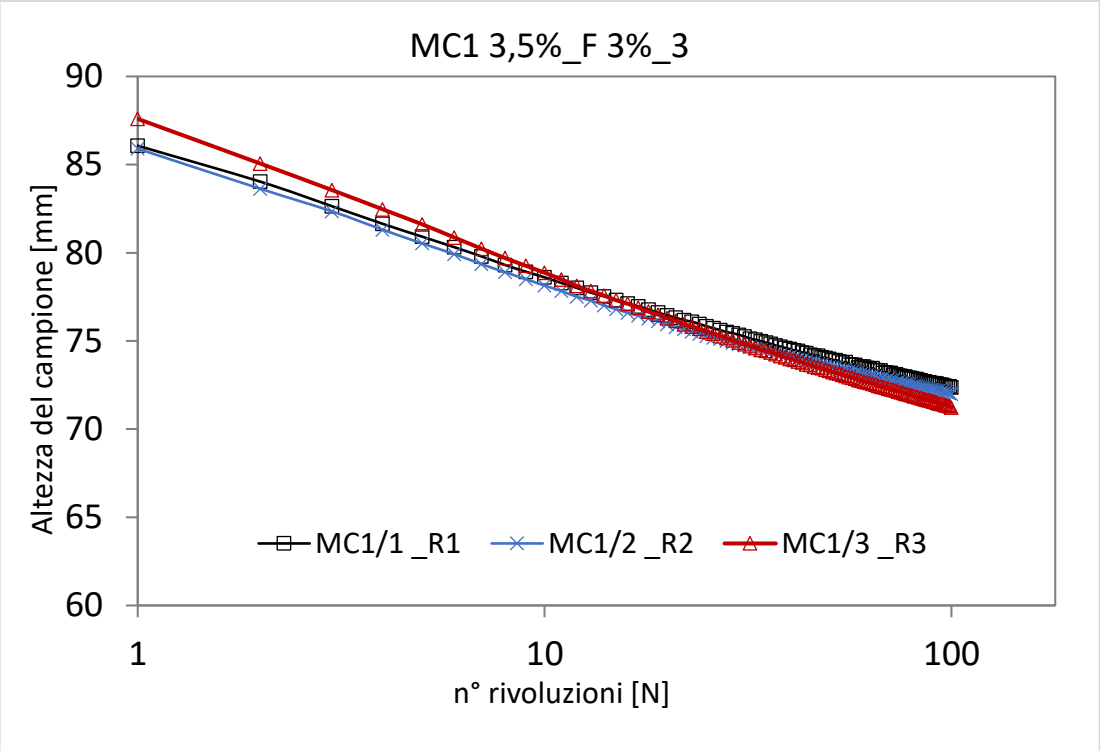


Fig. 3.28 Curve di compattazione Provini MC1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22018	2	24820	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24824	-	-	2804	-
	0	-	-	-	-	48	2850	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2747	2699	3,61%
2	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24819	-	-	2796	-
	0	-	-	-	-	43	2845	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2748	2700	3,57%
3	pre-compatt.	22022	2	24809	-	-	-	2787	-
	post-compatt.	-	-	-	24821	-	-	2797	-
	0	-	-	-	-	46	2845	2799	0,04%
	3	-	-	-	-	-	2753	2705	3,39%

Tab. 3.17 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini MC1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

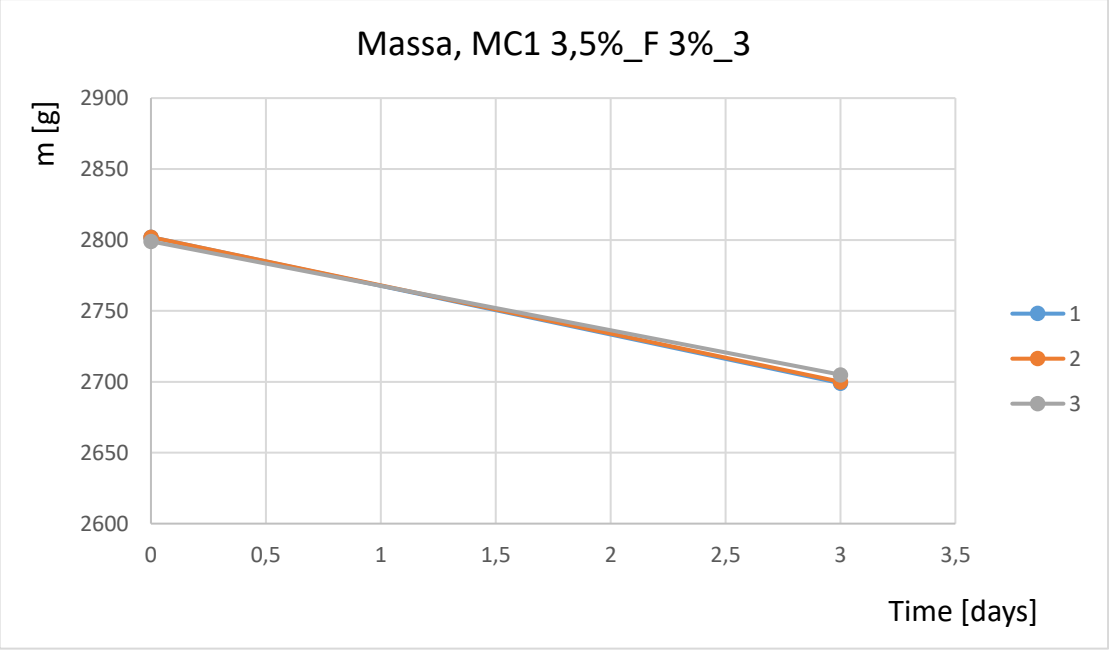


Fig. 3.29 Andamento della massa nel tempo, Provini MC1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

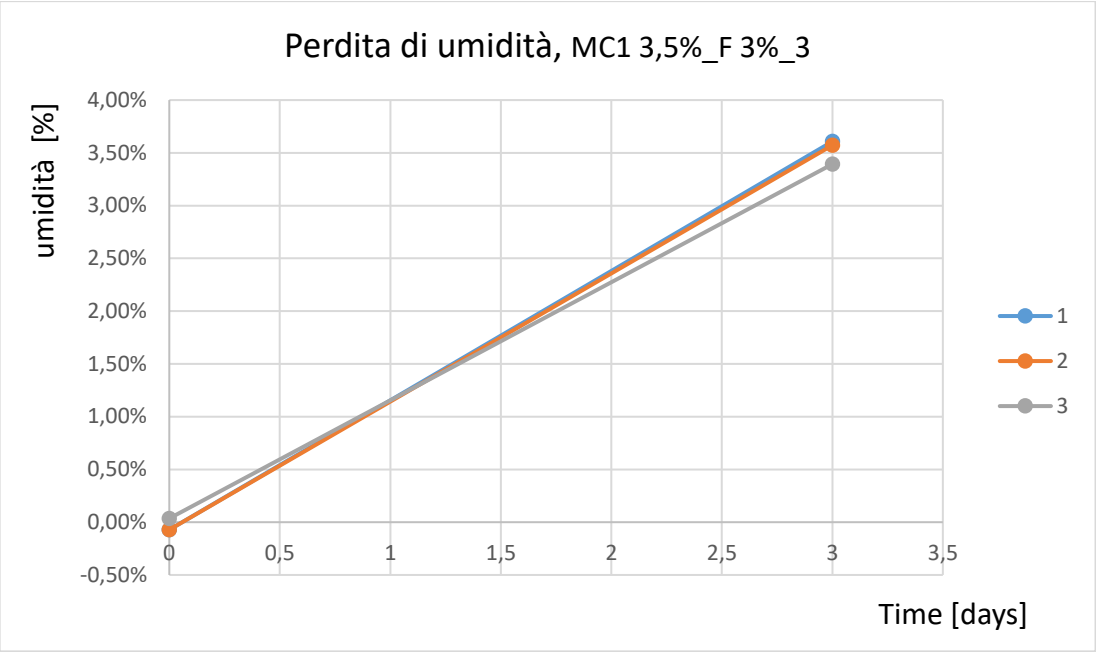


Fig. 3.30 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini MC1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

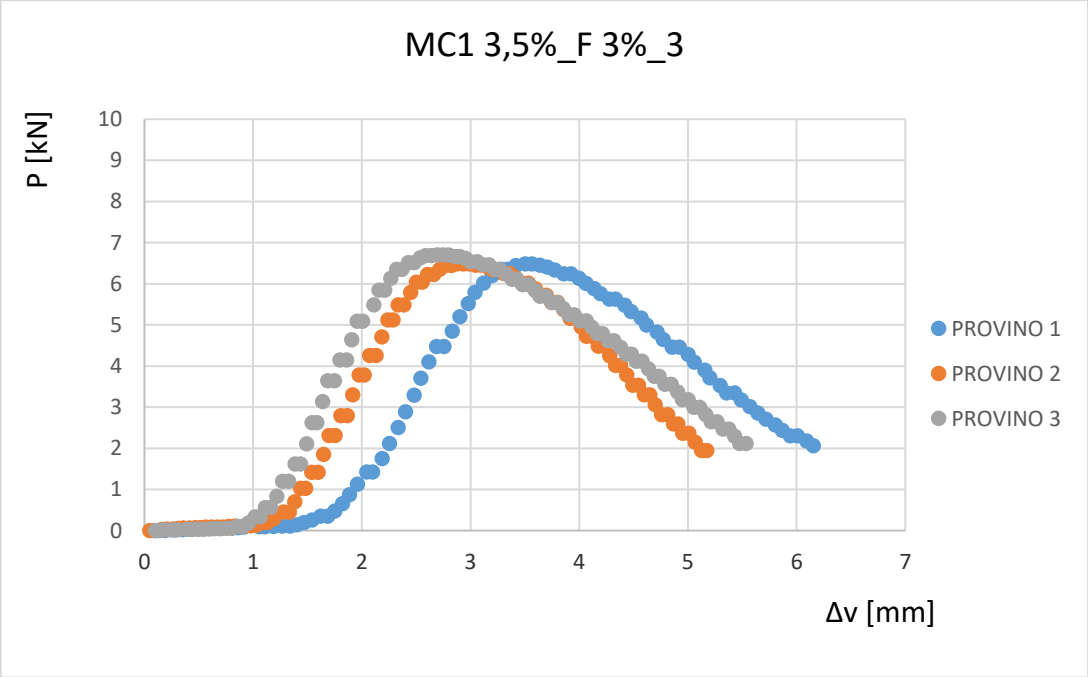


Fig. 3.31 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini CM1 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

3.5.2 *Maturazione a 3 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino MC2]*

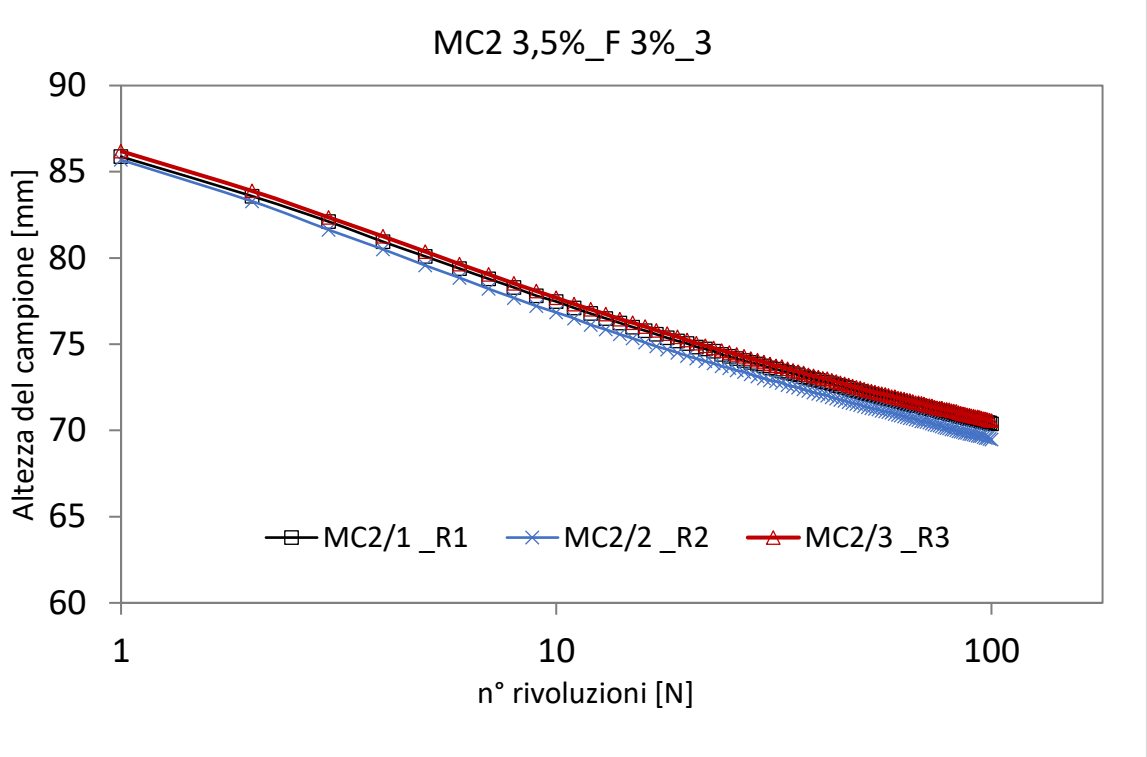


Fig. 3.32 Curve di compattazione Provini MC2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24810	-	-	2786	-
	0	-	-	-	-	47	2835	2788	0,43%
	3	-	-	-	-	-	2738	2691	3,89%
2	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24808	-	-	2785	-
	0	-	-	-	-	46	2832	2786	0,50%
	3	-	-	-	-	-	2740	2693	3,82%
3	pre-compatt.	22024	2	24826	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24821	-	-	2795	-
	0	-	-	-	-	47	2836	2789	0,39%
	3	-	-	-	-	-	2749	2702	3,50%

Tab. 3.18 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini MC2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

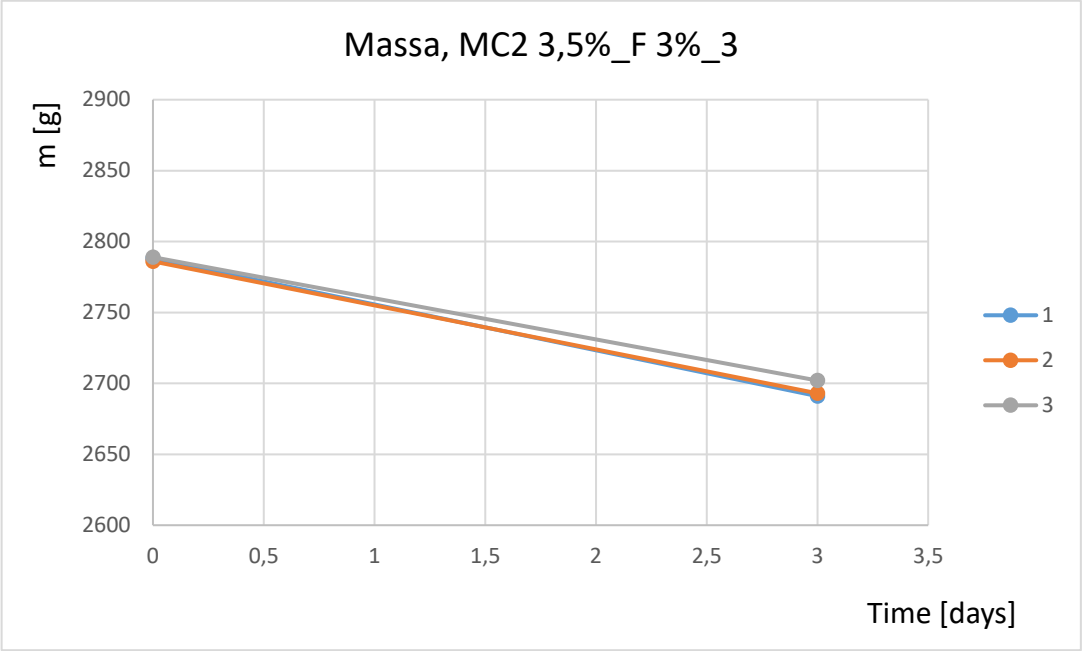


Fig. 3.33 Andamento della massa nel tempo, Provini MC2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

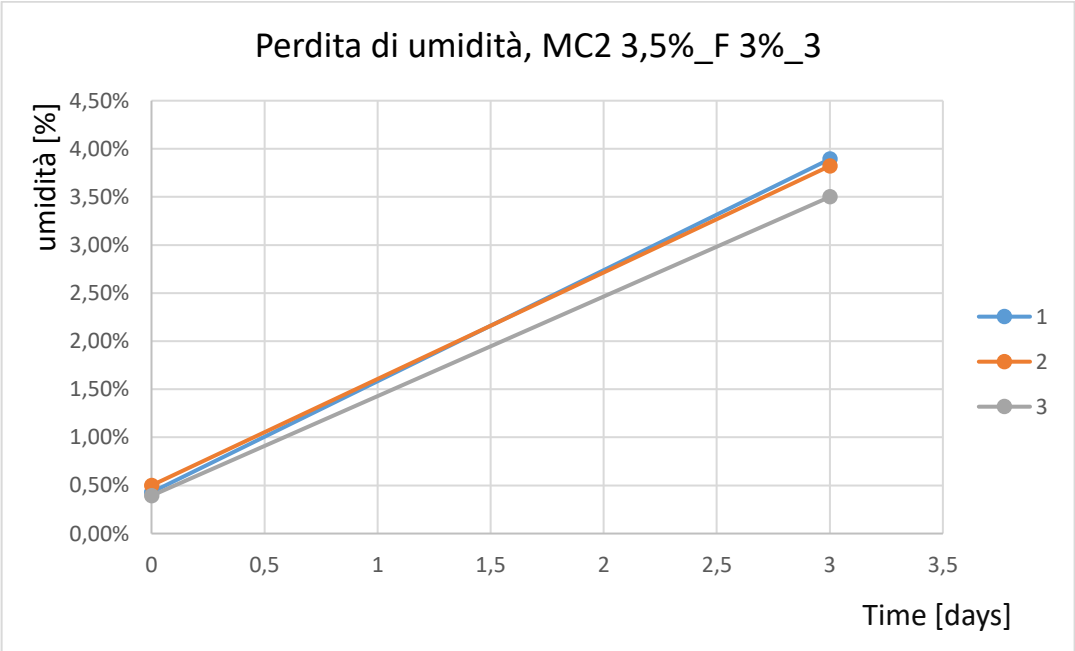


Fig. 3.34 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini MC2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

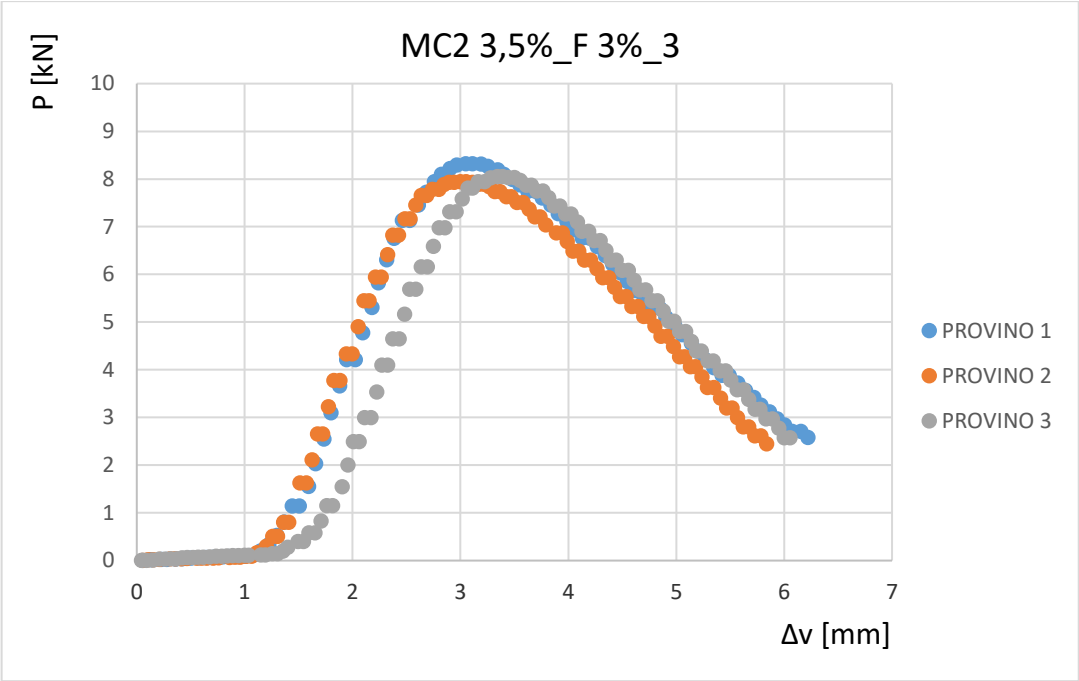


Fig. 3.35 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini MC2 3,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

3.5.3 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in aria, [provino MC3]

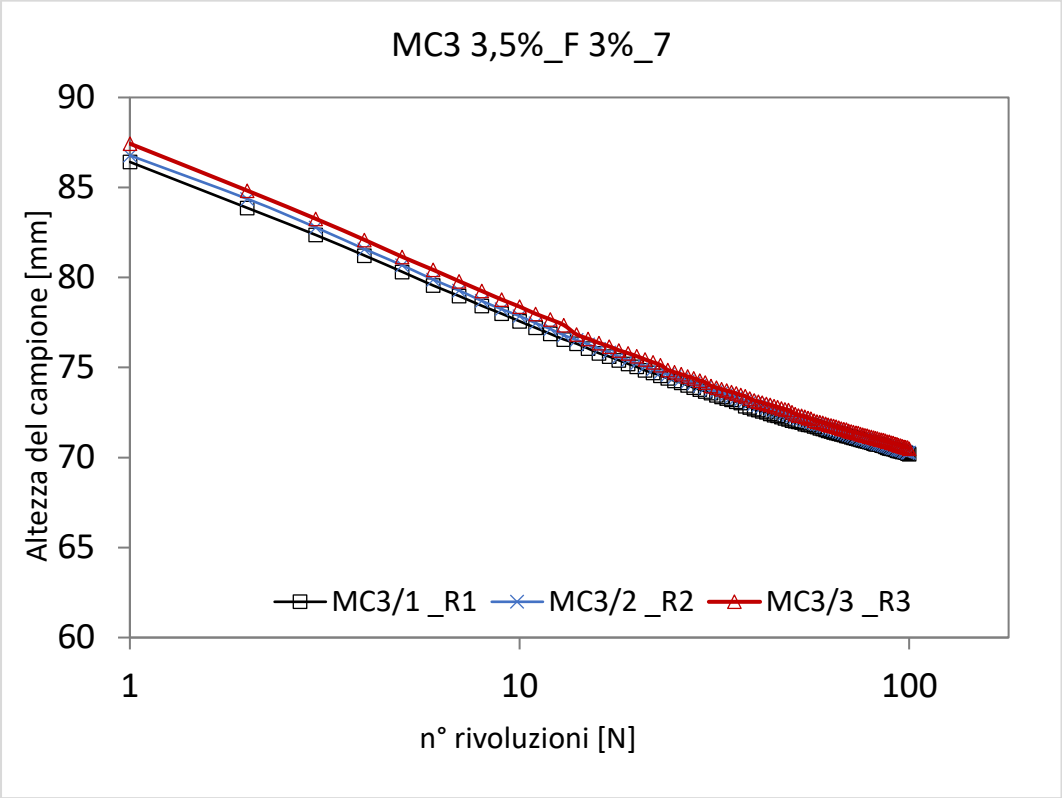


Fig. 3.36 Curve di compattazione Provini MC3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24813	-	-	2788	-
	0	-	-	-	-	46	2834	2788	0,43%
	3	-	-	-	-	-	2741	2695	3,75%
	7	-	-	-	-	-	2730	2684	4,14%
2	pre-compatt.	22024	2	24826	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24814	-	-	2788	-
	0	-	-	-	-	46	2835	2789	0,39%
	3	-	-	-	-	-	2744	2698	3,64%
	7	-	-	-	-	-	2735	2689	3,96%
3	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24819	-	-	2794	-
	0	-	-	-	-	47	2840	2793	0,25%
	3	-	-	-	-	-	2749	2703	3,46%
	7	-	-	-	-	-	2740	2694	3,79%

Tab. 3.19 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini MC3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

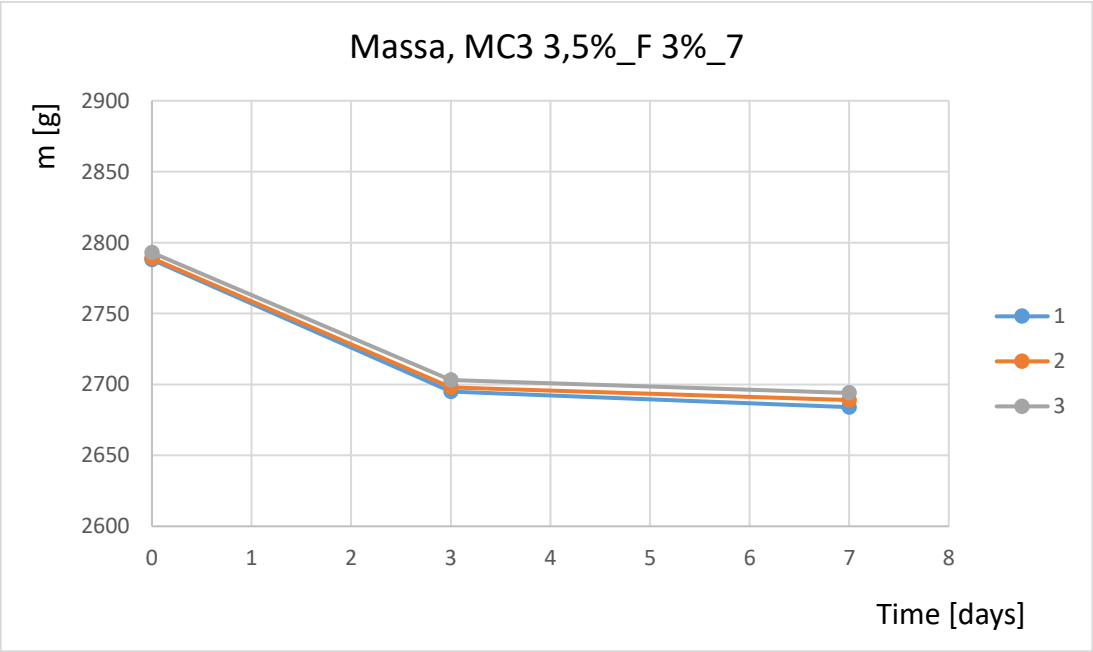


Fig. 3.37 Andamento della massa nel tempo, Provini MC3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

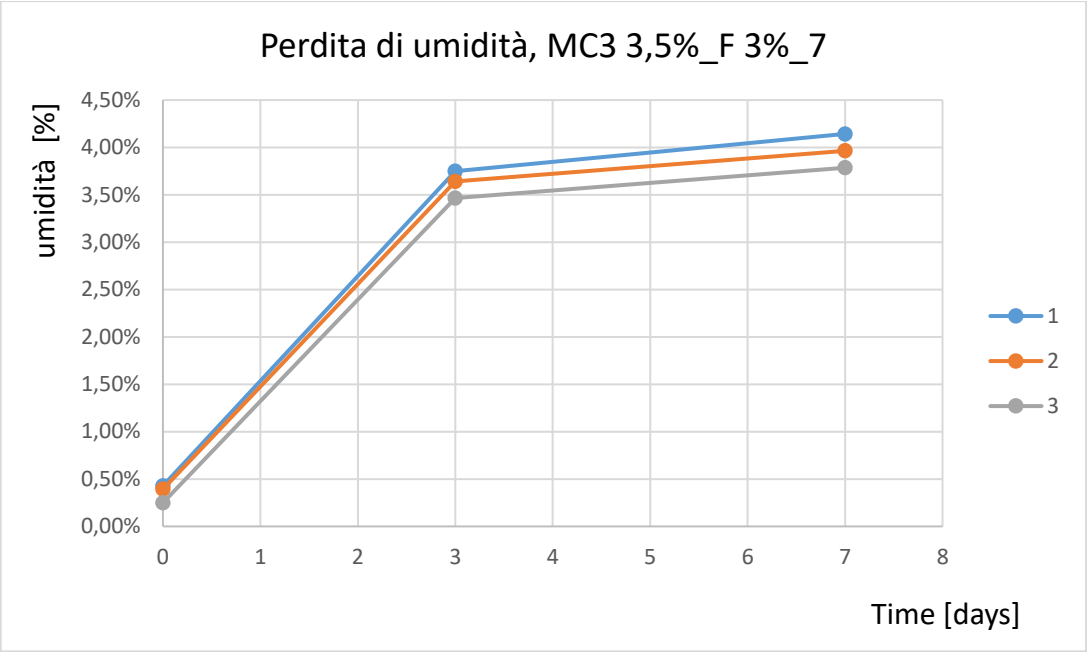


Fig. 3.38 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini MC3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

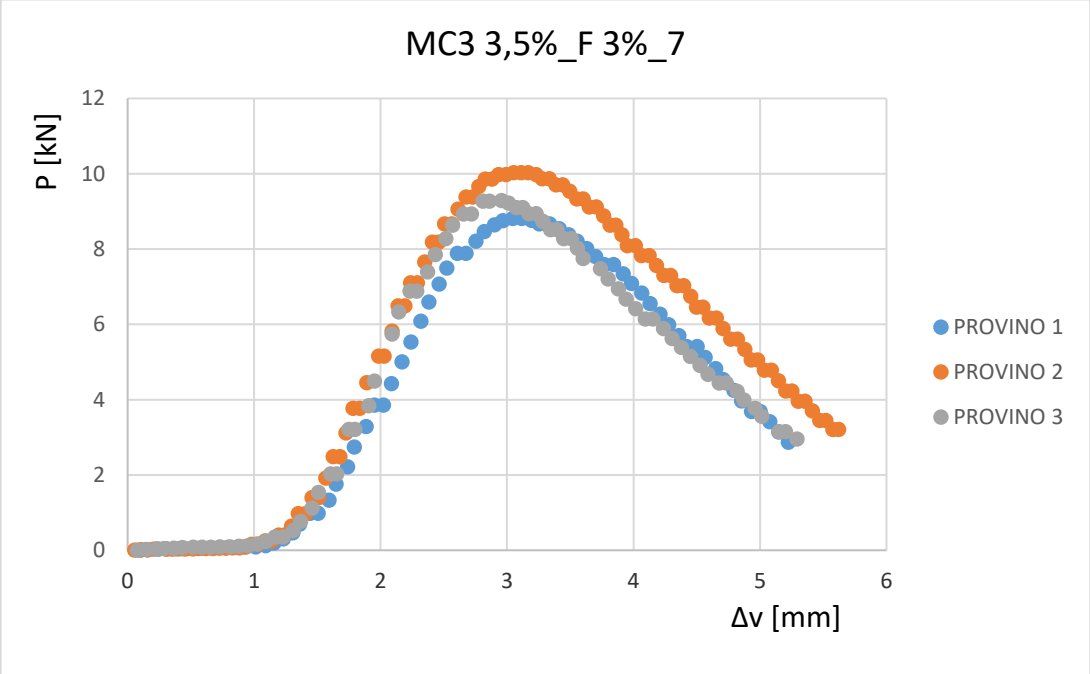


Fig. 3.39 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini MC3 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

3.5.4 Maturazione a 7 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino CM4]

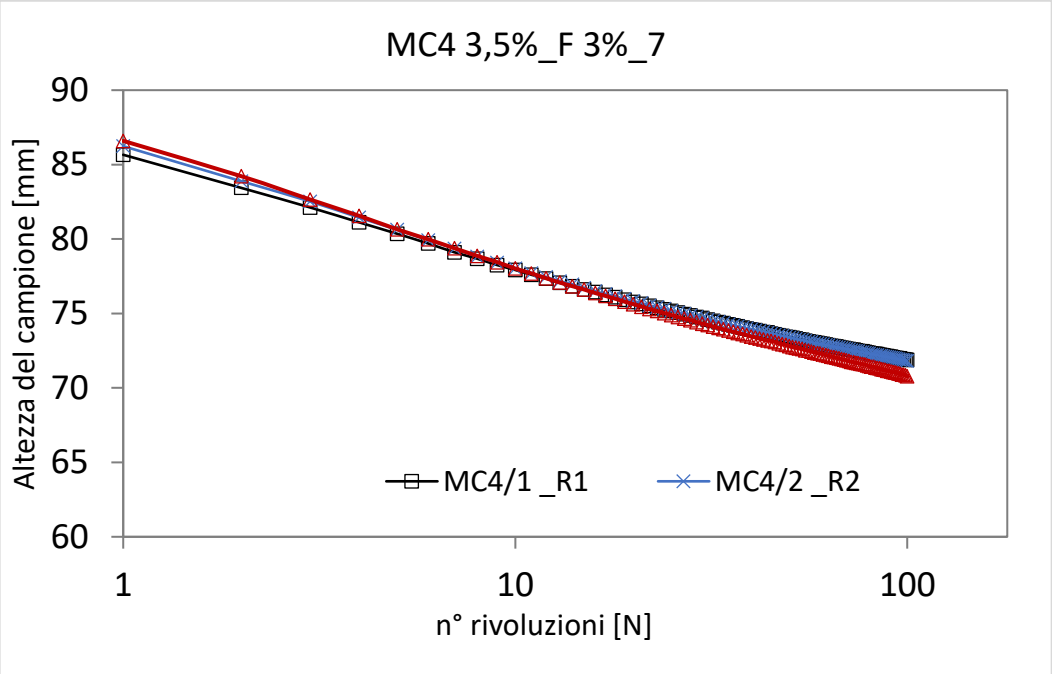


Fig. 3.40 Curve di compattazione Provini MC4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24824	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	47	2849	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2752	2705	3,39%
	7	-	-	-	-	-	2739	2692	3,86%
2	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24825	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	46	2851	2805	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2755	2708	3,29%
	7	-	-	-	-	-	2743	2696	3,71%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24824	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	47	2846	2799	0,04%
	3	-	-	-	-	-	2754	2707	3,32%
	7	-	-	-	-	-	2742	2695	3,75%

Tab. 3.20 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini MC4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

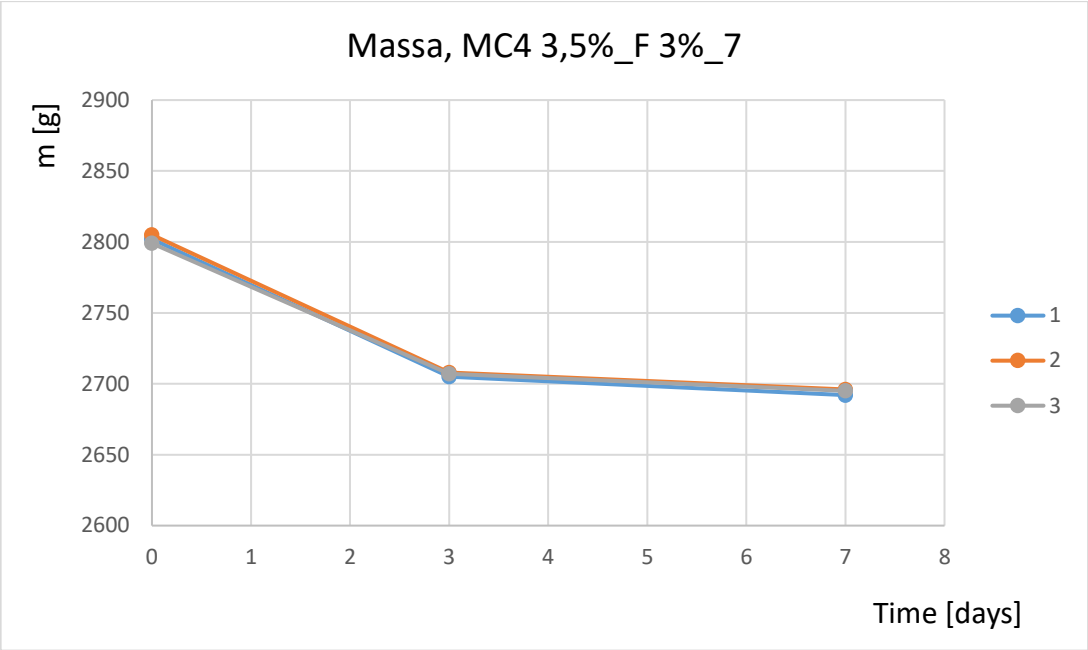


Fig. 3.41 Andamento della massa nel tempo, Provini MC4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

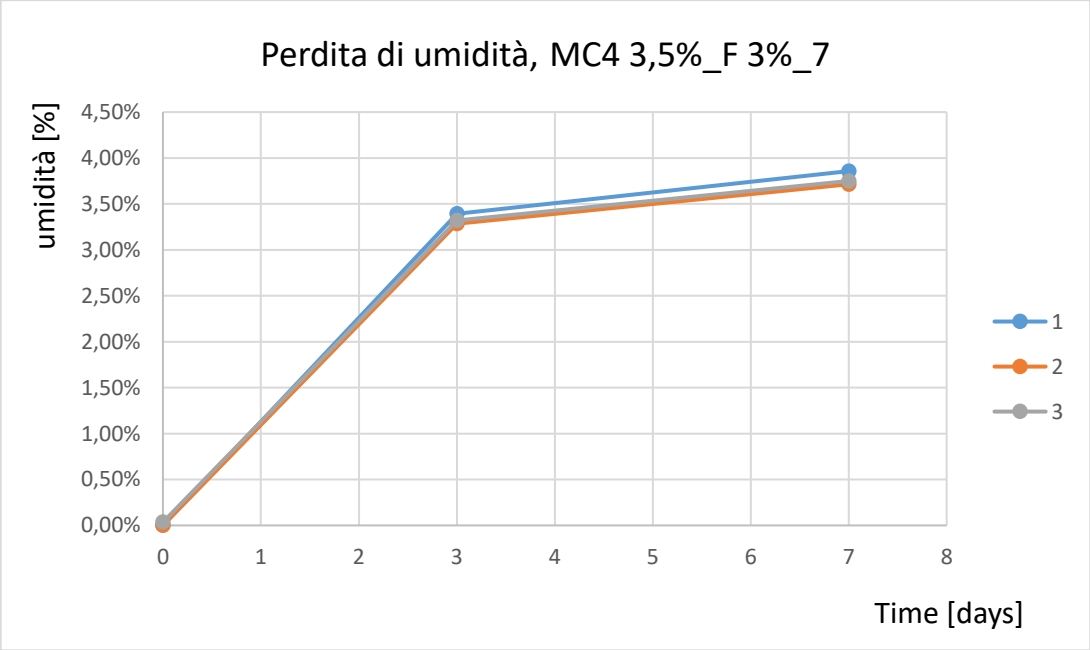


Fig. 3.42 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini MC4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

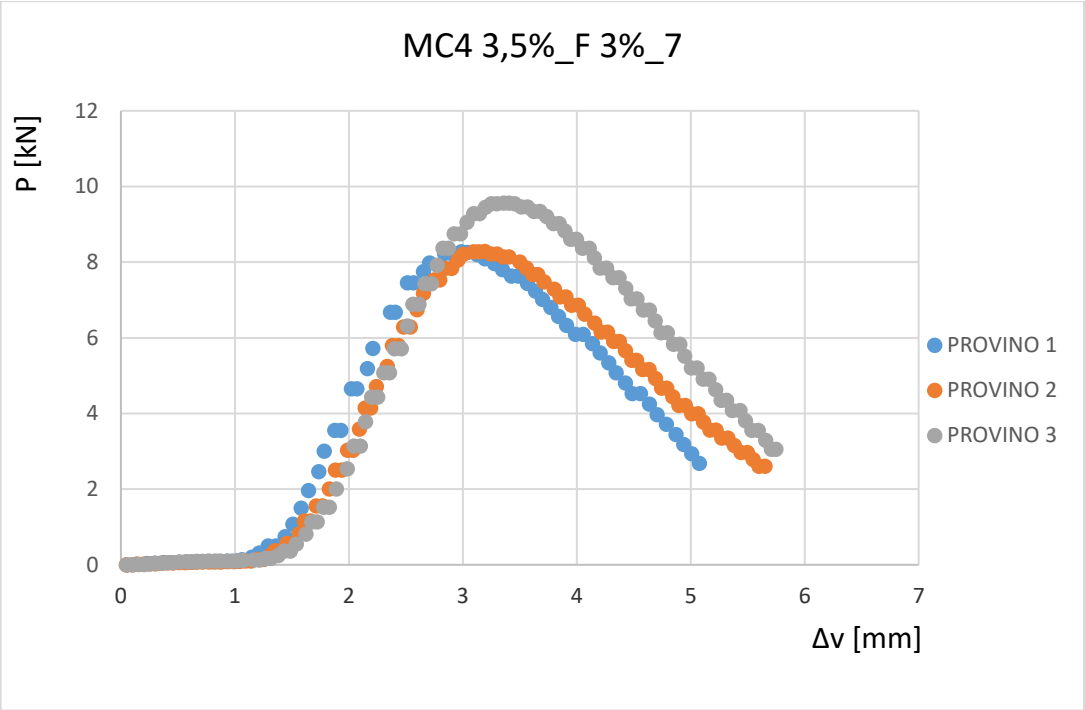


Fig. 3.43 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini MC4 3,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

3.5.5 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in aria, [provino MC5]

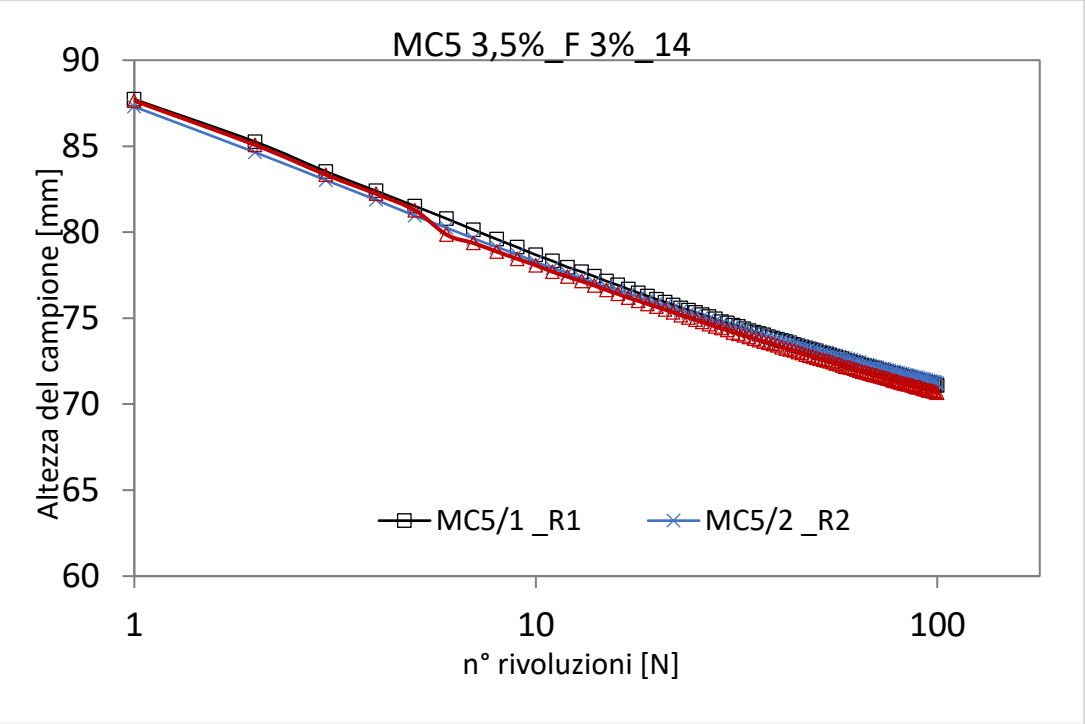


Fig. 3.44 Curve di compattazione Provini MC5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22025	2	24827	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24827	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	45	2850	2805	0,00%
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	2756	2711	3,18%
	14	-	-	-	-	-	2749	2704	3,43%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2799	-
	0	-	-	-	-	45	2848	2803	0,00%
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	2750	2705	3,39%
	14	-	-	-	-	-	2743	2698	3,64%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2799	-
	0	-	-	-	-	46	2847	2801	0,00%
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	-	-	-	-	-	2754	2709	3,25%
	14	-	-	-	-	-	2746	2701	3,54%

Tab. 3.21 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini MC5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

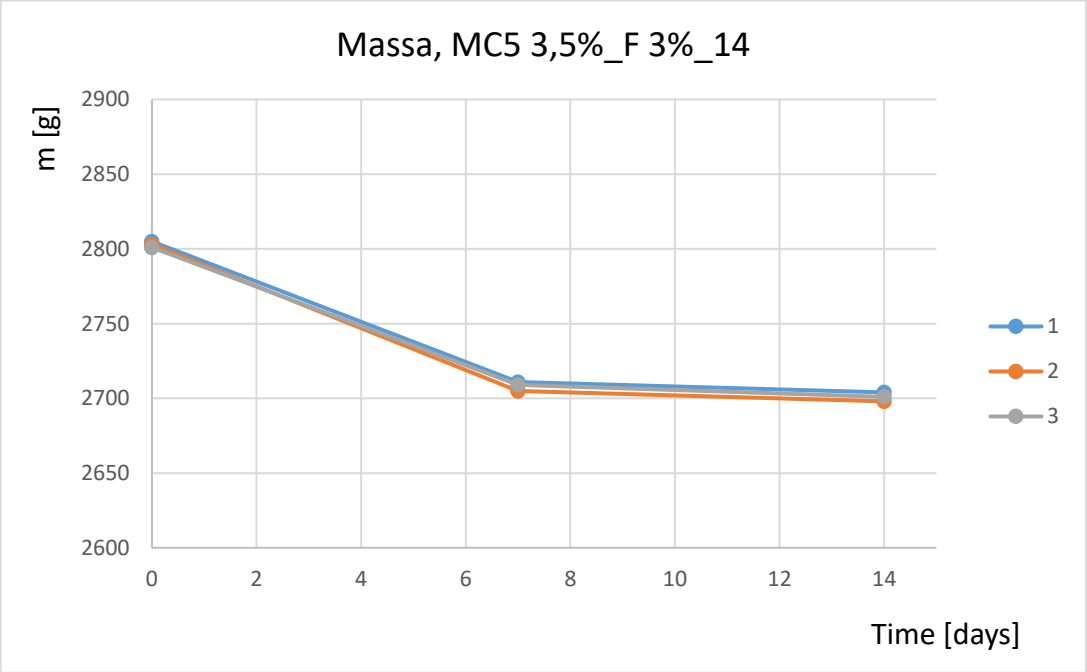


Fig. 3.45 Andamento della massa nel tempo, Provini MC5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

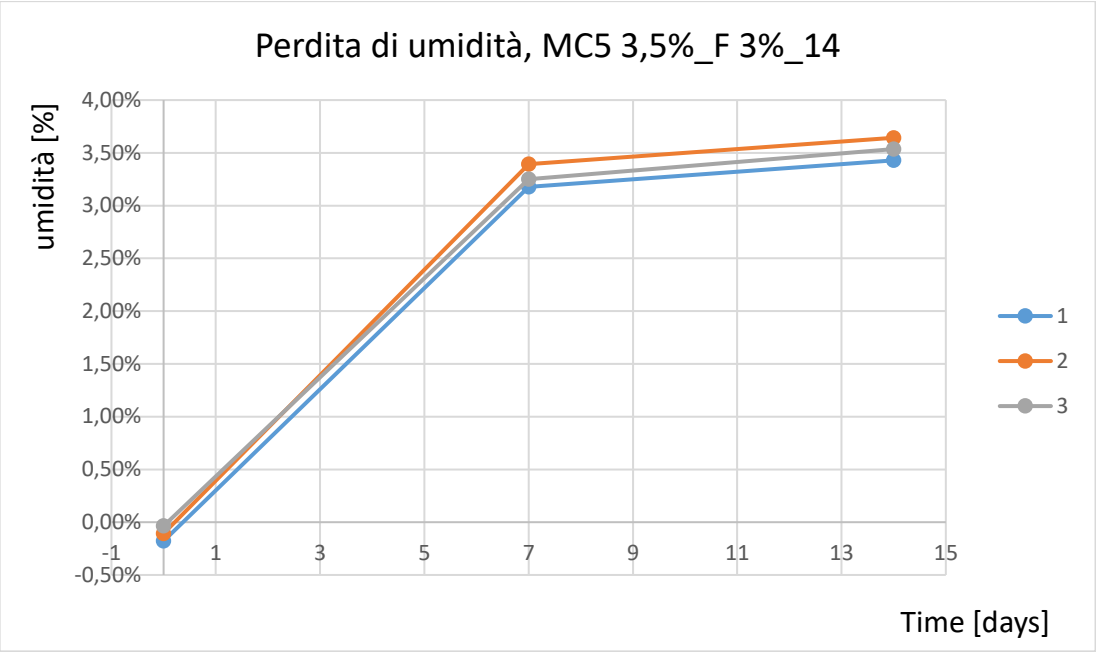


Fig. 3.46 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini MC5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

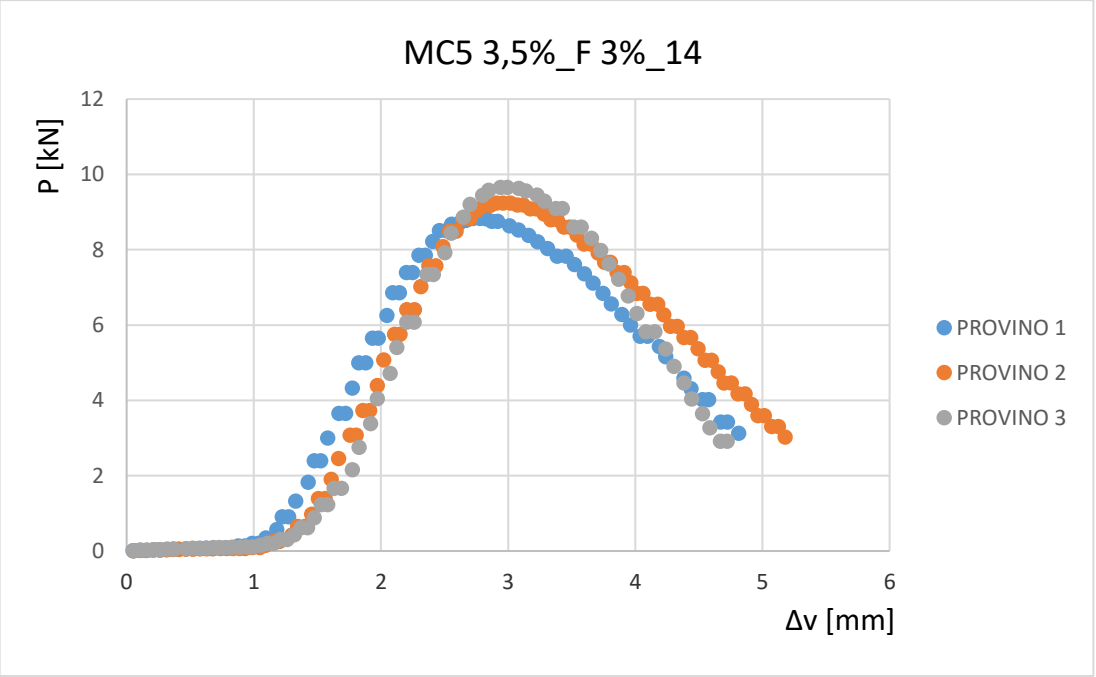


Fig. 3.47 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini MC5 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

3.5.6 Maturazione a 14 giorni successivo condizionamento in acqua, [provino MC6]

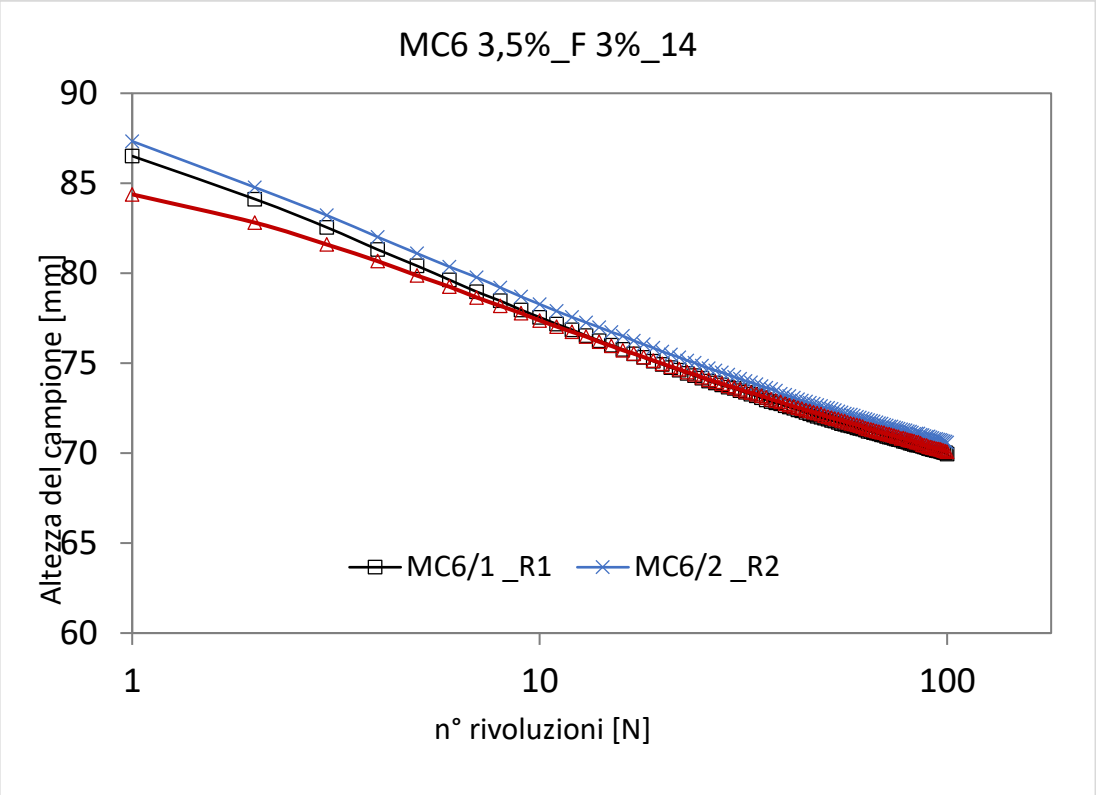


Fig. 3.48 Curve di compattazione Provini MC6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24811	-	-	2787	-
	0	-	-	-	-	44	2832	2788	0,43%
	3	-	-	-	-	-	2749	2705	3,39%
	7	-	-	-	-	-	2736	2692	3,86%
	14	-	-	-	-	-	2730	2686	4,07%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2799	-
	0	-	-	-	-	47	2845	2798	0,07%
	3	-	-	-	-	-	2754	2710	3,21%
	7	-	-	-	-	-	2741	2697	3,68%
	14	-	-	-	-	-	2736	2692	3,86%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24810	-	-	2786	-
	0	-	-	-	-	47	2834	2787	0,46%
	3	-	-	-	-	-	2751	2707	3,32%
	7	-	-	-	-	-	2739	2695	3,75%
	14	-	-	-	-	-	2732	2688	4,00%

Tab. 3.22 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini MC6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

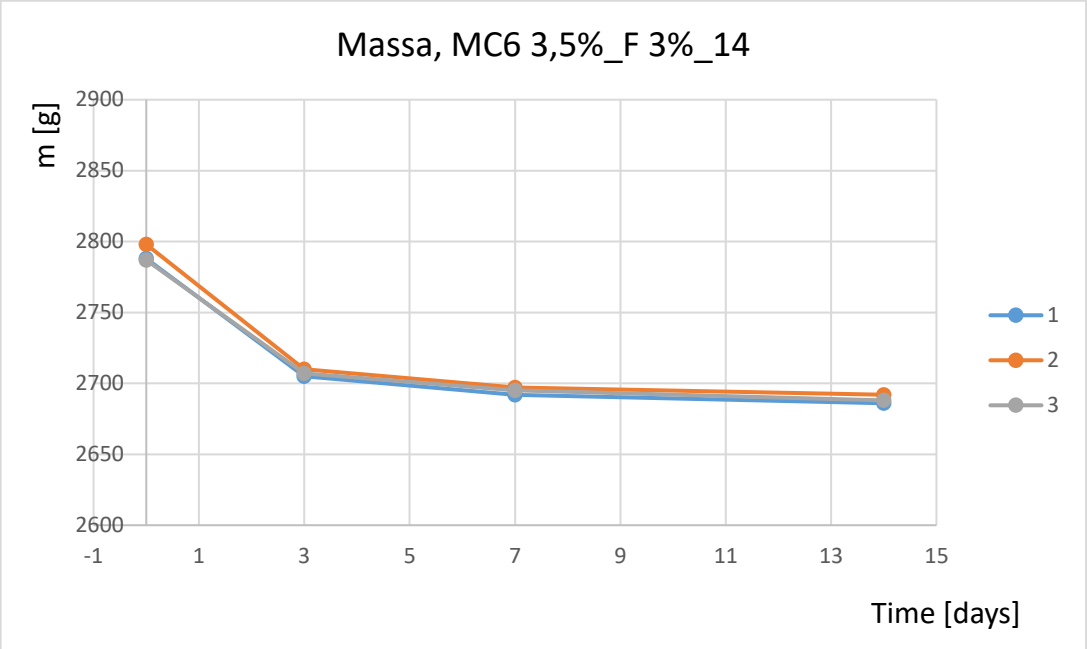


Fig. 3.49 Andamento della massa nel tempo, Provini MC6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

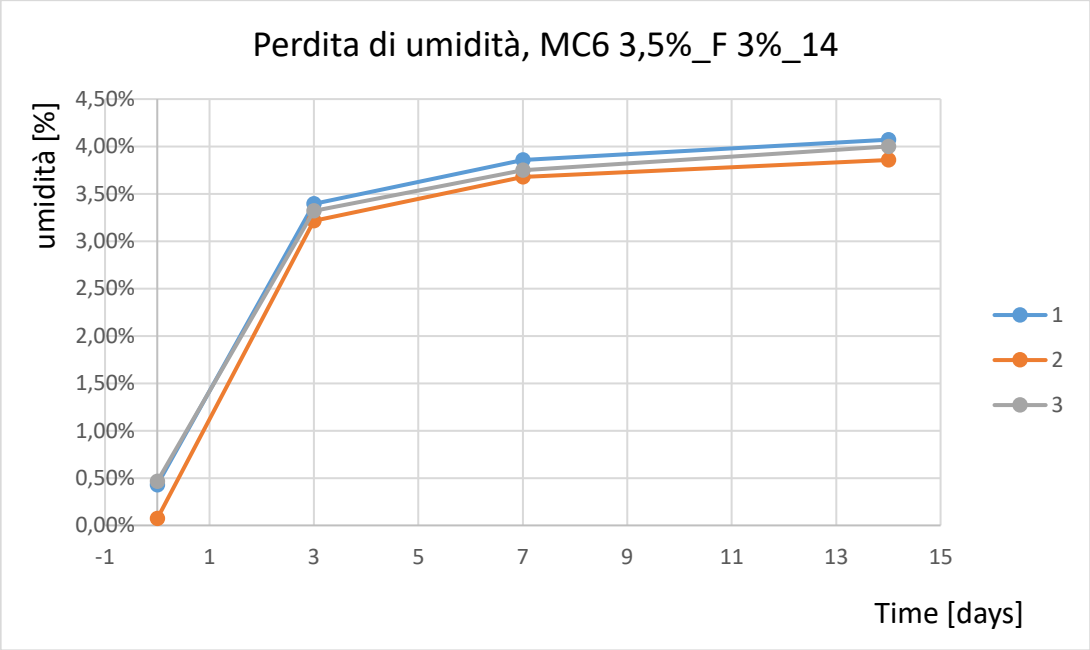


Fig. 3.50 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini MC6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

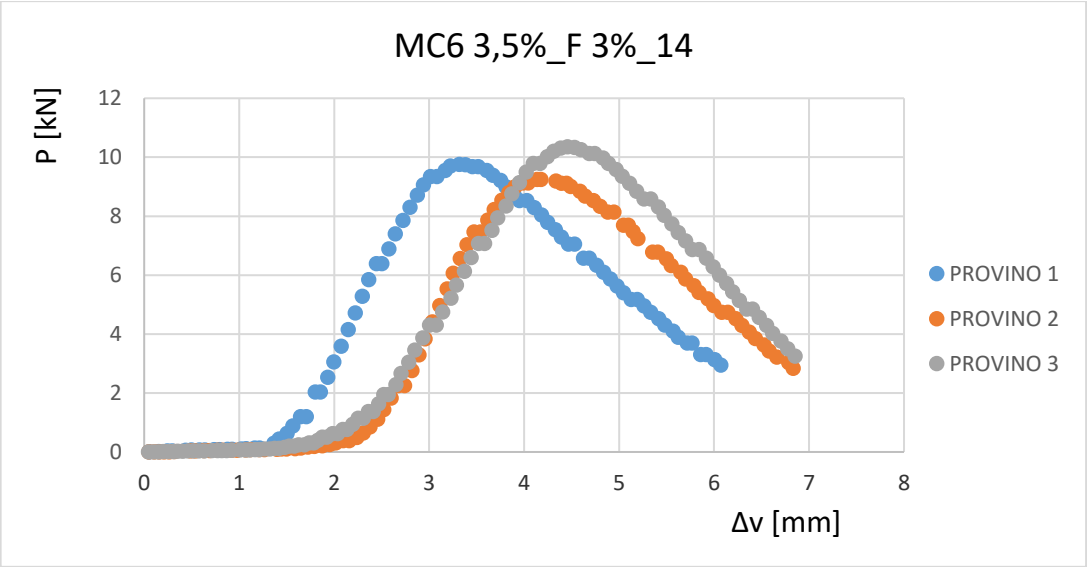


Fig. 3.51 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta Provini MC6 3,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

3.6 Miscela CM 4%, filler 3%

Successivamente verranno illustrati i risultati sperimentali della Pressa a taglio giratoria e della prova di Trazione indiretta relativi ai provini realizzati con l'emulsione bituminosa CM al 4% e filler 3%, tramite grafici che rappresentano la compattazione delle curve, la perdita di umidità e la rottura del provino. Le grandezze che seguono sono state già definite nel *Capitolo*

3.6.1 Maturazione a 3 giorni

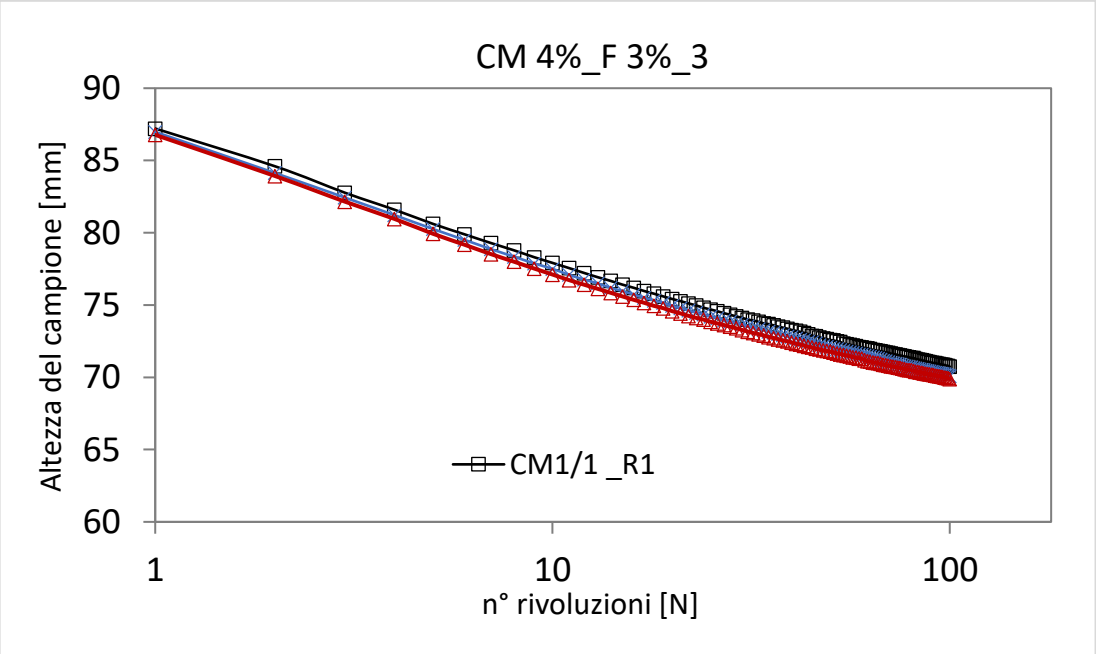


Fig. 3.52 Curve di compattazione Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24821	-	-	2796	-
	0	-	-	-	-	45	2842	2797	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2751	2706	3,36%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24814	-	-	2790	-
	0	-	-	-	-	45	2836	2791	0,32%
	3	-	-	-	-	-	2747	2702	3,50%
3	pre-compatt.	22026	2	24828	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24820	-	-	2792	-
	0	-	-	-		45	2836	2791	0,32%
	3	-	-	-	-	-	2747	2702	3,50%

Tab. 3.23 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

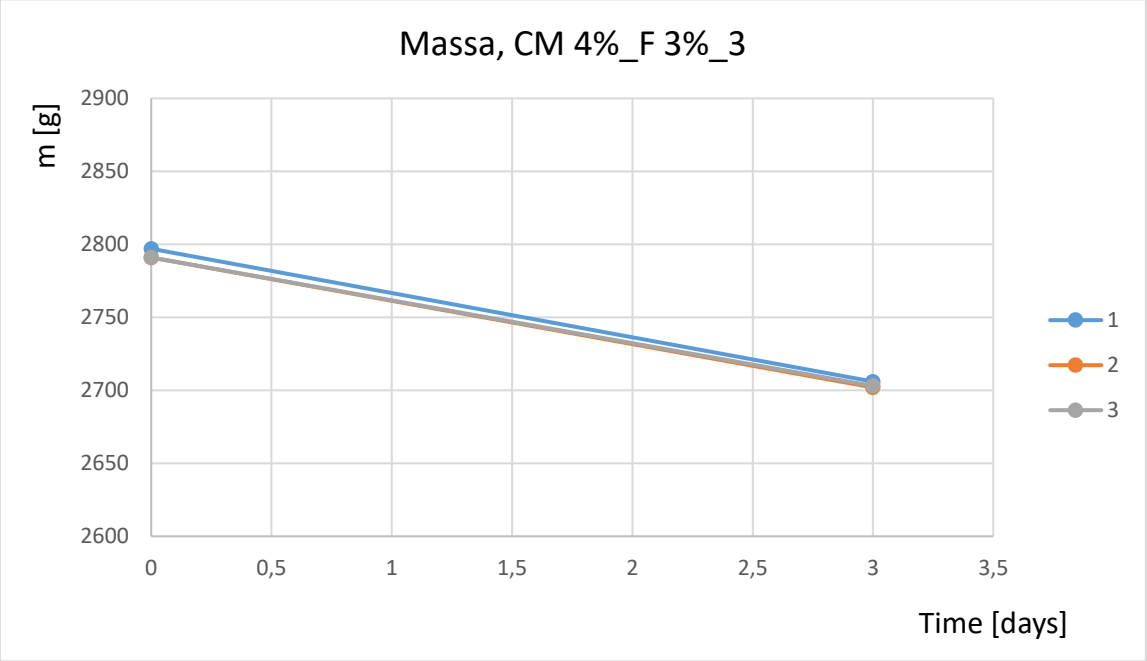


Fig. 3.53 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

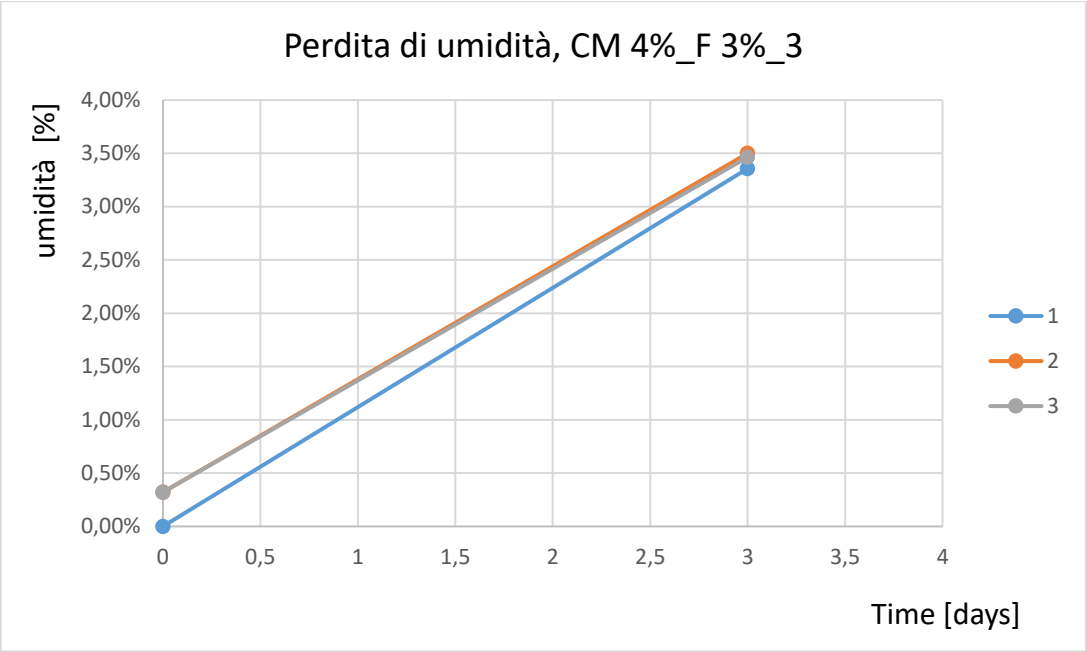


Fig. 3.54 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

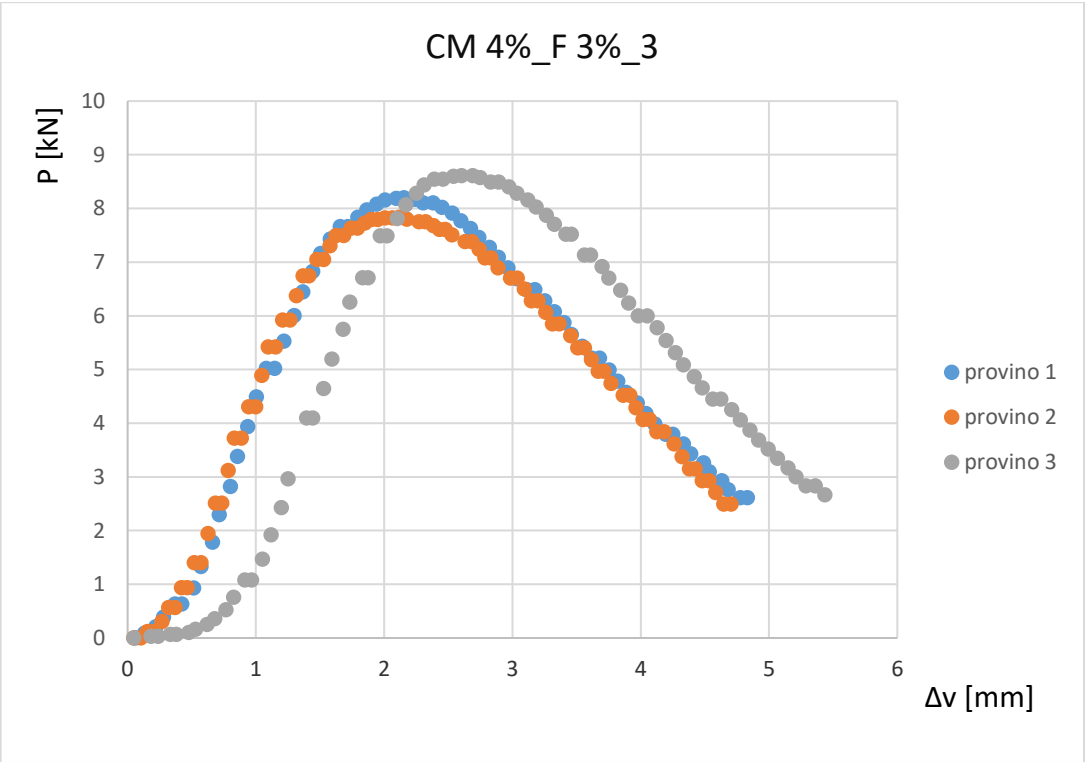


Fig. 3.55 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

3.6.2 *Maturazione a 7 giorni*

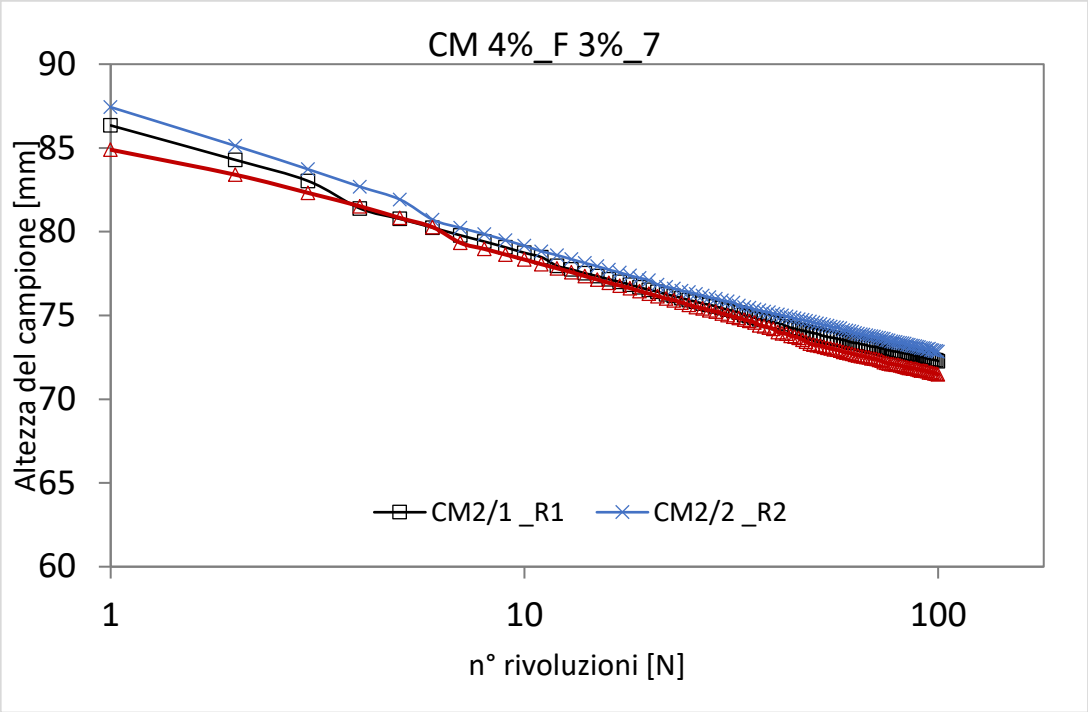


Fig. 3.56 Curve di compattazione Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22020	2	24822	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24824	-	-	2802	-
	0	-	-	-	-	49	2851	2802	-0,07%
	3	-	-	-	-	-	2744	2695	3,75%
	7	-	-	-	-	-	2736	2687	4,04%
2	pre-compatt.	22019	2	24821	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24821	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	47	2850	2803	-0,11%
	3	-	-	-	-	-	2751	2702	3,50%
	7	-	-	-	-	-	2739	2690	3,93%
3	pre-compatt.	22020	2	24822	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24821	-	-	2799	-
	0	-	-	-	-	47	2846	2799	0,04%
	3	-	-	-	-	-	2747	2698	3,64%
	7	-	-	-	-	-	2738	2689	3,96%

Tab. 3.24 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

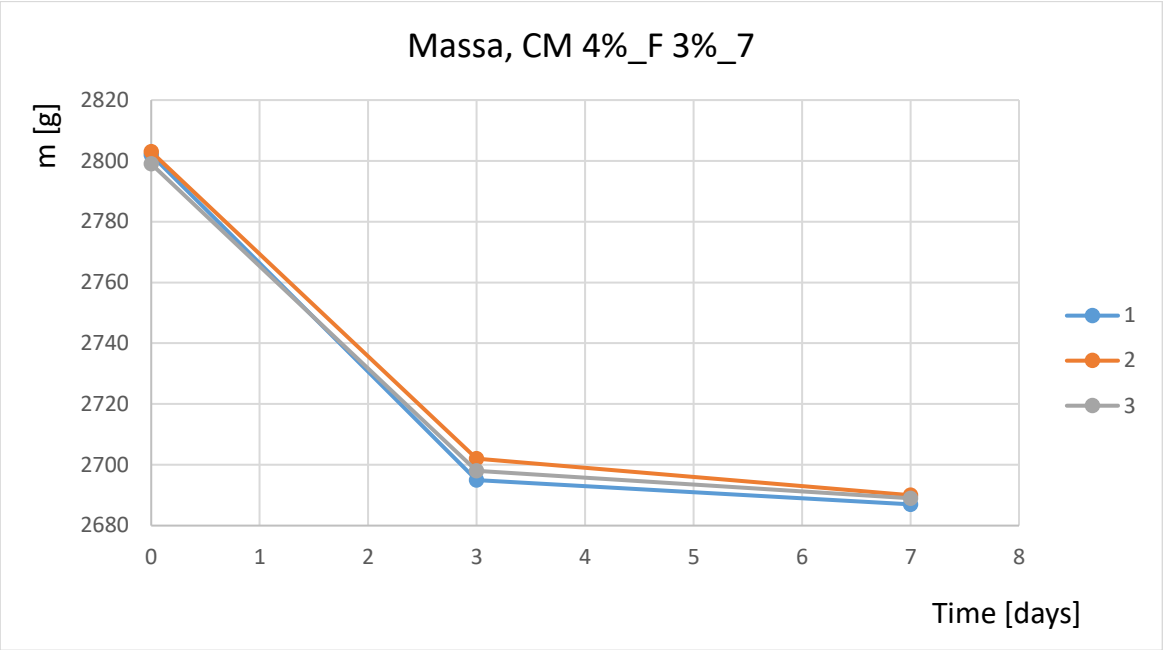


Fig. 3.57 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

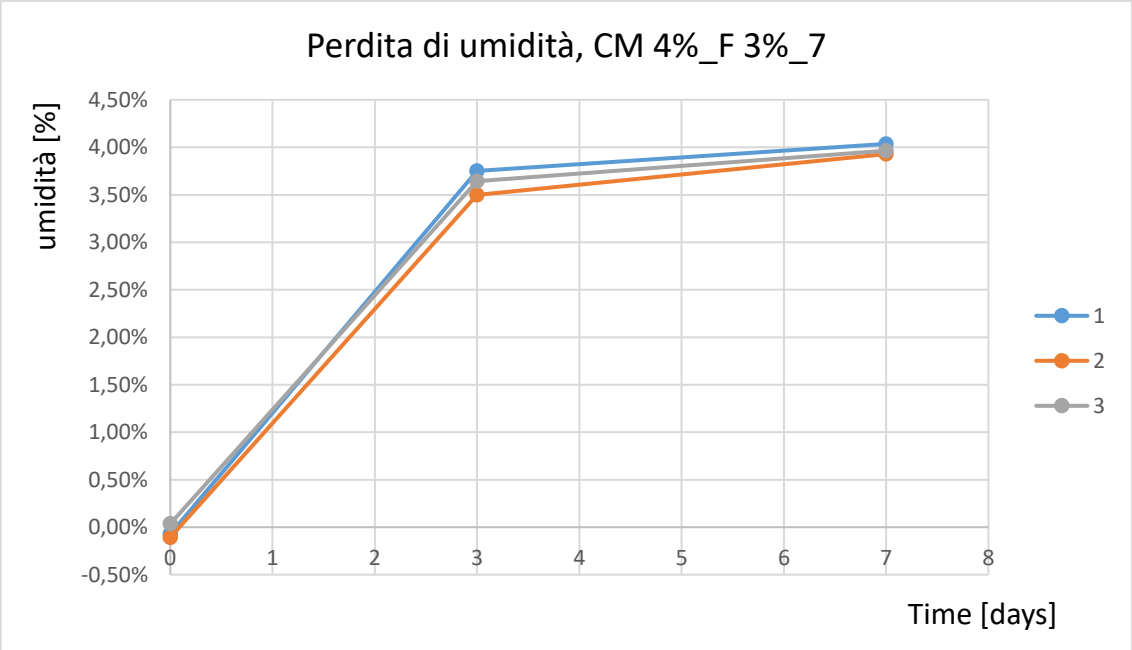


Fig. 3.58 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

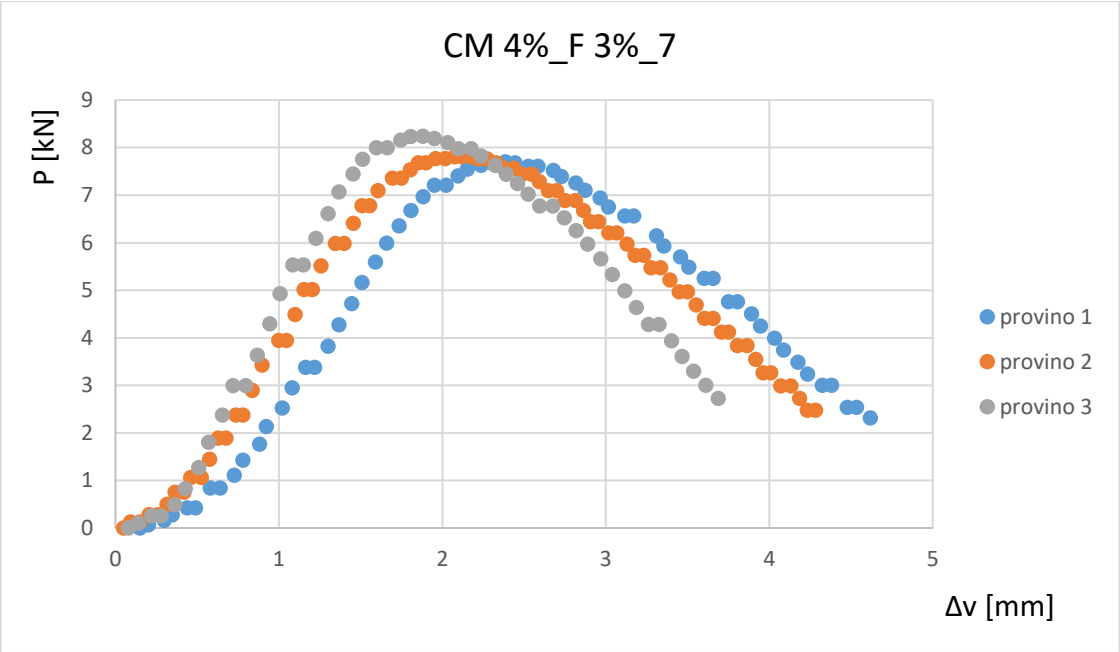


Fig. 3.59 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

3.6.3 Maturazione a 14 giorni

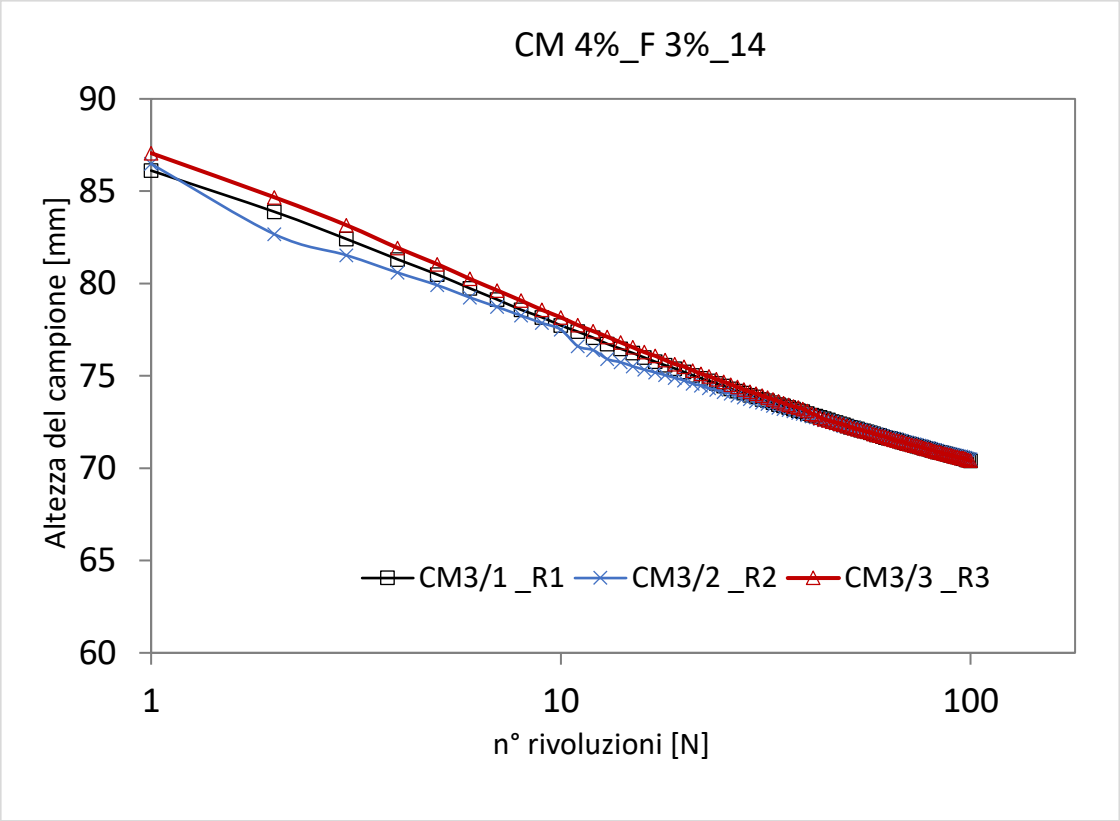


Fig. 3.60 Curve di compattazione Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24822	-	-	2798	-
	0	-	-	-	-	45	2841	2796	0,14%
	3	-	-	-	-	-	2744	2699	3,61%
	7	-	-	-	-	-	2740	2695	3,75%
	14	-	-	-	-	-	2734	2689	3,96%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24818	-	-	2794	-
	0	-	-	-	-	44	2839	2795	0,18%
	3	-	-	-	-	-	2744	2699	3,61%
	7	-	-	-	-	-	2741	2696	3,71%
	14	-	-	-	-	-	2735	2690	3,93%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24817	-	-	2793	-
	0	-	-	-	-	44	2835	2791	0,32%
	3	-	-	-	-	-	2738	2693	3,82%
	7	-	-	-	-	-	2735	2690	3,93%
	14	-	-	-	-	-	2738	2693	3,82%

Tab. 3.25 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

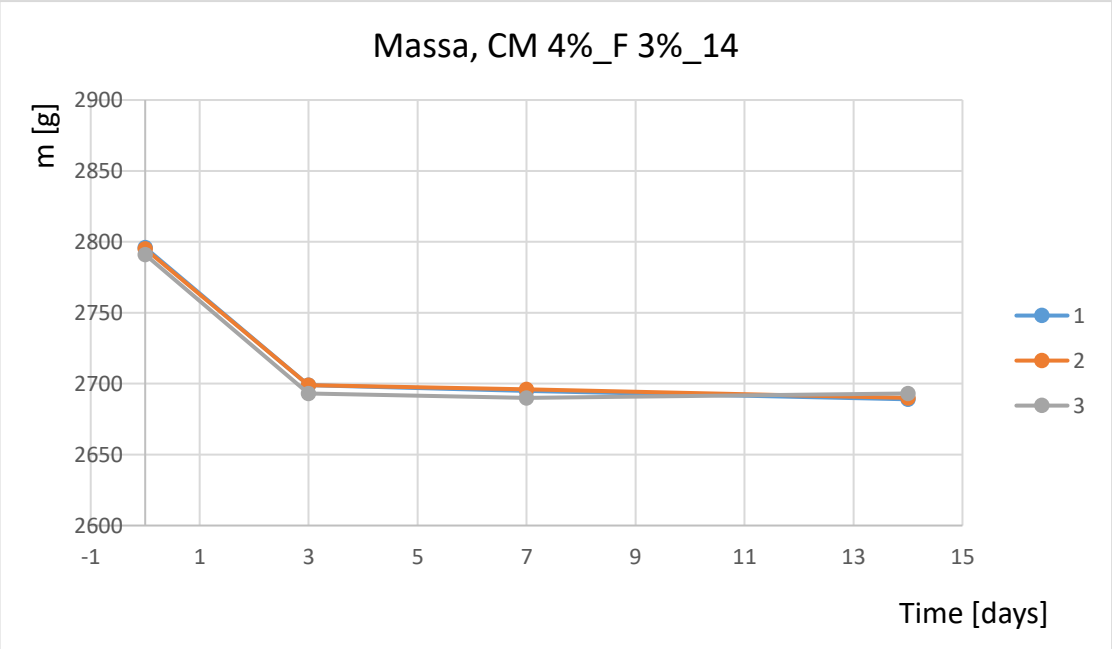


Fig. 3.61 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

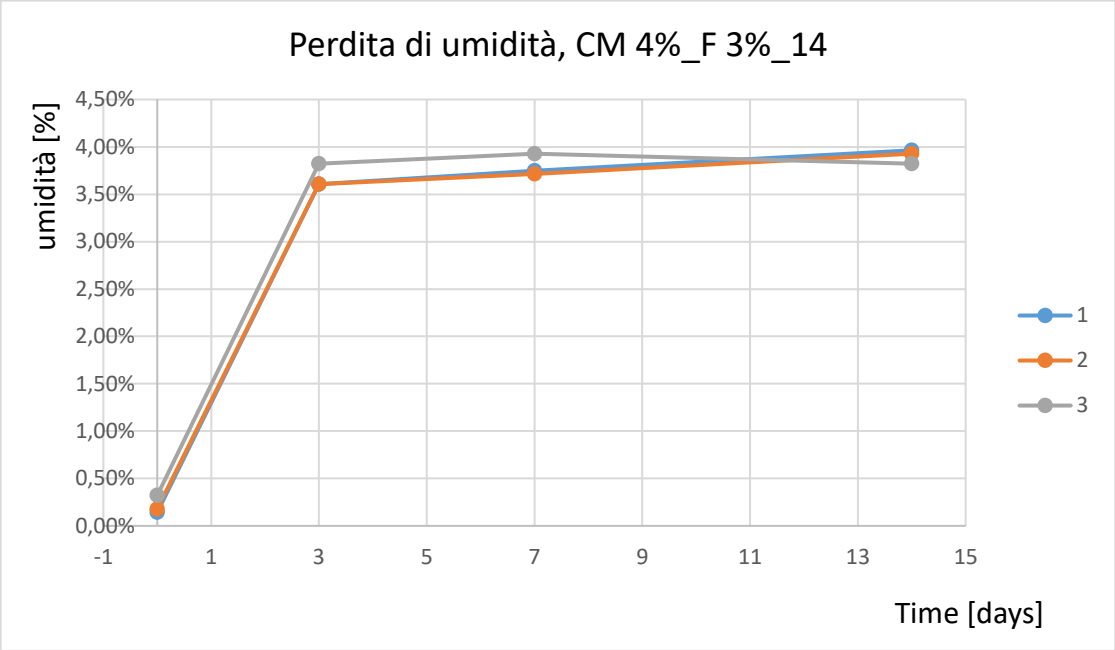


Fig. 3.62 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

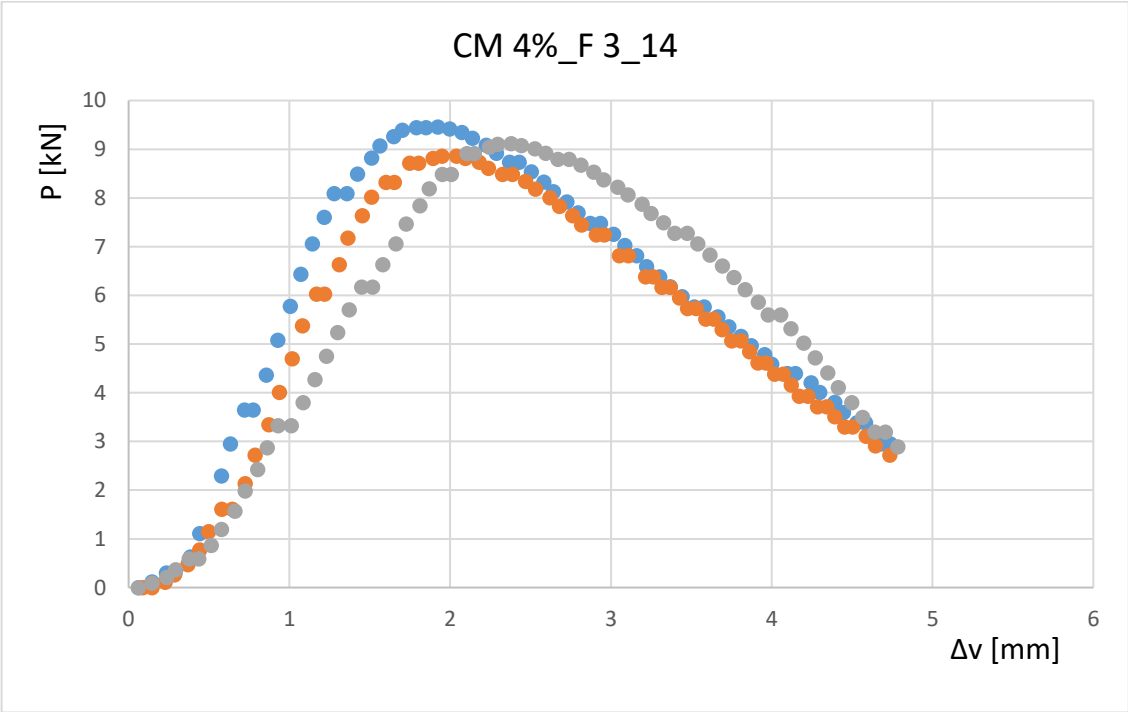


Fig. 3.63 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

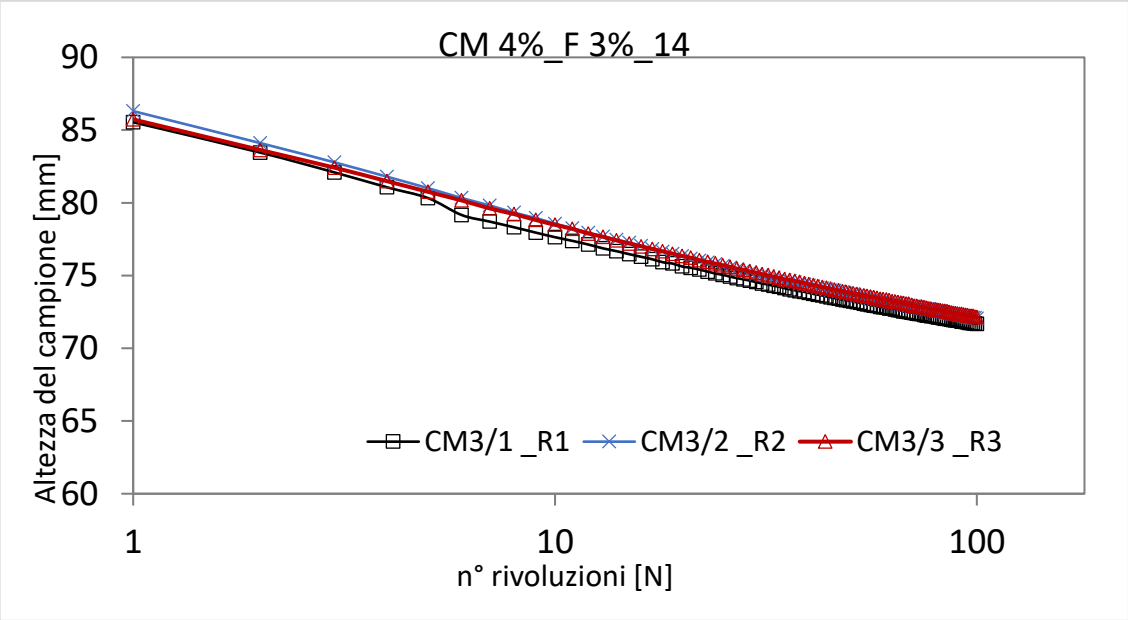


Fig. 3.64 Curve di compattazione Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24822	-	-	2798	-
	0	-	-	-	-	45	2841	2796	0,14%
	3	-	-	-	-	-	2744	2699	3,61%
	7	-	-	-	-	-	2740	2695	3,75%
	14	-	-	-	-	-	2734	2689	3,96%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24818	-	-	2794	-
	0	-	-	-	-	44	2839	2795	0,18%
	3	-	-	-	-	-	2744	2699	3,61%
	7	-	-	-	-	-	2741	2696	3,71%
	14	-	-	-	-	-	2735	2690	3,93%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24817	-	-	2793	-
	0	-	-	-	-	44	2835	2791	0,32%
	3	-	-	-	-	-	2738	2693	3,82%
	7	-	-	-	-	-	2735	2690	3,93%
	14	-	-	-	-	-	2738	2693	3,82%

Tab. 3.26 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

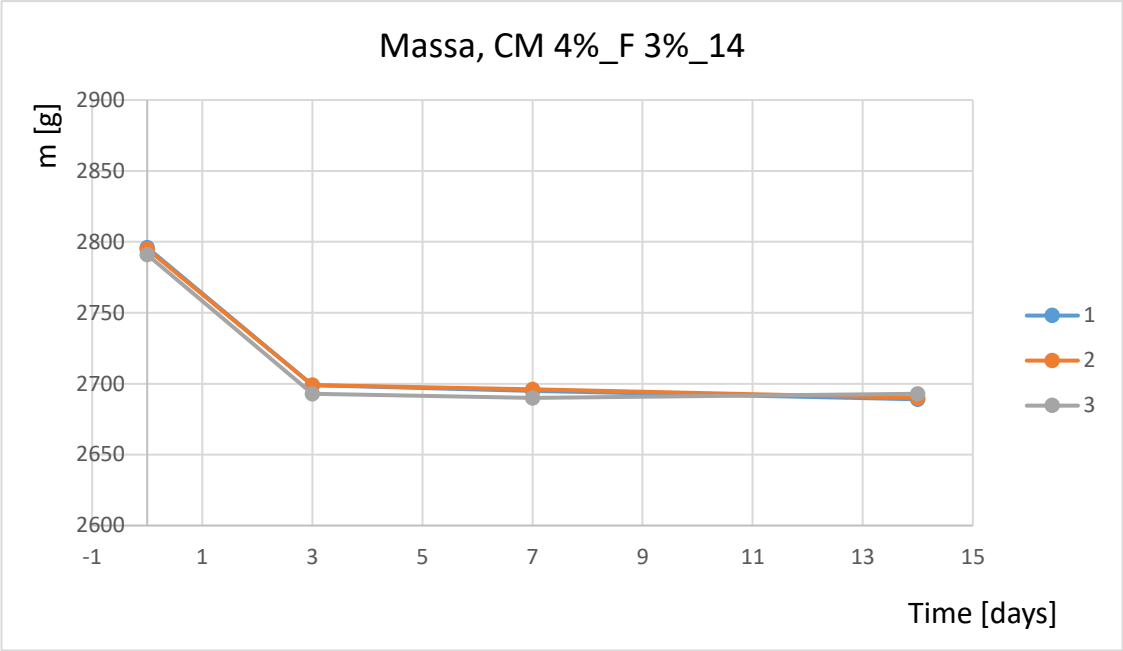


Fig. 3.65 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

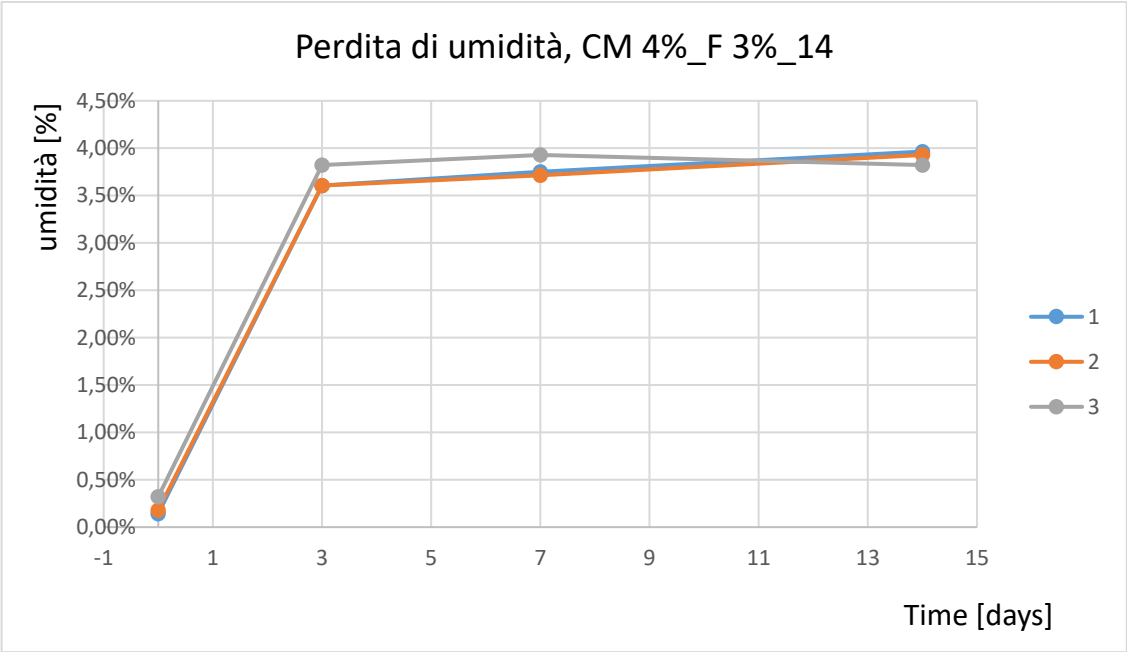


Fig. 3.66 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

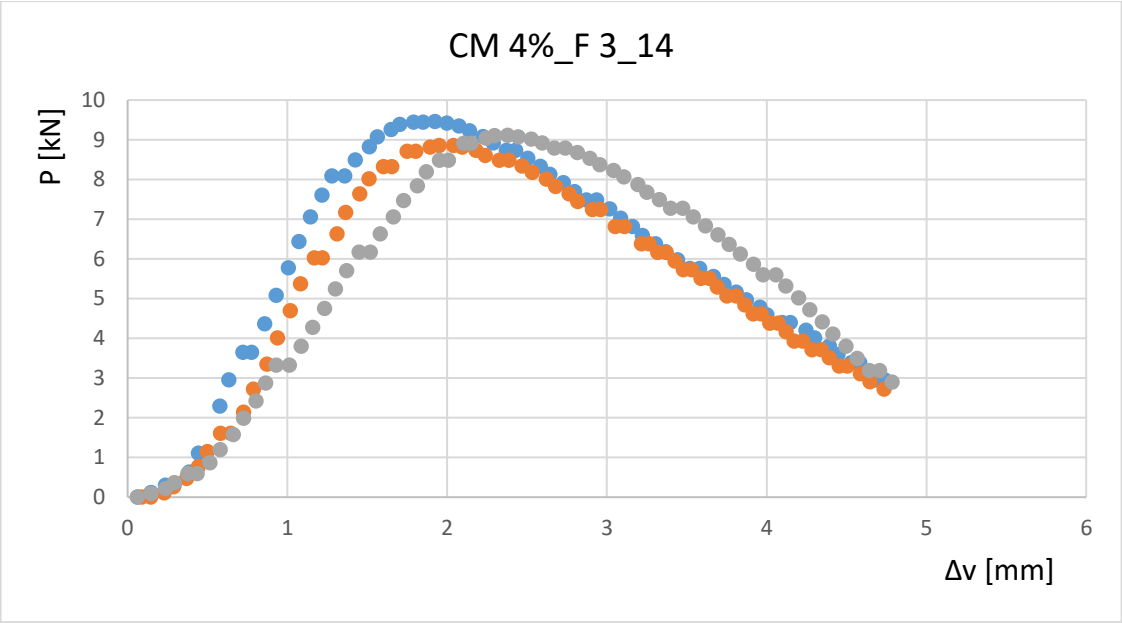


Fig. 3.67 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

3.7 Miscela CM 4%, filler 3,5%

Successivamente verranno illustrati i risultati sperimentali della Pressa a taglio giratoria e della prova di Trazione indiretta relativi ai provini realizzati con l'emulsione bituminosa CM al 4% e filler 3,5%, tramite grafici che rappresentano la compattazione delle curve, la perdita di umidità e la rottura del provino. Le grandezze che seguono sono state già definite nel *Capitolo 3.3.*

3.7.1 Maturazione a 3 giorni

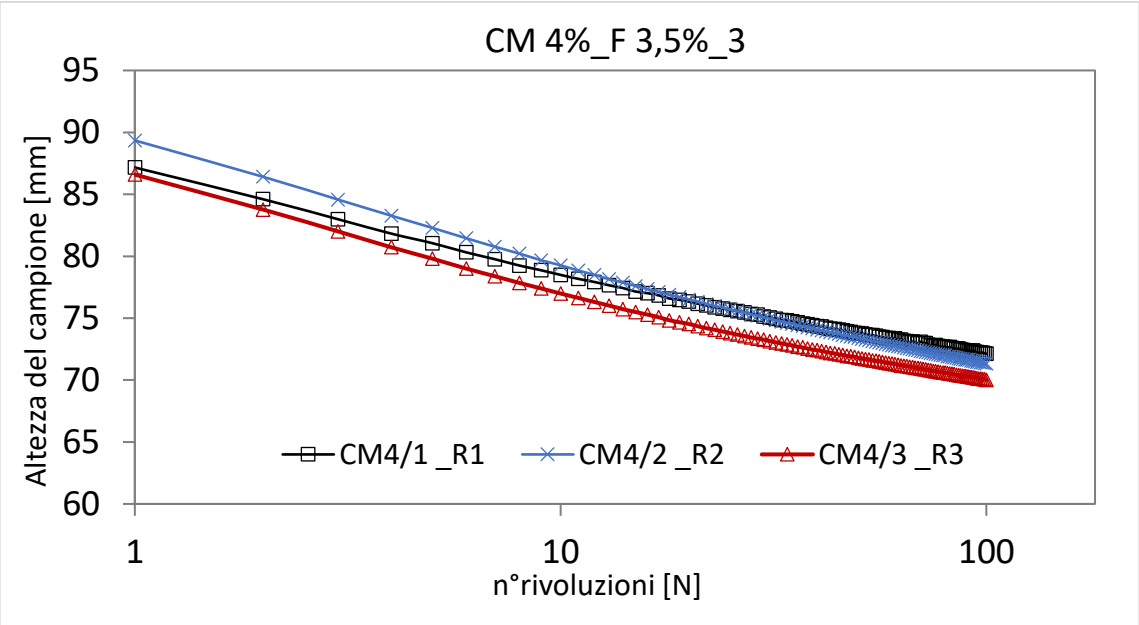


Fig. 3.68 Curve di compattazione Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22016	2	24818	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24824	-	-	2806	-
	0	-	-	-	-	48	2850	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2751	2703	3,46%
2	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2800	-
	0	-	-	-	-	46	2845	2799	0,04%
	3	-	-	-	-	-	2751	2703	3,46%
3	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24809	-	-	2784	-
	0	-	-	-	-	45	2832	2787	0,46%
	3	-	-	-	-	-	2740	2692	3,86%

Tab. 3.27 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 3 giorni

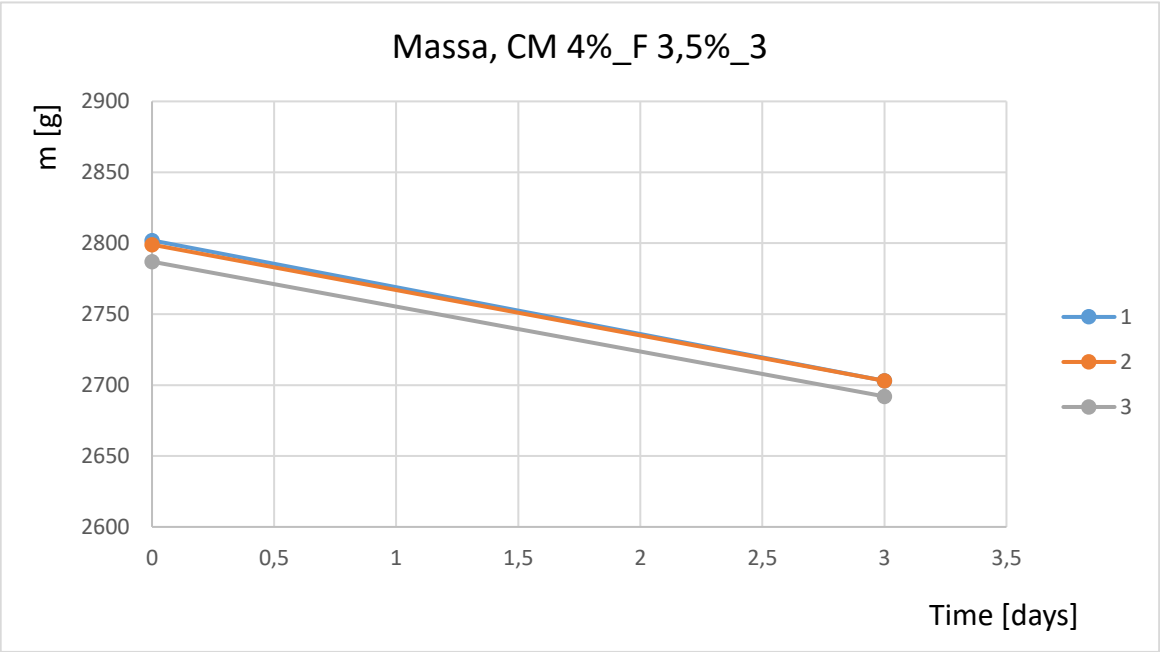


Fig. 3.69 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 3 giorni

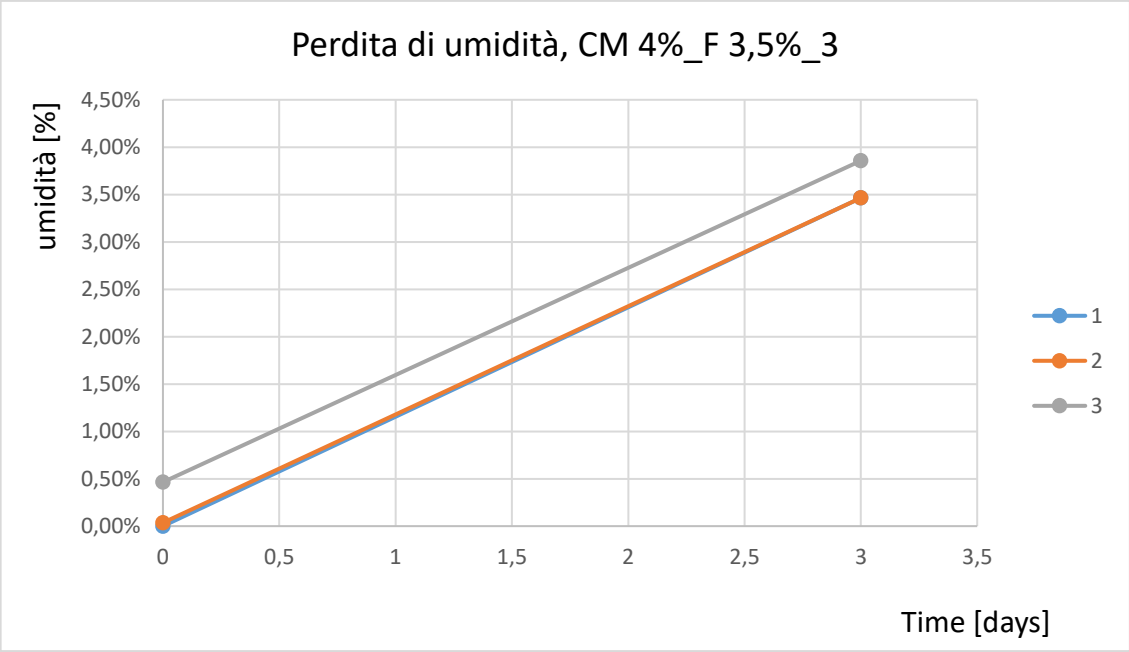


Fig. 3.70 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 3 giorni

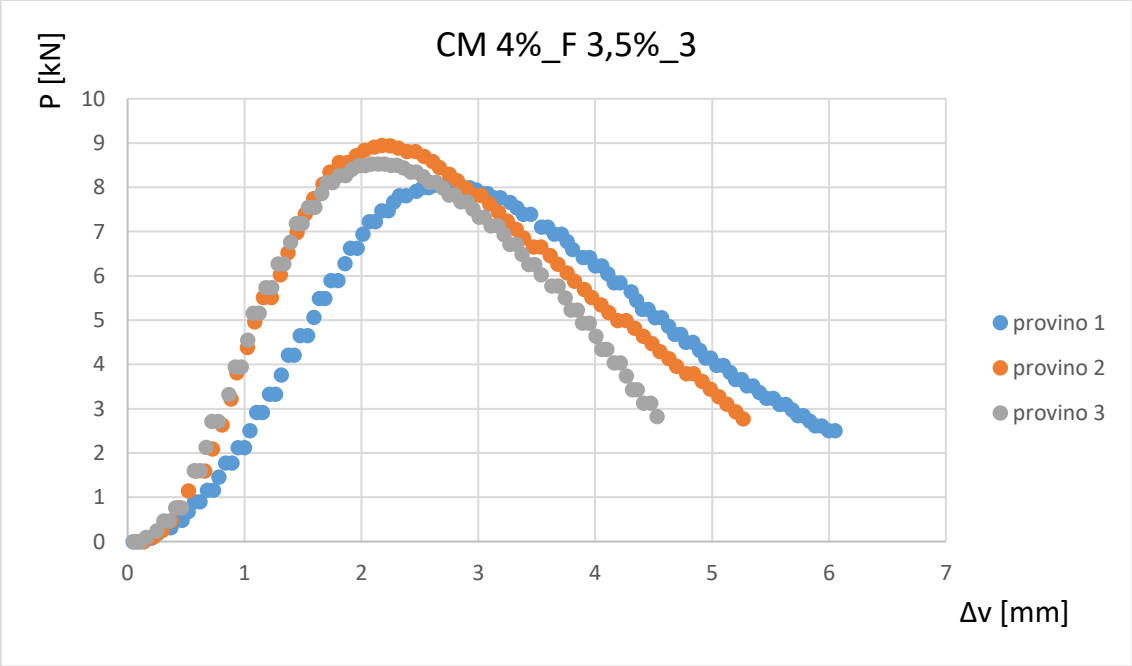


Fig. 3.71 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 3 giorni

3.7.2 *Maturazione a 7 giorni*

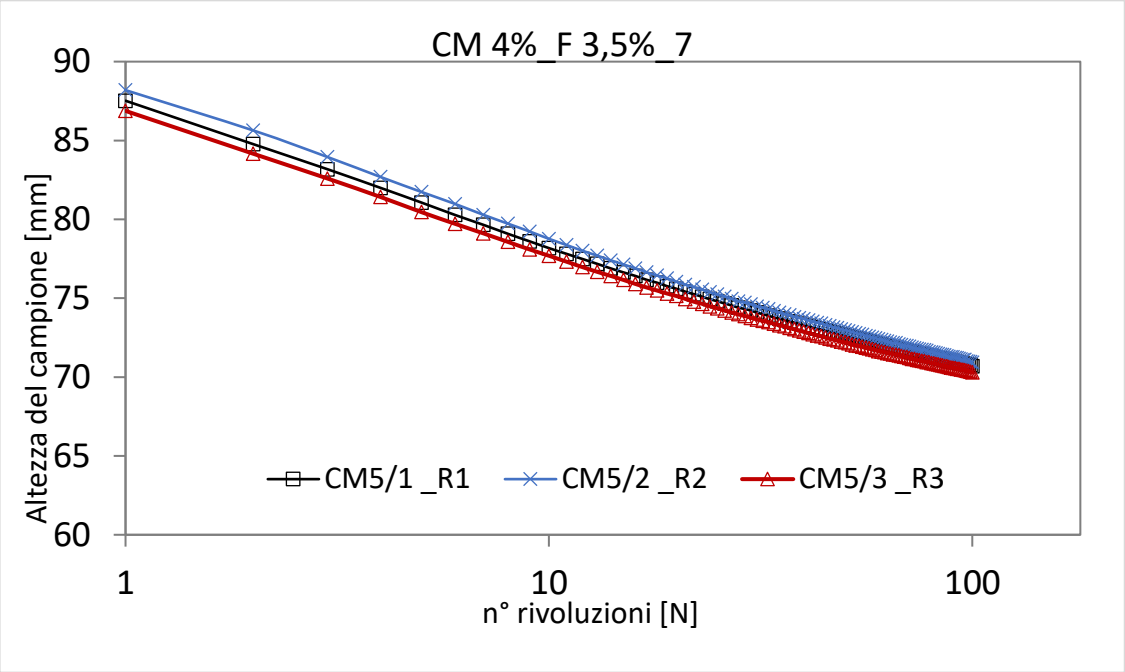


Fig. 3.72 Curve di compattazione Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24820	-	-	2796	-
	0	-	-	-	-	47	2845	2798	0,07%
	3	-	-	-	-	-	2750	2703	3,46%
	7	-	-	-	-	-	2745	2698	3,64%
2	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2798	-
	0	-	-	-	-	48	2848	2800	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2753	2706	3,36%
	7	-	-	-	-	-	2748	2701	3,54%
3	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24817	-	-	2794	-
	0	-	-	-	-	47	2841	2794	0,21%
	3	-	-	-	-	-	2741	2694	3,79%
	7	-	-	-	-	-	2735	2688	4,00%

Tab. 3.28 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 7 giorni

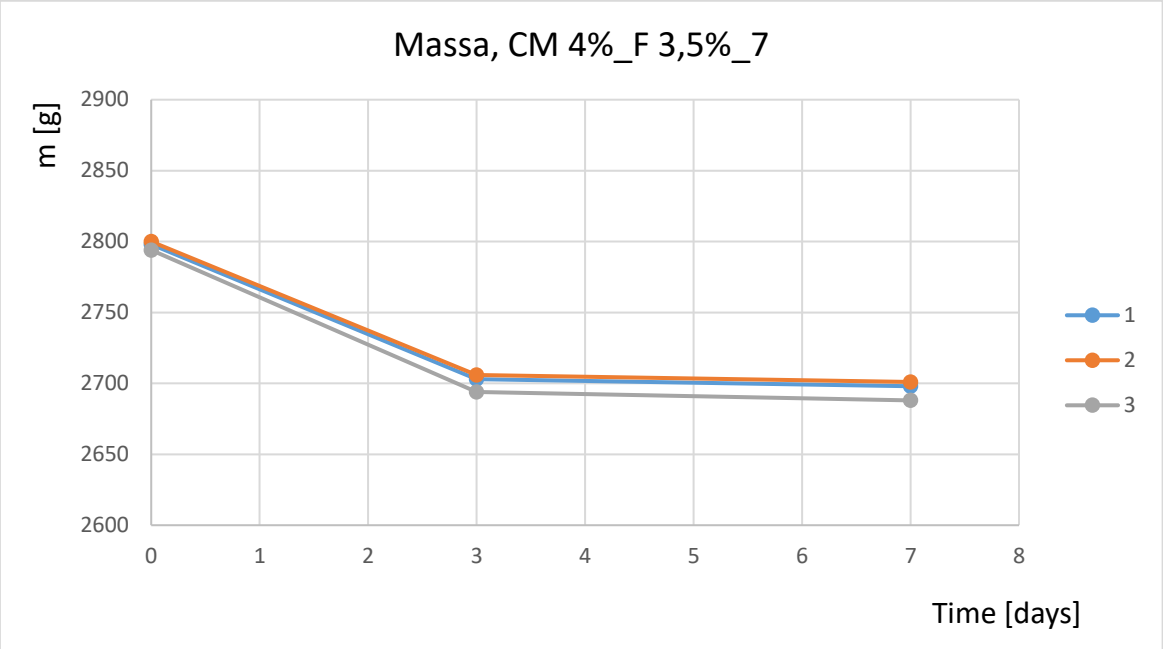


Fig. 3.73 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 7 giorni

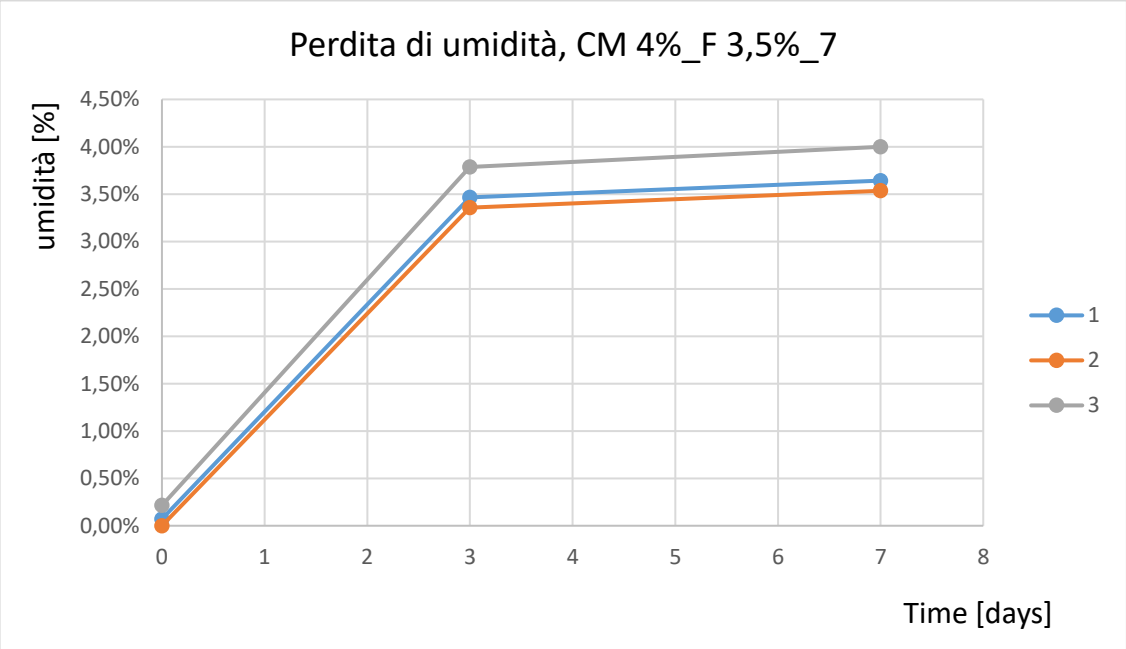


Fig. 3.74 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 7 giorni

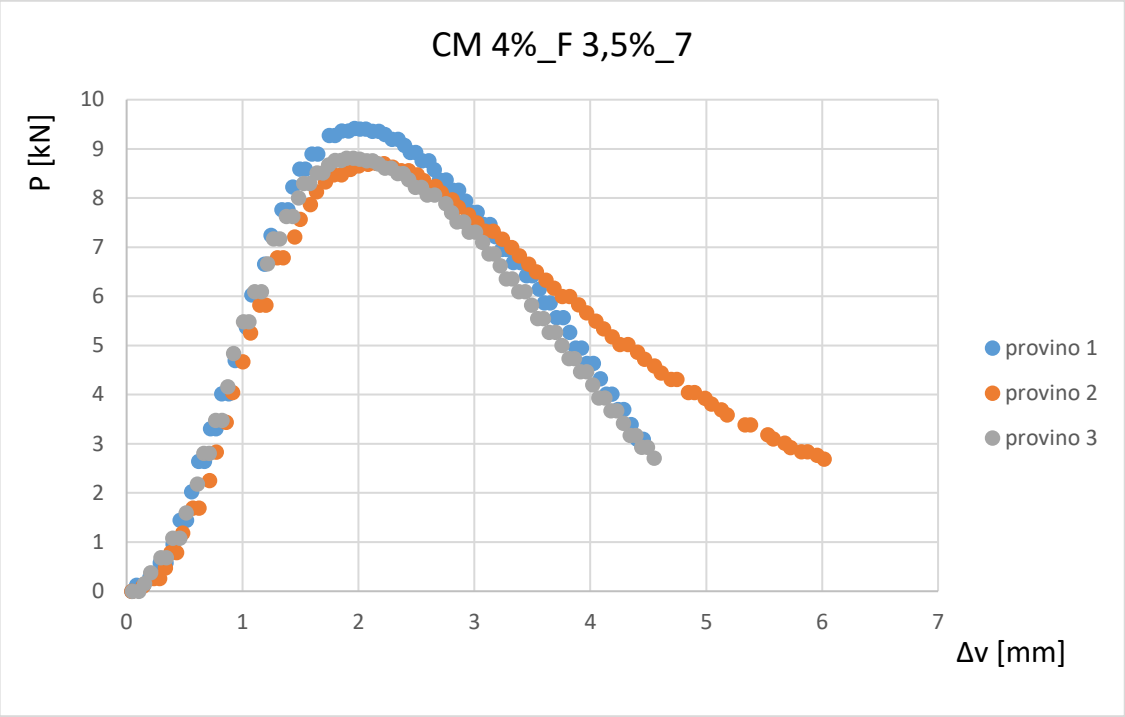


Fig. 3.75 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 7 giorni

3.7.3 Maturazione a 14 giorni

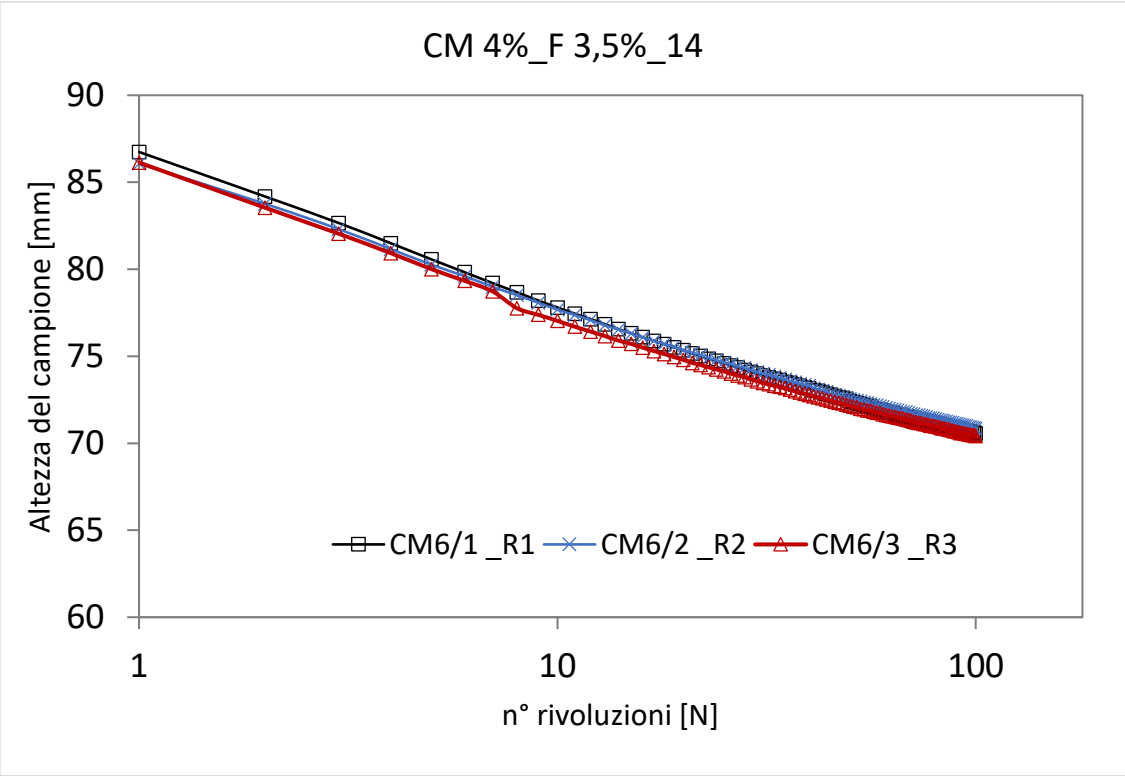


Fig. 3.76 Curve di compattazione Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22026	2	24828	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	244820	-	-	222792	-
	0	-	-	-	-	45	2839	2794	0,21%
	3	-	-	-	-	-	2739	2694	3,79%
	7	-	-	-	-	-	2736	2691	3,89%
	14	-	-	-	-	-	2731	2686	4,07%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24822	-	-	2798	-
	0	-	-	-	-	44	2845	2801	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2749	2704	3,43%
	7	-	-	-	-	-	2746	2701	3,54%
	14	-	-	-	-	-	2741	2696	3,71%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24817	-	-	2793	-
	0	-	-	-	-	48	2841	2793	0,25%
	3	-	-	-	-	-	2745	2700	3,57%
	7	-	-	-	-	-	2740	2695	3,75%
	14	-	-	-	-	-	2733	2688	4,00%

Tab. 3.29 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 14 giorni

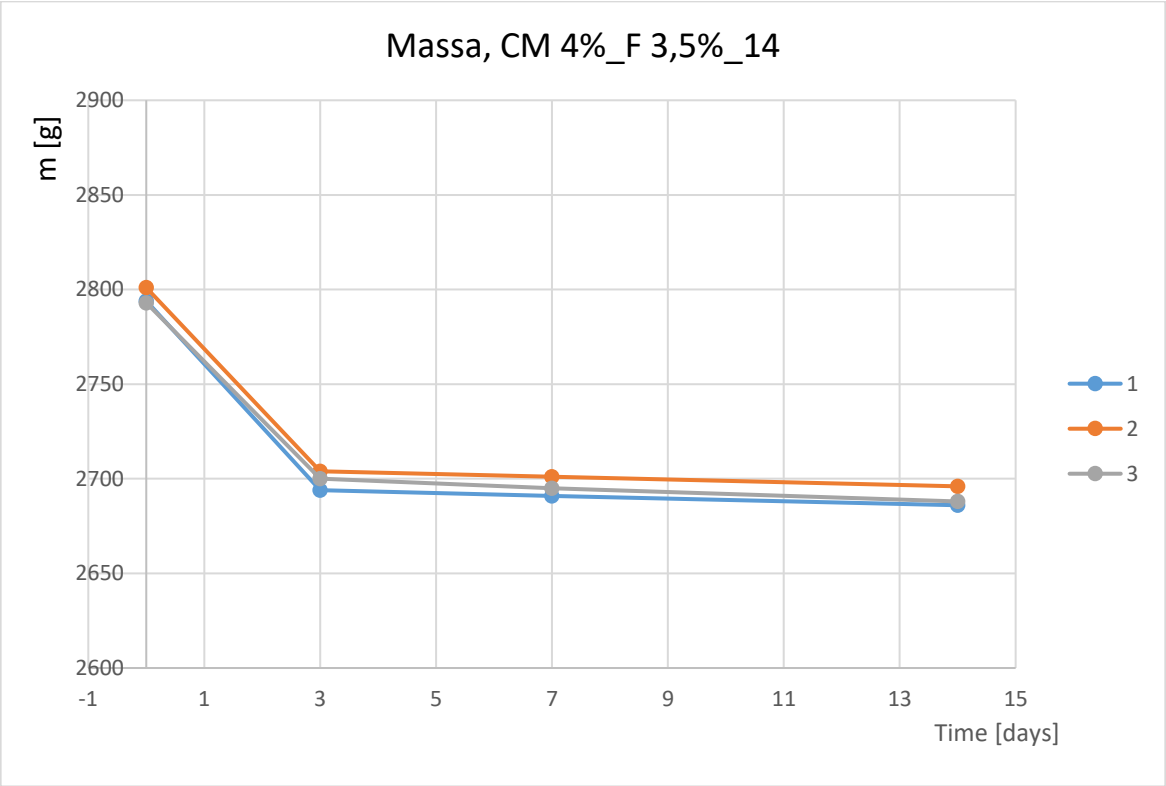


Fig. 3.77 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 14 giorni

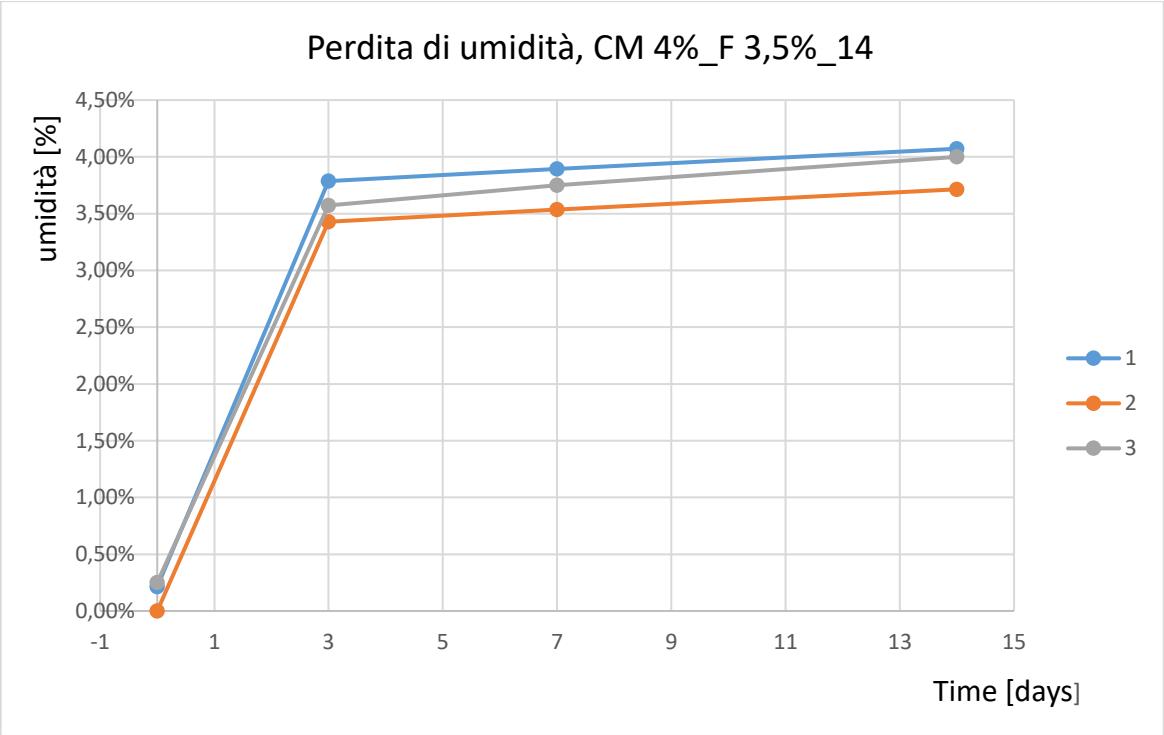


Fig. 3.78 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 14 giorni

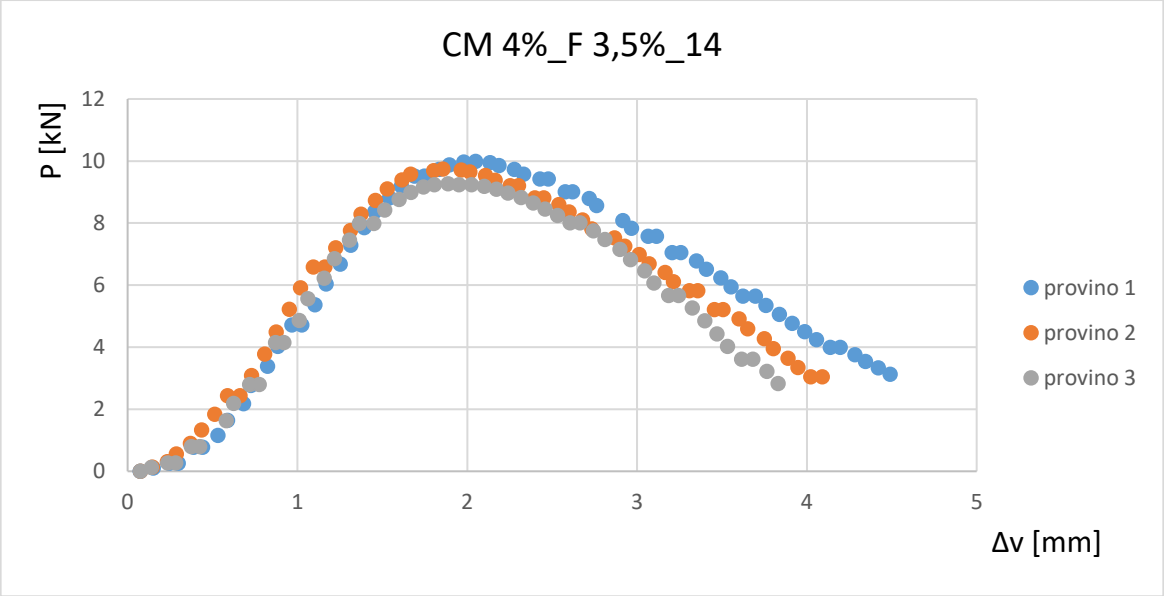


Fig. 3.79 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4%, filler 3,5% con maturazione a 14 giorni

3.8 Miscela CM 4,5%, filler 3%

Successivamente verranno illustrati i risultati sperimentali della Pressa a taglio giratoria e della prova di Trazione indiretta relativi ai provini realizzati con l'emulsione bituminosa CM al 4,5% e filler 3%, tramite grafici che rappresentano la compattazione delle curve, la perdita di umidità e la rottura del provino. Le grandezze che seguono sono state già definite nel *Capitolo 3.3.*

3.8.1 Maturazione a 3 giorni

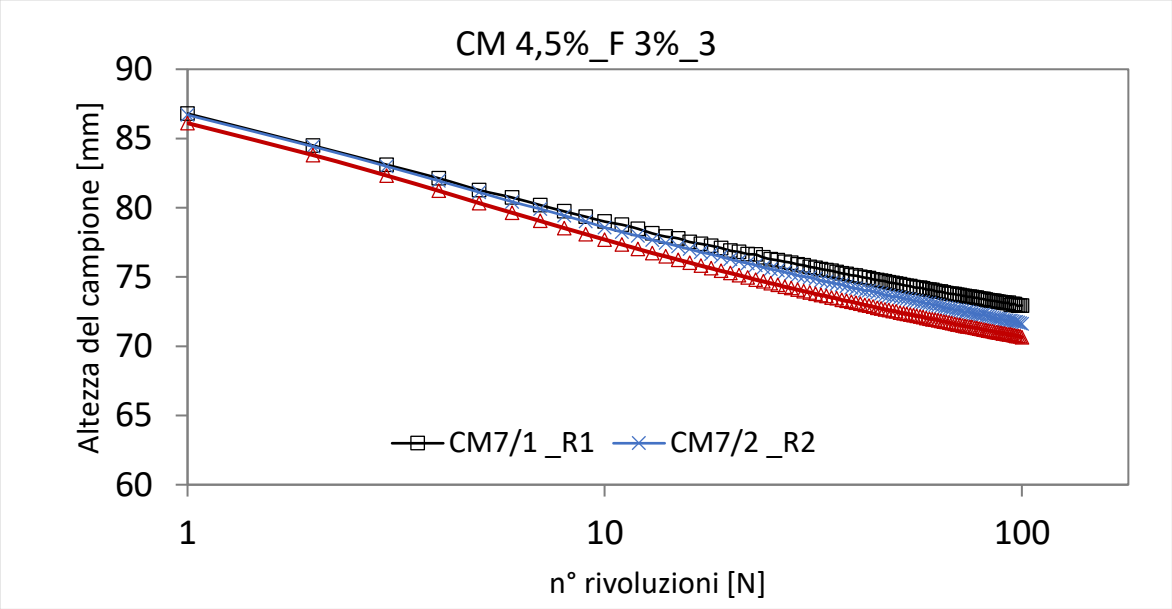


Fig. 3.80 Curve di compattazione Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22019	2	24821	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2802	-
	0	-	-	-	-	49	2851	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2749	2700	3,57%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24822	-	-	2798	-
	0	-	-	-	-	47	2847	2800	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2753	2704	3,43%
3	pre-compatt.	22020	2	24822	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24815	-	-	2793	-
	0	-	-	-	-	45	2837	2792	0,29%
	3	-	-	-	-	-	2748	2699	3,61%

Tab. 3.30 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

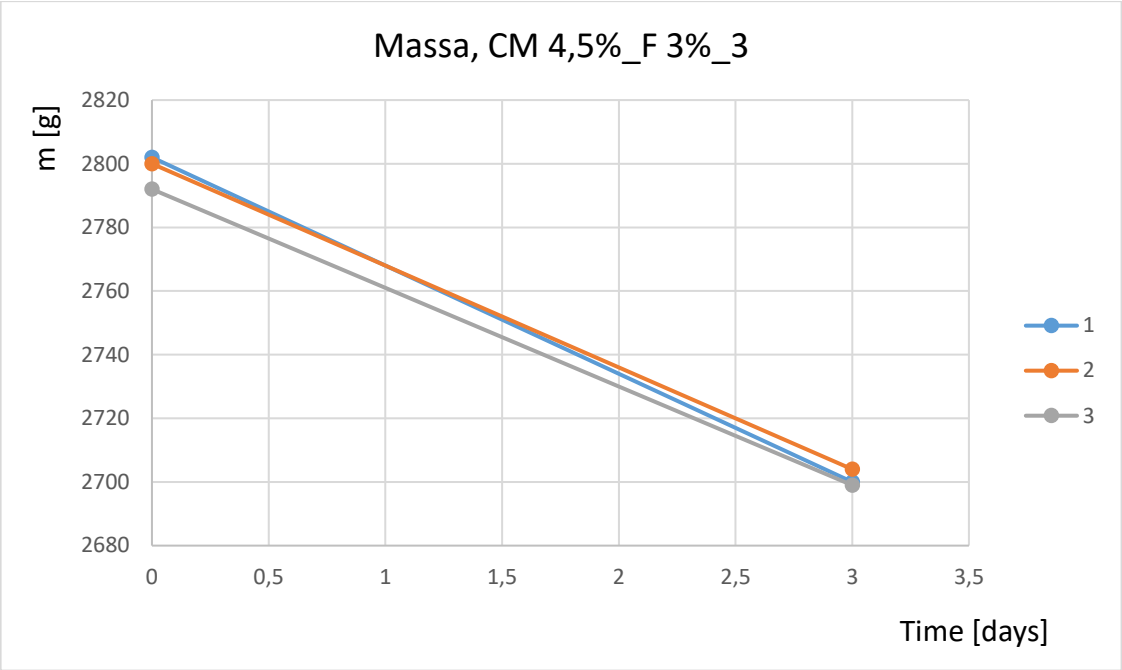


Fig. 3.81 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

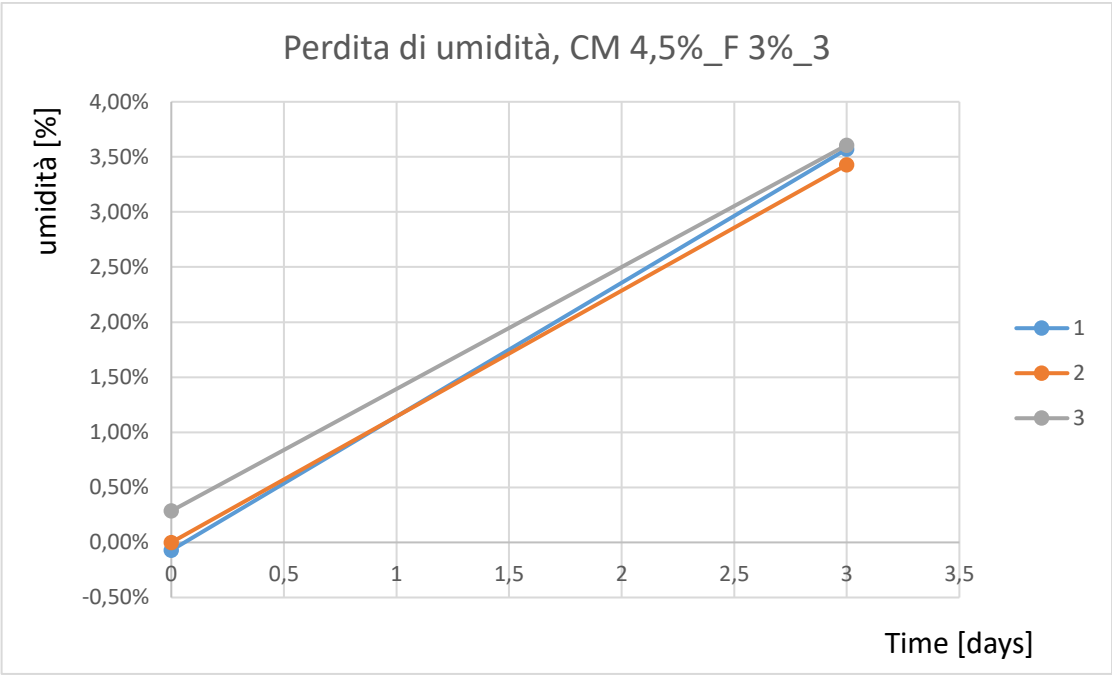


Fig. 3.82 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

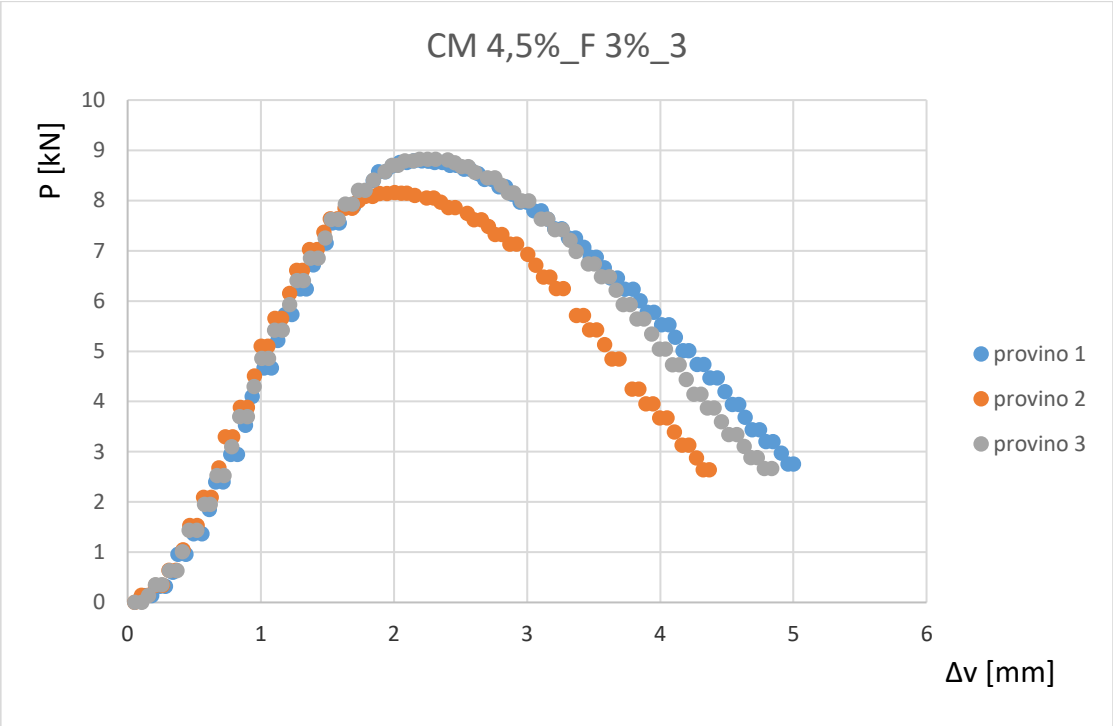


Fig. 3.83 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 3 giorni

3.8.2 Maturazione a 7 giorni

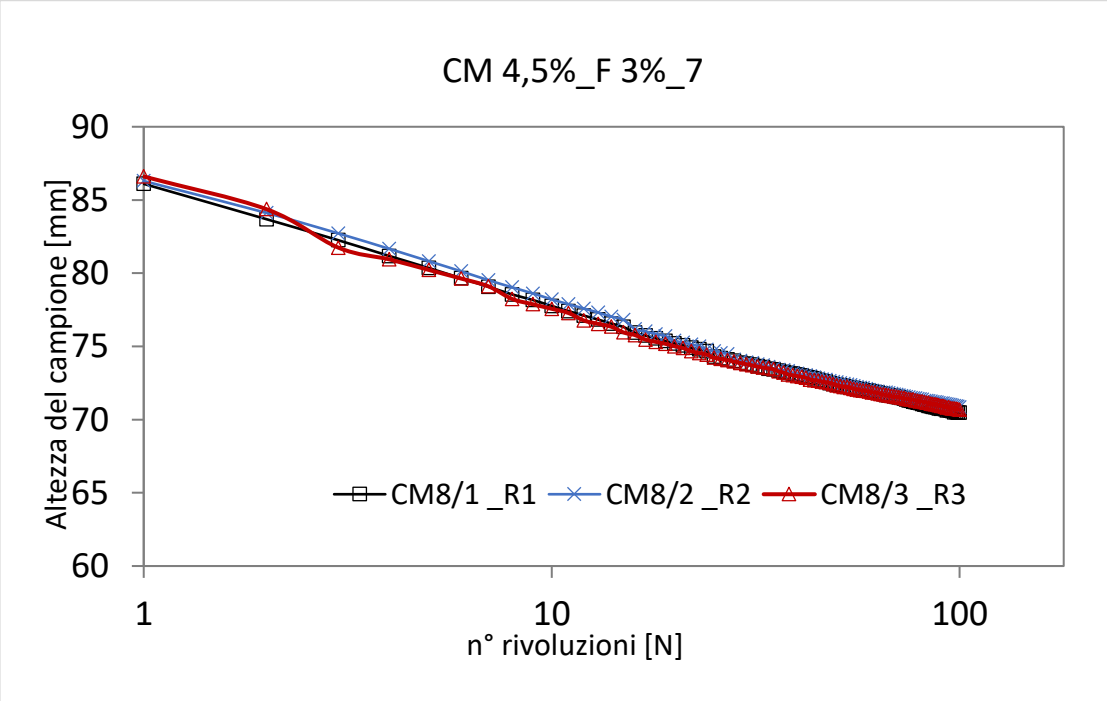


Fig. 3.84 Curve di compattazione Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24805	-	-	2781	-
	0	-	-	-	-	47	2829	2782	0,64%
	3	-	-	-	-	-	2745	2698	3,64%
	7	-	-	-	-	-	2734	2687	4,04%
2	pre-compatt.	22020	2	24822	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24814	-	-	2792	-
	0	-	-	-	-	47	2837	2790	0,36%
	3	-	-	-	-	-	2748	2701	3,54%
	7	-	-	-	-	-	2738	2691	3,89%
3	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24820	-	-	2795	-
	0	-	-	-	-	47	2836	2789	0,39%
	3	-	-	-	-	-	2754	2707	3,32%
	7	-	-	-	-	-	2742	2695	3,75%

Tab. 3.31 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

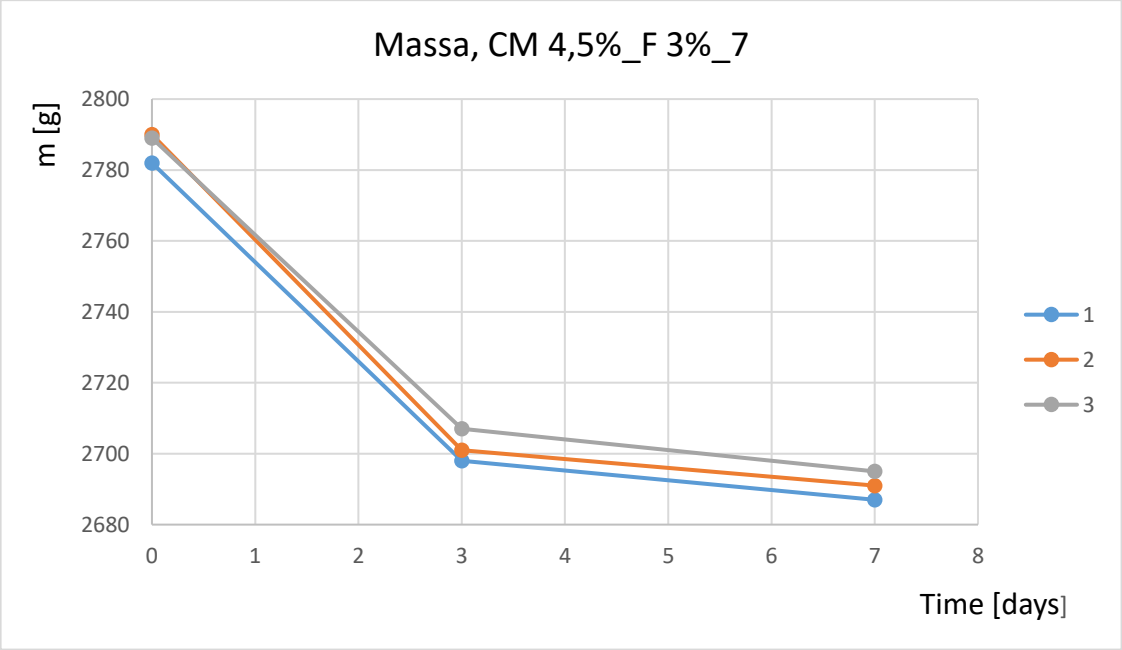


Fig. 3.85 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

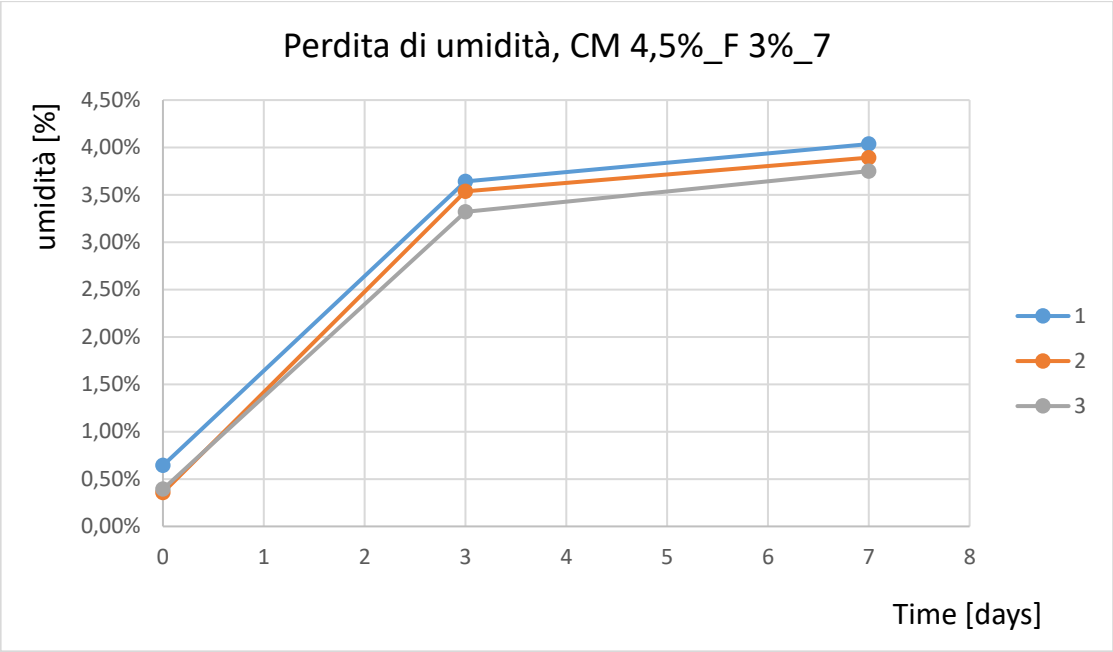


Fig. 3.86 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

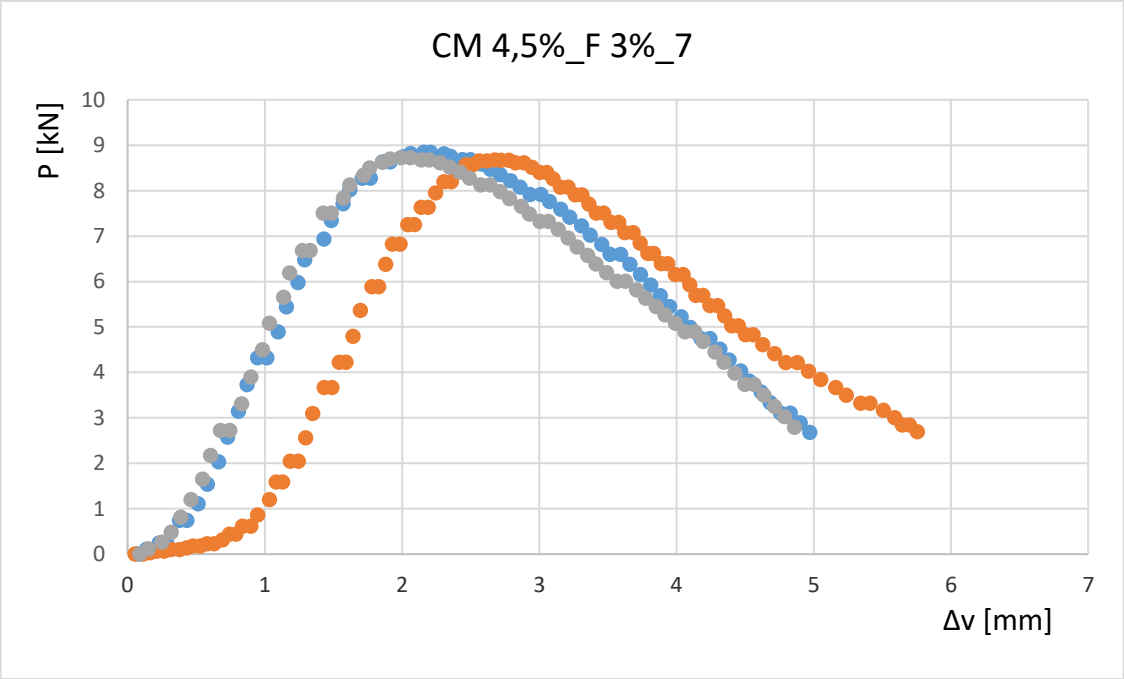


Fig. 3.87 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 7 giorni

3.8.3 Maturazione a 14 giorni

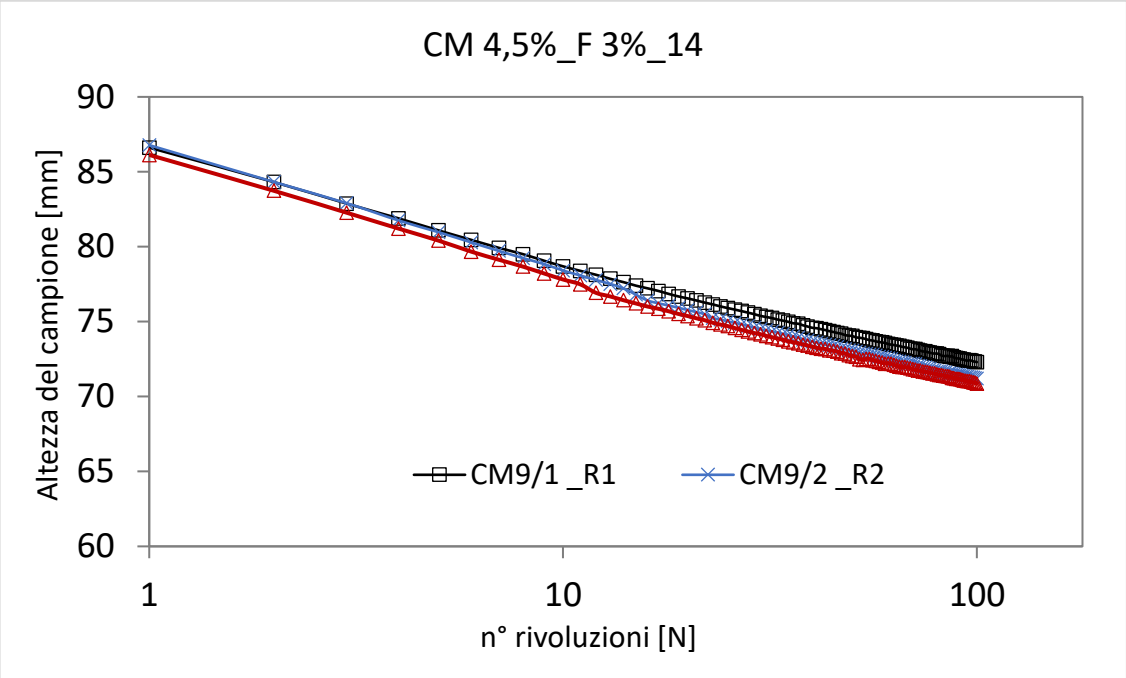


Fig. 3.88 Curve di compattazione Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22020	2	24822	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2801	-
	0	-	-	-	-	46	2848	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2740	2694	3,79%
	7	-	-	-	-	-	2738	2692	3,86%
	14	-	-	-	-	-	2732	2686	4,07%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24820	-	-	2796	-
	0	-	-	-	-	46	2846	2800	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2749	2703	3,46%
	7	-	-	-	-	-	2746	2700	3,57%
	14	-	-	-	-	-	2739	2693	3,82%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24818	-	-	2794	-
	0	-	-	-	-	44	2839	2795	0,18%
	3	-	-	-	-	-	2742	2696	3,71%
	7	-	-	-	-	-	2740	2694	3,79%
	14	-	-	-	-	-	2732	2686	4,07%

Tab. 3.32 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

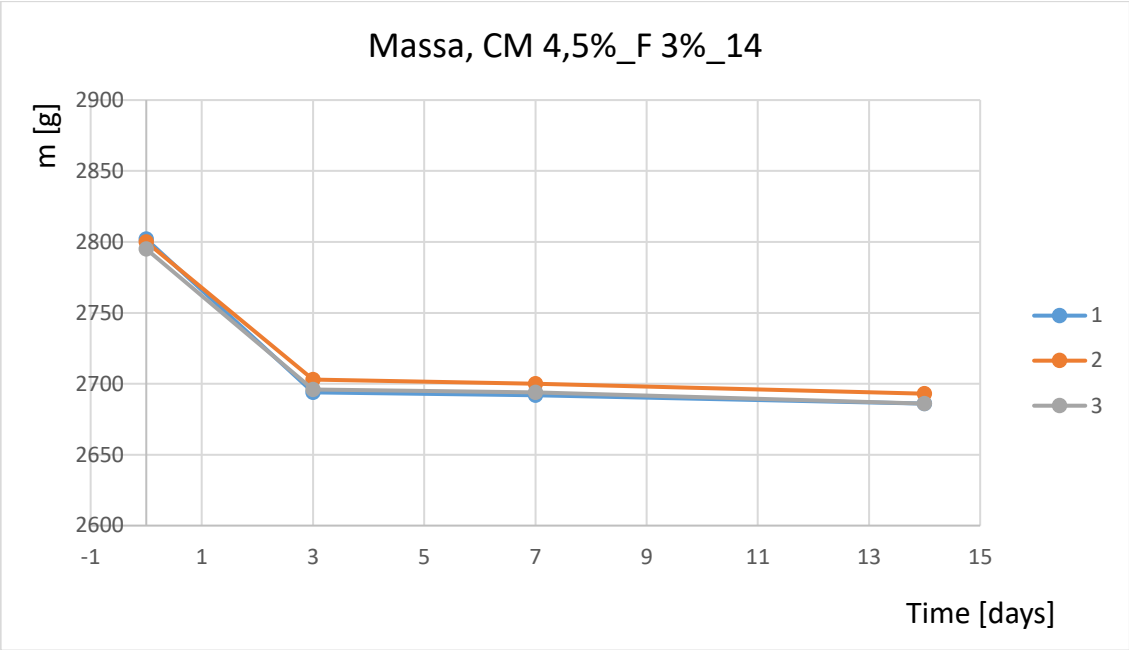


Fig. 3.89 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

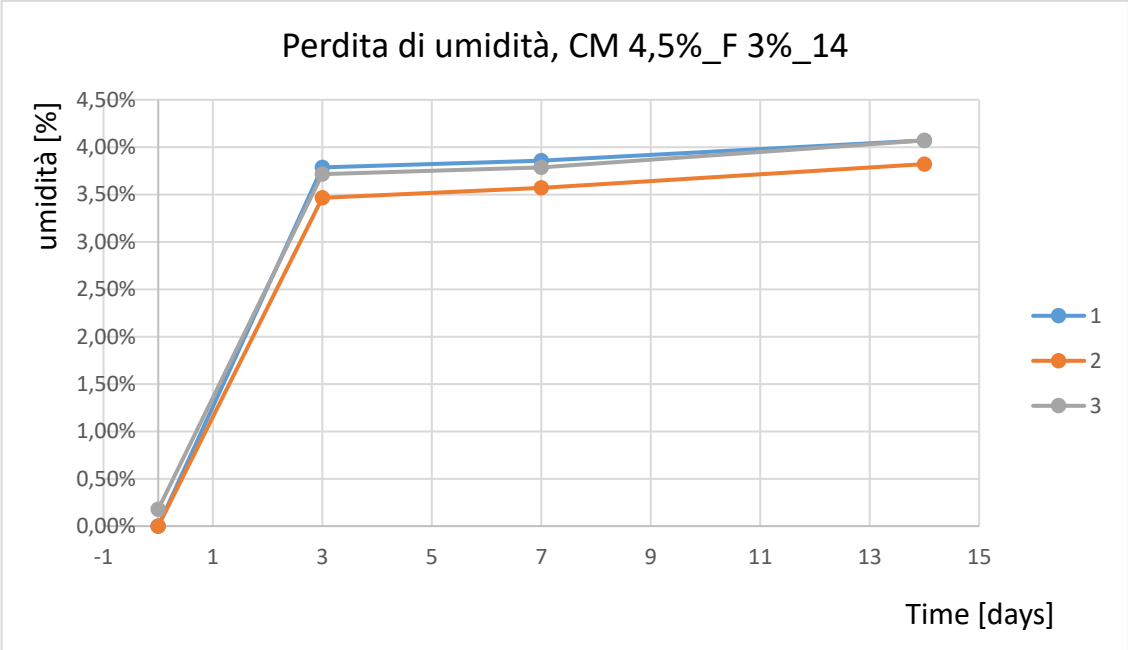


Fig. 3.90 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

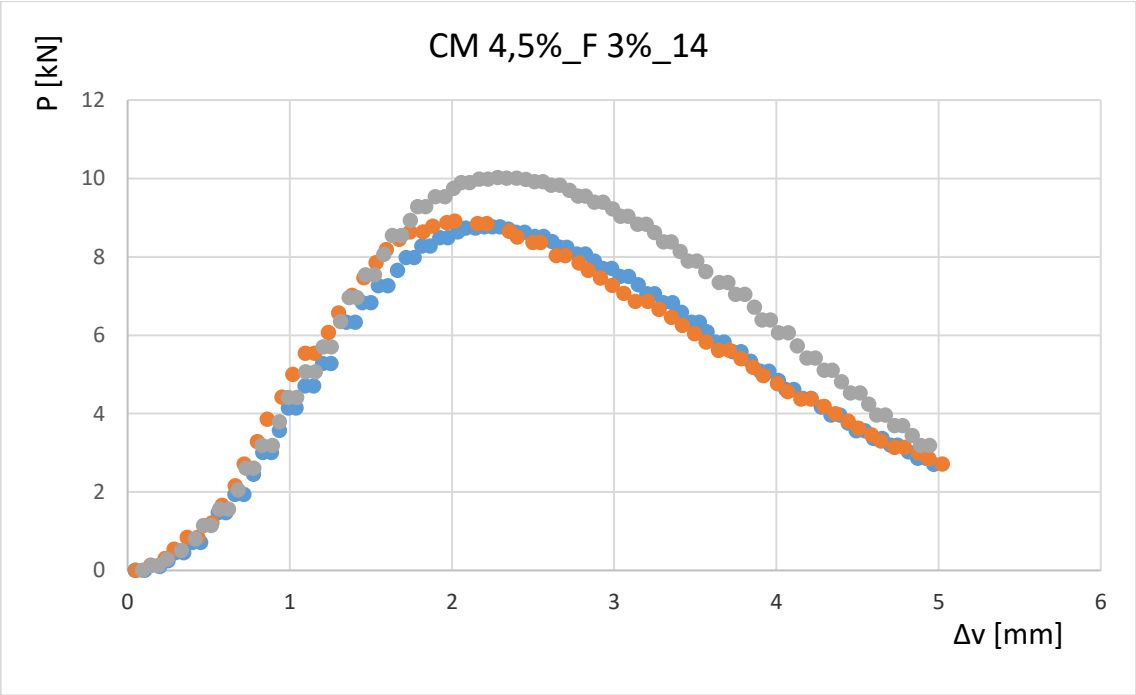


Fig. 3.91 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4,5%, filler 3% con maturazione a 14 giorni

3.9 Miscela CM 4,5%, filler 4%

Successivamente verranno illustrati i risultati sperimentali della Pressa a taglio giratoria e della prova di Trazione indiretta relativi ai provini realizzati con l'emulsione bituminosa CM al 4,5% e filler 4%, tramite grafici che rappresentano la compattazione delle curve, la perdita di umidità e la rottura del provino. Le grandezze che seguono sono state già definite nel *Capitolo 3.3.*

3.9.1 Maturazione a 3 giorni

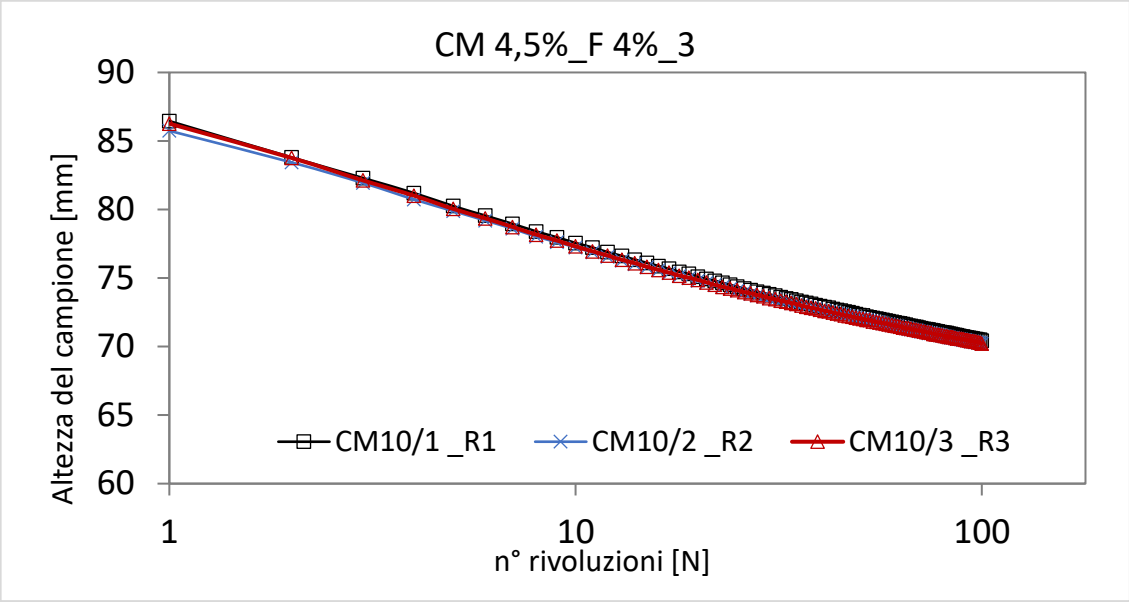


Fig. 3.92 Curve di compattazione Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 3 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24816	-	-	2792	-
	0	-	-	-	-	46	2840	2794	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2747	2701	3,54%
2	pre-compatt.	22024	2	24826	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24818	-	-	2792	-
	0	-	-	-	-	44	2837	2793	0,25%
	3	-	-	-	-	-	2749	2703	3,46%
3	pre-compatt.	22025	2	24827	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24818	-	-	2791	-
	0	-	-	-	-	49	2841	2792	0,29%
	3	-	-	-	-	-	2746	2700	3,57%

Tab. 3.33 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 3 giorni

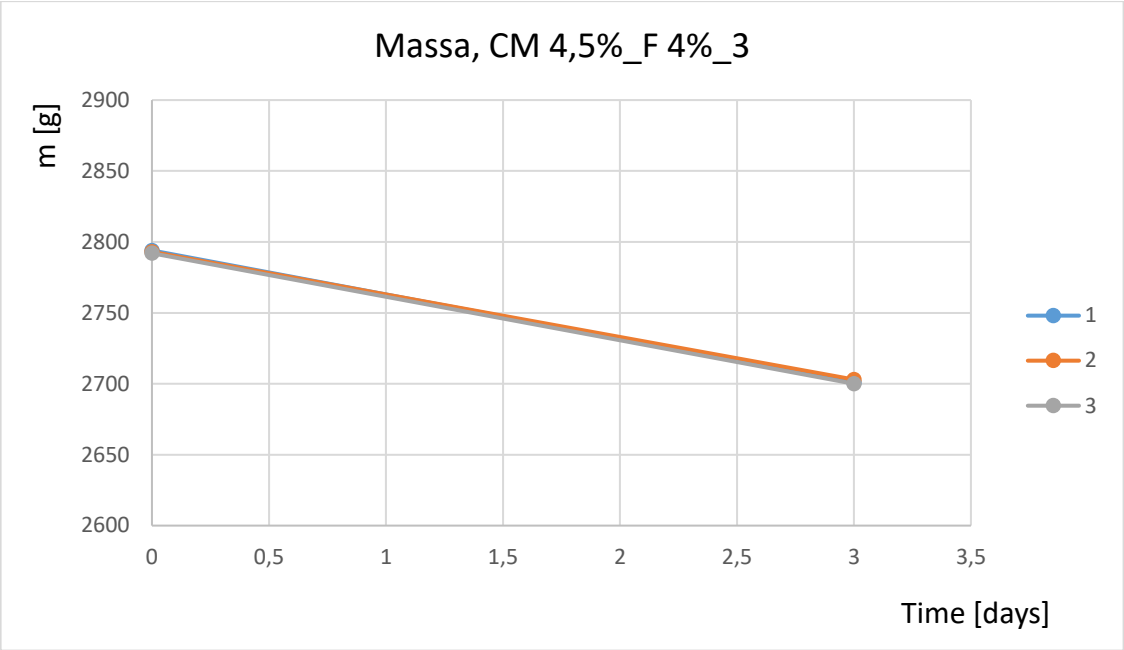


Fig. 3.93 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 3 giorni

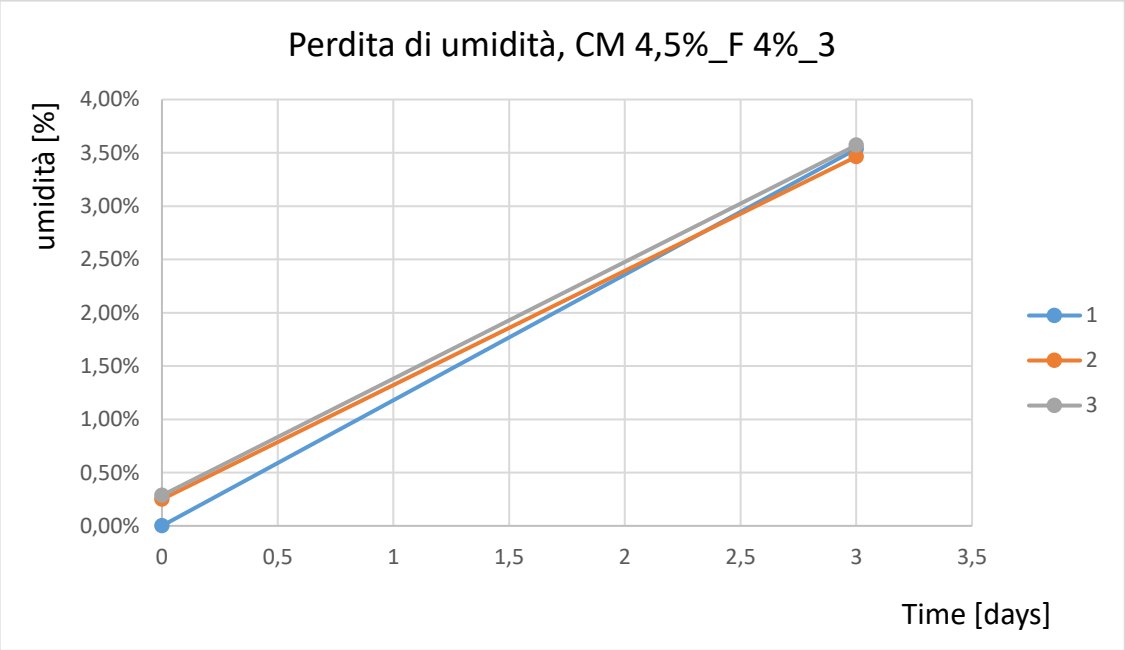


Fig. 3.94 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 3 giorni

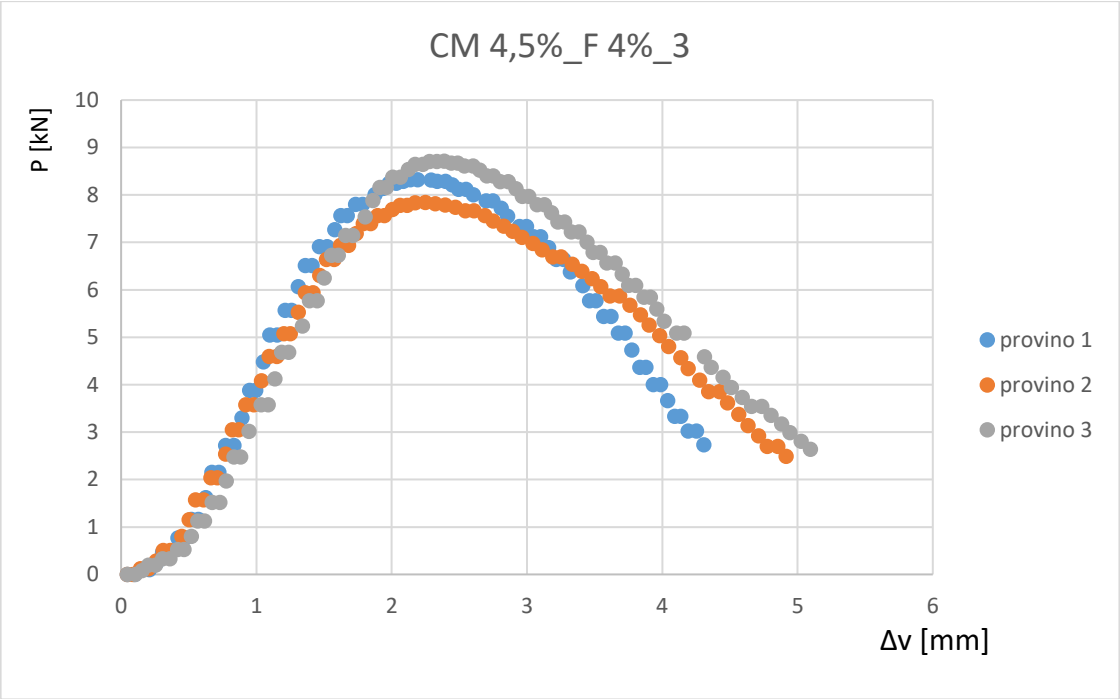


Fig. 3.95 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 3 giorni

3.9.2 Maturazione a 7 giorni

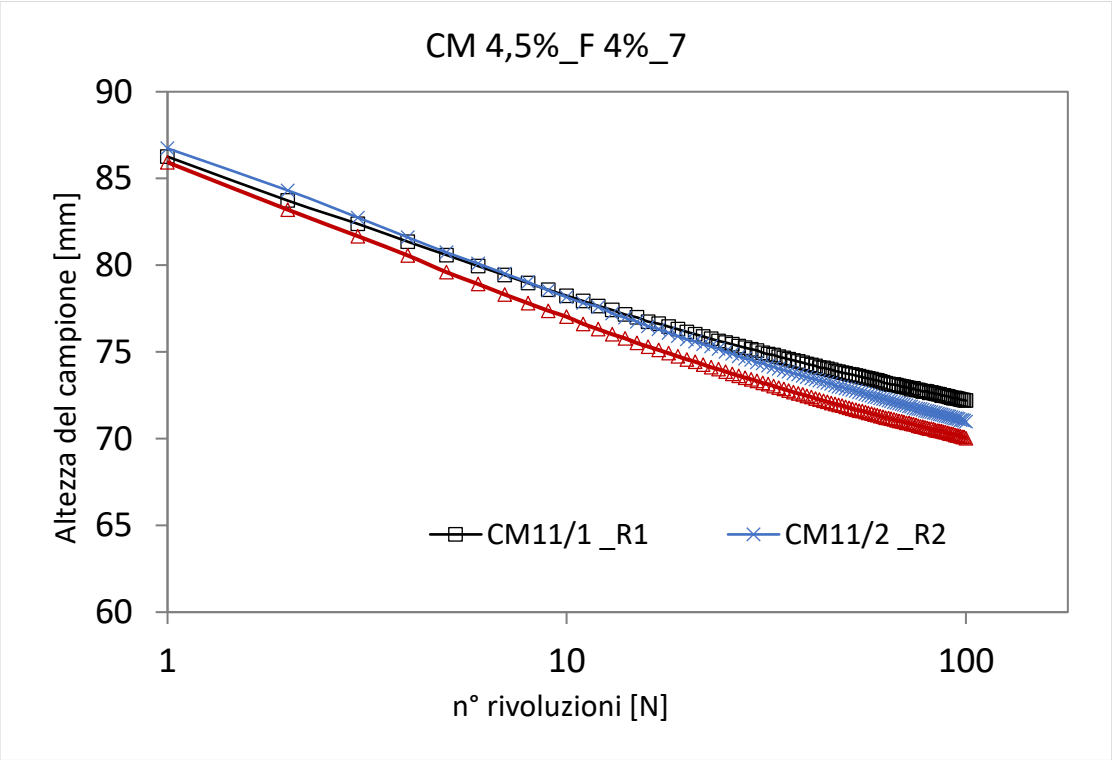


Fig. 3.96 Curve di compattazione Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 7 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24822	-	-	2799	-
	0	-	-	-	-	46	2848	2802	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2747	2701	3,54%
	7	-	-	-	-	-	2741	2695	3,75%
2	pre-compatt.	22023	2	24825	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24823	-	-	2798	-
	0	-	-	-	-	48	2848	2800	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2750	2704	3,43%
	7	-	-	-	-	-	2745	2699	3,61%
3	pre-compatt.	22021	2	24823	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24814	-	-	2791	-
	0	-	-	-	-	47	2838	2791	0,32%
	3	-	-	-	-	-	2742	2696	3,71%
	7	-	-	-	-	-	2738	2692	3,86%

Tab. 3.34 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 7 giorni

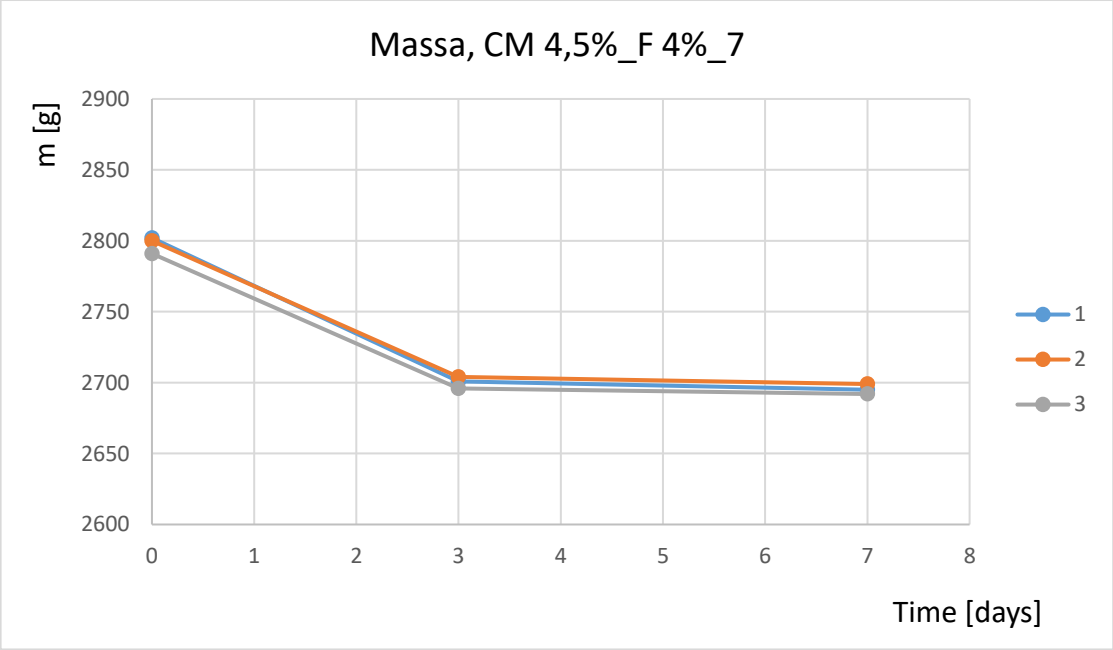


Fig. 3.97 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 7 giorni

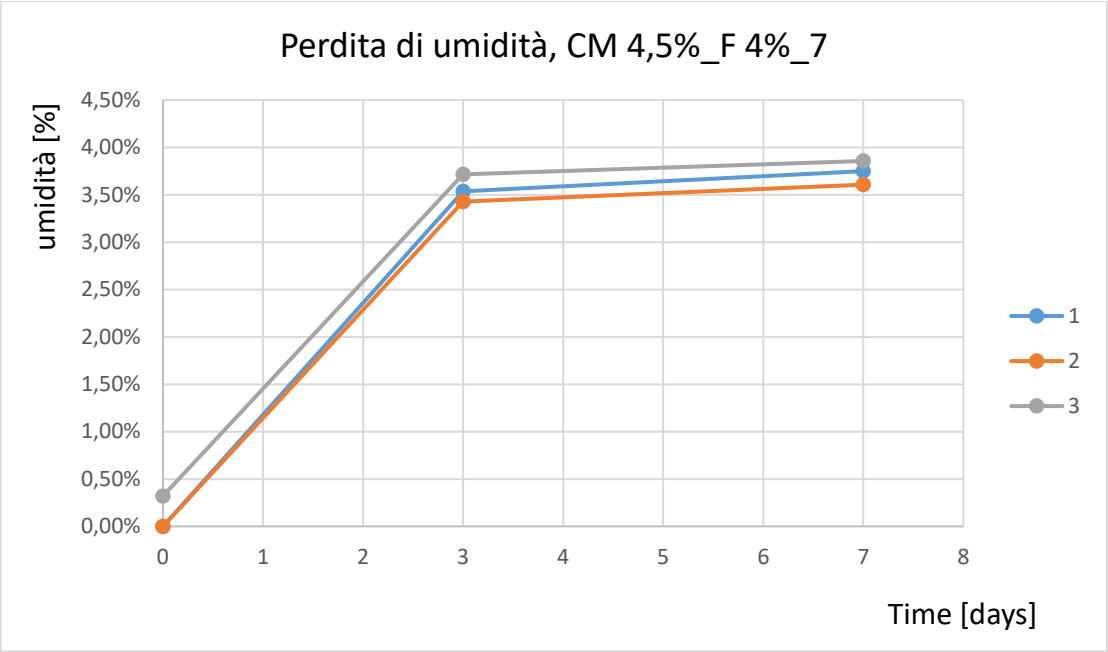


Fig. 3.98 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 7 giorni

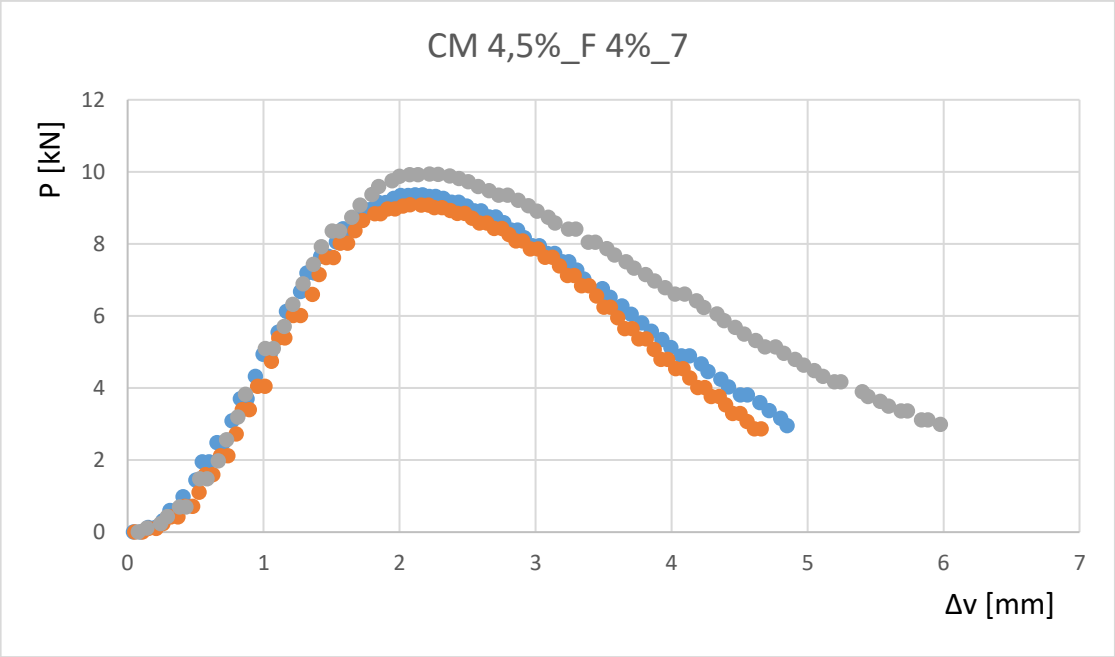


Fig. 3.99 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 7 giorni

3.9.3 Maturazione a 14 giorni

Nel grafico di figura 3.95, è stato riportato solo il provino un provino in quanto durante l'esecuzione degli altri due provini, si sono verificati problemi nell'apparecchiatura.

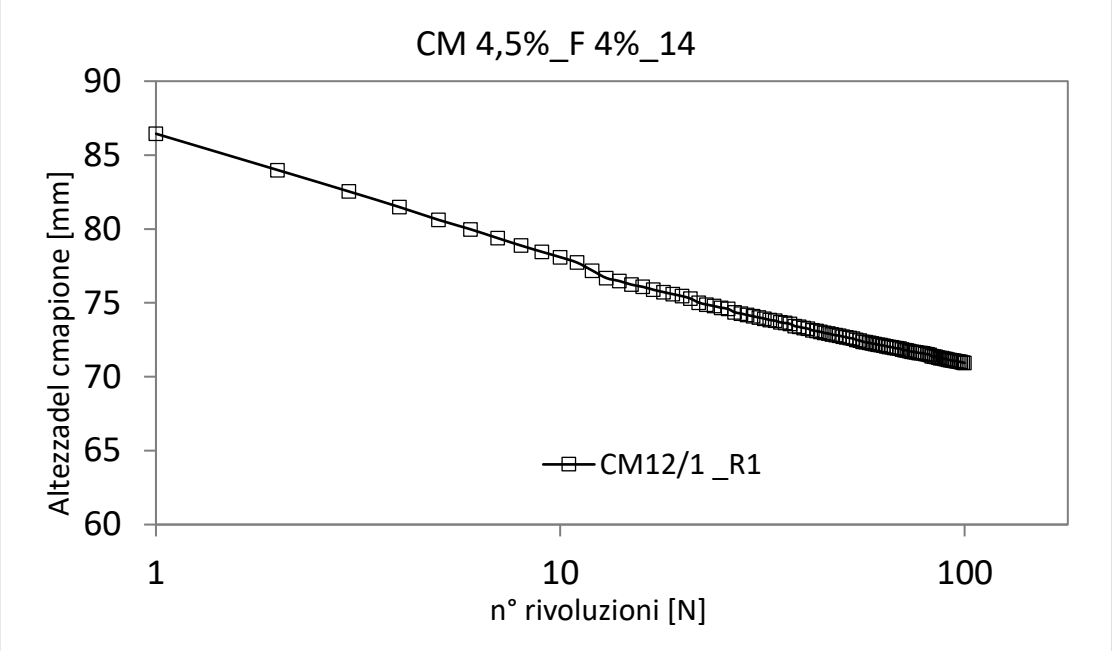


Fig. 3.100 Curve di compattazione Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 14 giorni

Campione	Time [days]	$tara_1$ [g]	$tara_2$ [g]	m_1 [g]	m_2 [g]	$tara_3$ [g]	m_3 [g]	m [g]	Loss [%]
1	pre-compatt.	22019	2	24821	-	-	-	2800	-
	post-compatt.	-	-	-	24811	-	-	2790	-
	0	-	-	-	-	45	2833	2788	0,43%
	3	-	-	-	-	-	2740	2695	3,75%
	7	-	-	-	-	-	2735	2690	3,93%
	14	-	-	-	-	-	2729	2684	4,14%
2	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24826	-	-	2802	-
	0	-	-	-	-	44	2849	2805	0,00%
	3	-	-	-	-	-	2744	2699	3,61%
	7	-	-	-	-	-	2740	2695	3,75%
	14	-	-	-	-	-	2733	2688	4,00%
3	pre-compatt.	22022	2	24824	-	-	-	2802	-
	post-compatt.	-	-	-	24816	-	-	2792	-
	0	-	-	-	-	44	2836	2792	0,29%
	3	-	-	-	-	-	2738	2693	3,82%
	7	-	-	-	-	-	2735	2690	3,93%
	14	-	-	-	-	-	2728	2683	4,18%

Tab. 3.35 Elaborazione dati della Pressa a taglio giratoria Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 14 giorni

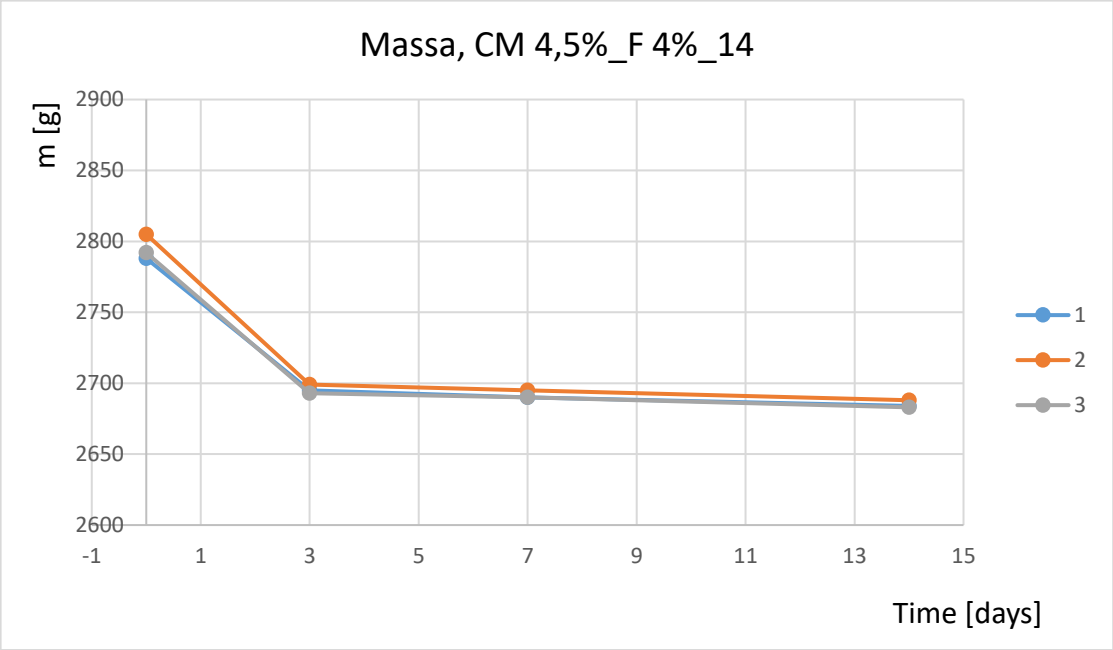


Fig. 3.101 Andamento della massa nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 14 giorni

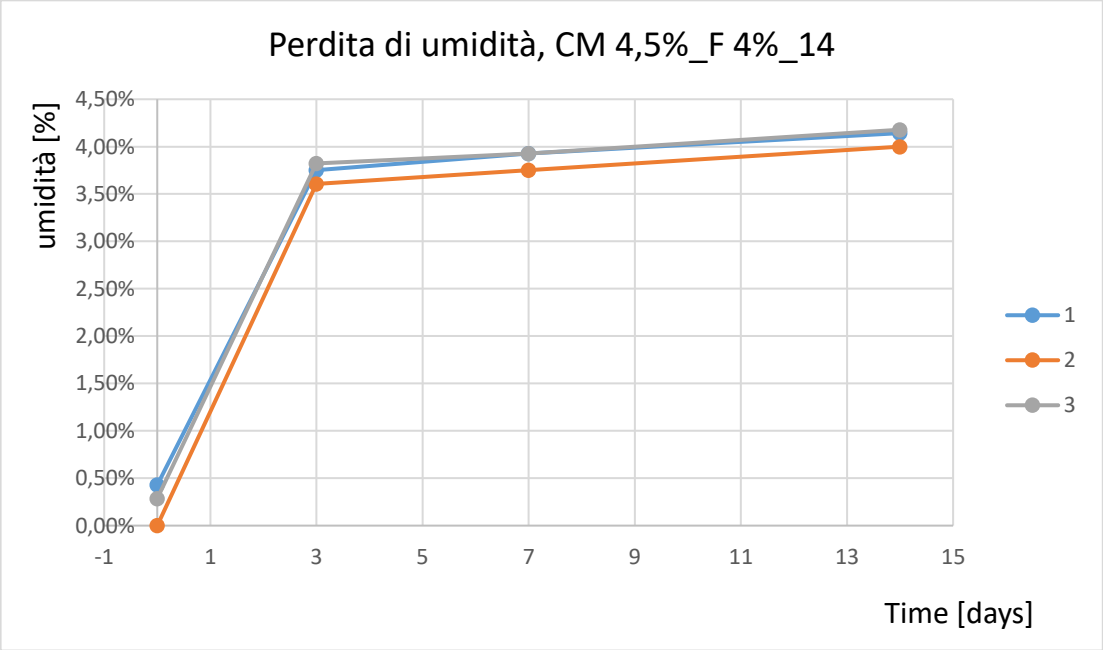


Fig. 3.102 Andamento dell'umidità nel tempo, Provini CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 14 giorni

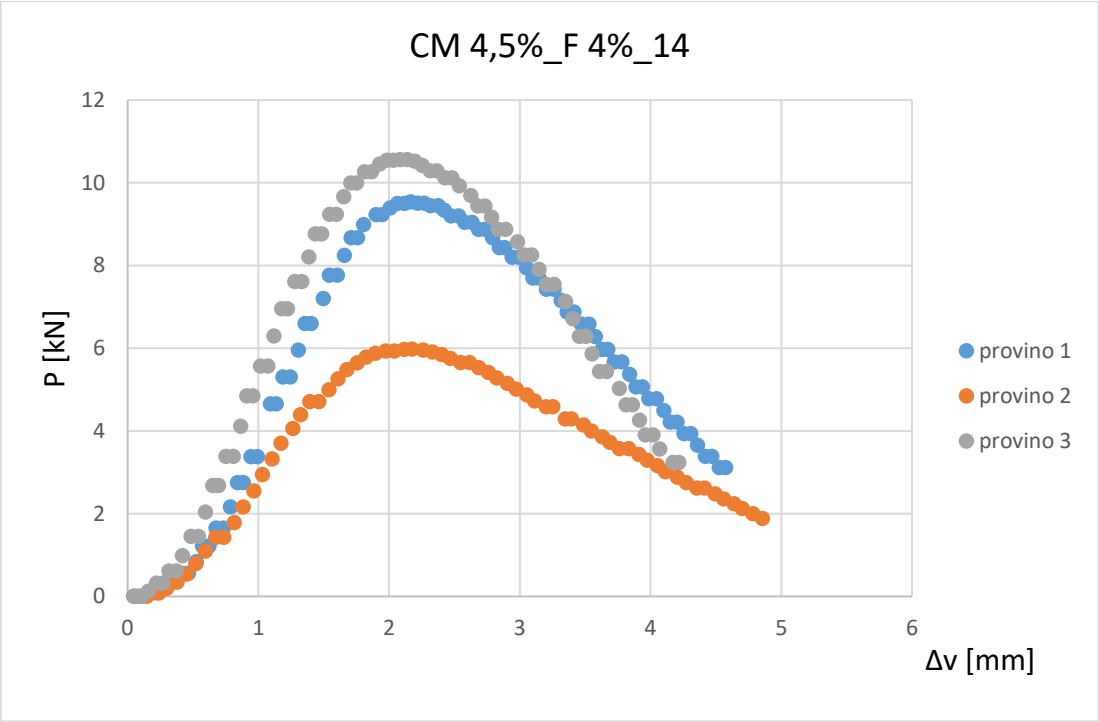


Fig. 3.103 Grafico carico – corsa della prova a trazione indiretta CM 4,5%, filler 4% con maturazione a 14 giorni

3.10 Riassunto di tutte le miscele e capitolato

In questo capitolo viene riportata una tabella che riguarda tutte le miscele dei provini con condizionamento in aria, in cui vengono riportate le caratteristiche meccaniche più importanti.

Miscela	Time (days)	ITSM medio [MPa]	ITS [MPa]	CTI [MPa]	E' [J]	E''[J]	E tot. [J]	Vm,geom [%]	Vm,sea [%]
CM 3,5%_F 3%	3	4343,33	0,418	46,03	8,26	12,62	20,88	14,8	11,3
	7	5048,25	0,502	41,15	9,23	15,26	24,49	/	/
	14	5730,75	0,54	46,9	7,29	11,21	18,5		
MC 3,5%_F 3%	3	4282,7	0,39	29,46	7,25	11,45	18,7	/	/
	7	5634,17	0,54	42,2	10,18	14,79	24,97		
	14	6696,83	0,55	44,56	8,97	13,25	22,22		
CM 4%_F 3%	3	4324,33	0,499	51,02	9,78	15,07	24,85	13,2	11
	7	5294,83	0,462	51,32	8,56	11,48	20,04	/	/
	14	6173,5	0,58	61,6	9,93	16,64	26,57		
CM 4%_F 3,5%	3	4159,33	0,508	52,31	10,08	17,45	27,53	13,3	11,7
	7	5191,33	0,536	62,51	9,67	18,32	27,99	/	/
	14	6236,7	0,577	70,44	9,29	15,08	24,37		
CM 4,5%_F 3%	3	4164,83	0,503	54,49	10,32	15,82	26,14	13,8	11,5
	7	4923,7	0,522	53,85	9,92	17,42	27,34	/	/
	14	6015,17	0,542	58,23	10,51	17,61	28,12		
CM 4,5%_F 4%	3	4234,33	0,495	51,23	9,89	14,87	24,76	13,7	10,5
	7	5397,33	0,559	61,01	10,66	19,58	30,24	/	/
	14	6664,25	0,6	65,41	9,46	14,17	23,63		

Tab. 3.36 Riassunto Caratteristiche meccaniche delle miscele analizzate

Successivamente vengono illustrati i grafici che mettono a confronto le caratteristiche meccaniche riportate nella tabella precedente con le varie miscele.

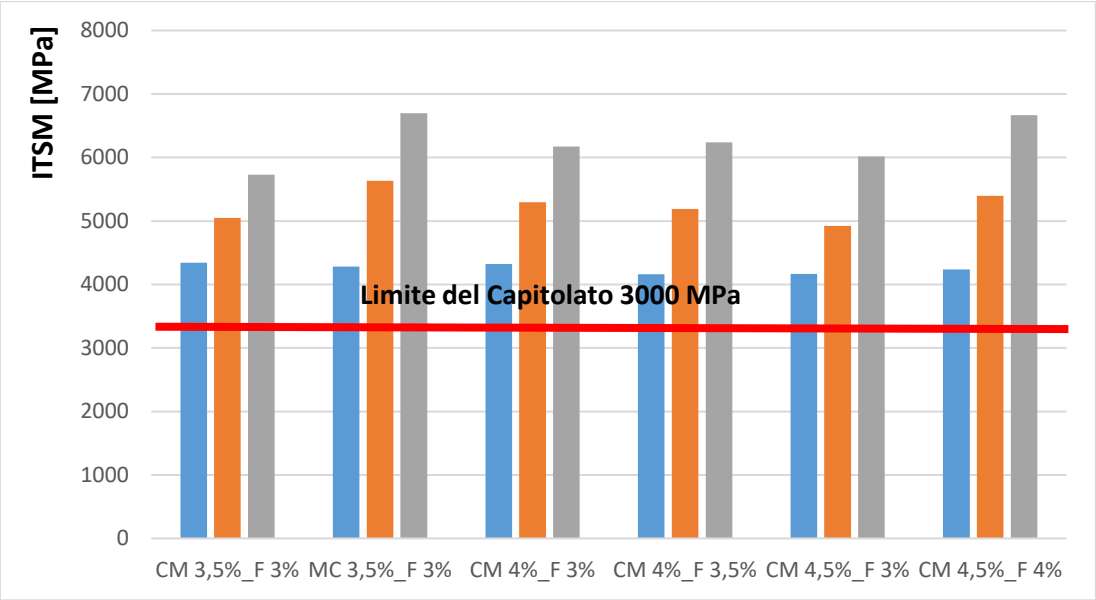


Fig. 3.104 Modulo di rigidezza a trazione indiretta a confronto delle miscele analizzate

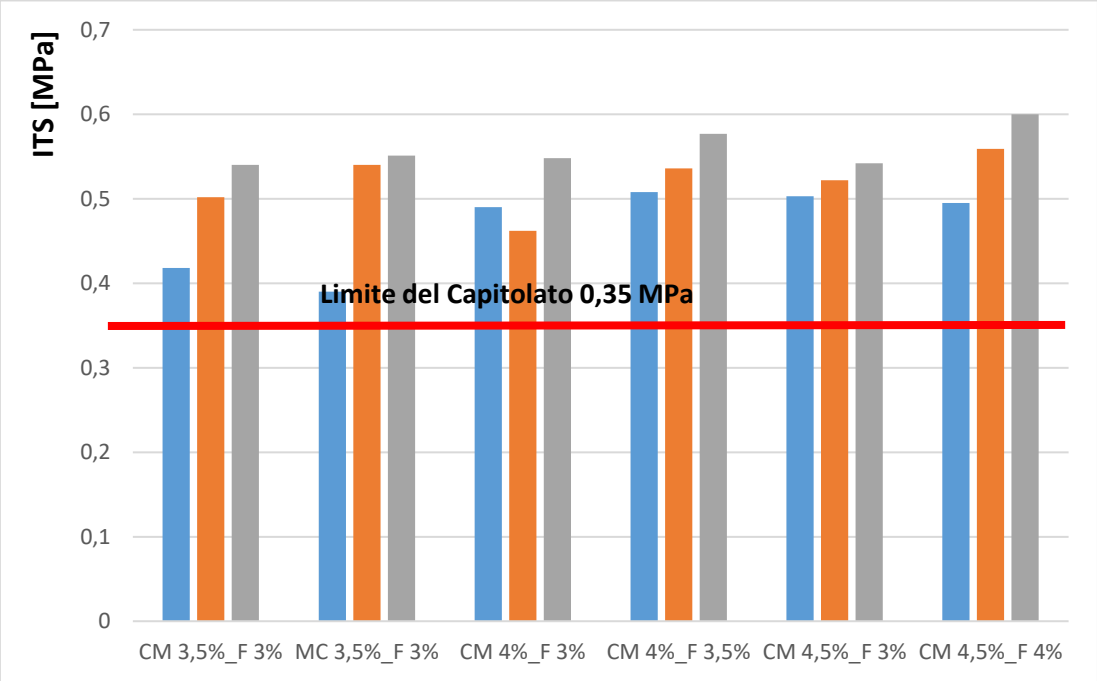


Fig. 3.105 Resistenza a Trazione Indiretta a confronto delle miscele analizzate

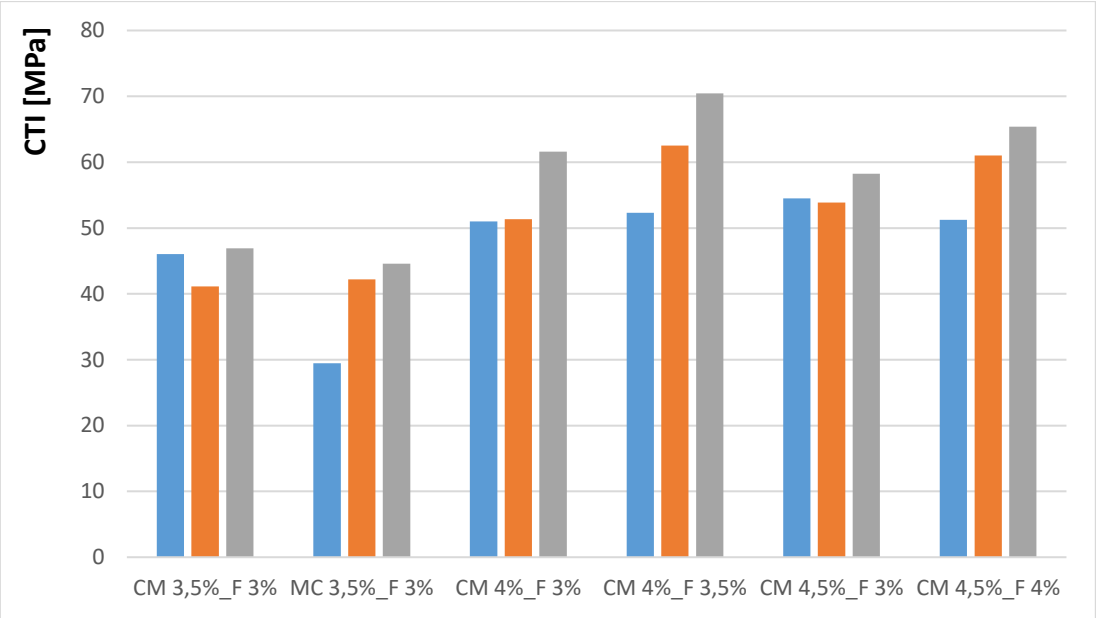


Fig. 3.106 Coefficiente di trazione indiretta a confronto delle miscele analizzate

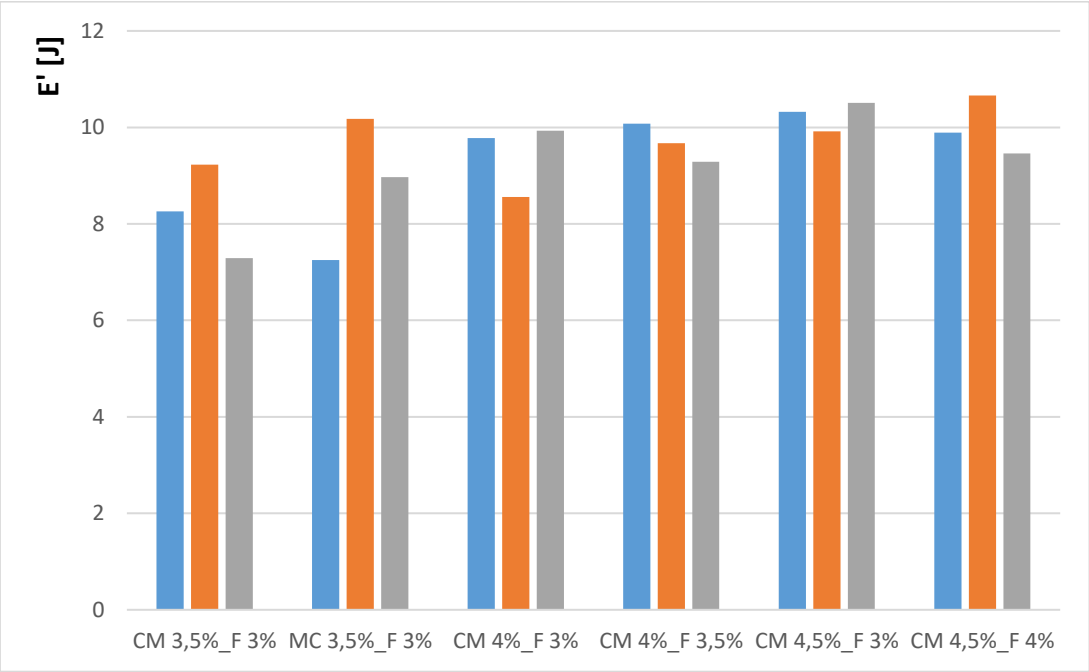


Fig. 3.107 Energia pre-rottura a confronto delle miscele analizzate

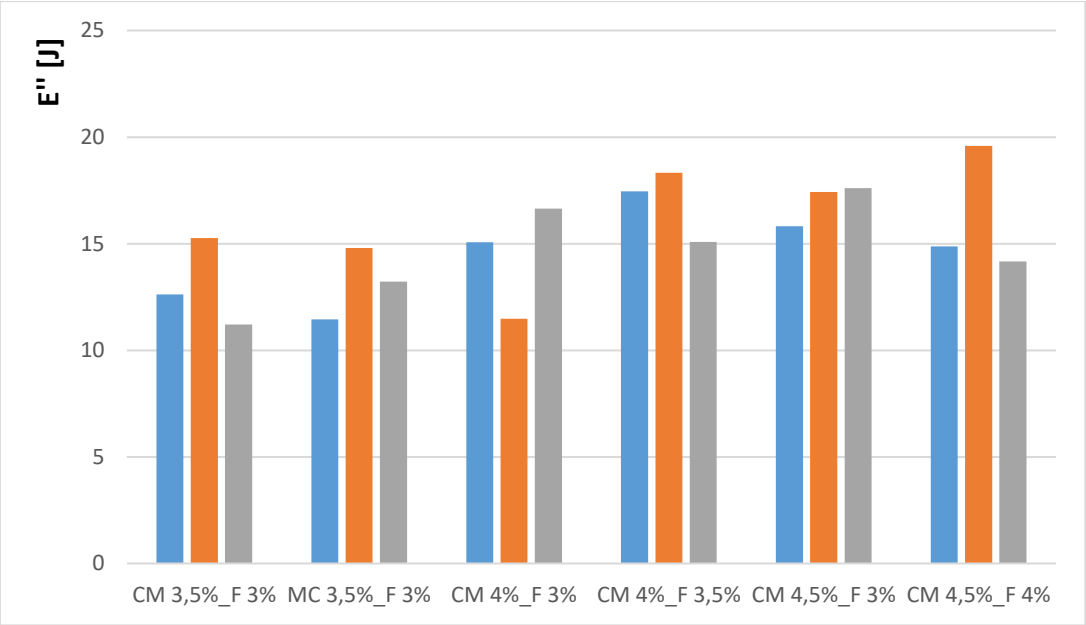


Fig. 3.108 Energia post-rottura a confronto delle miscele analizzate

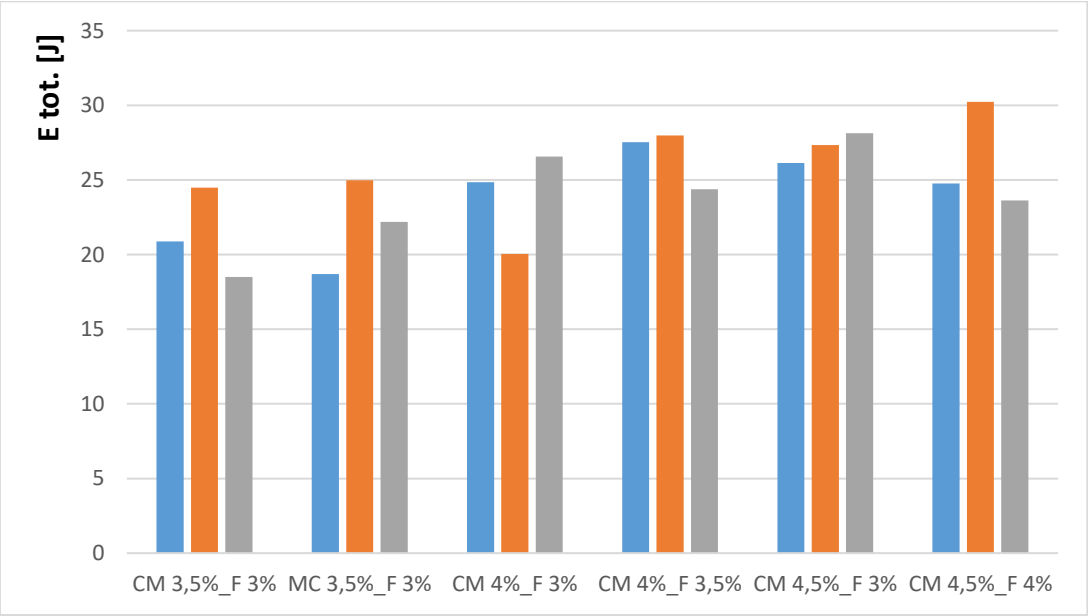


Fig. 3.109 Energia totale a confronto delle miscele analizzate

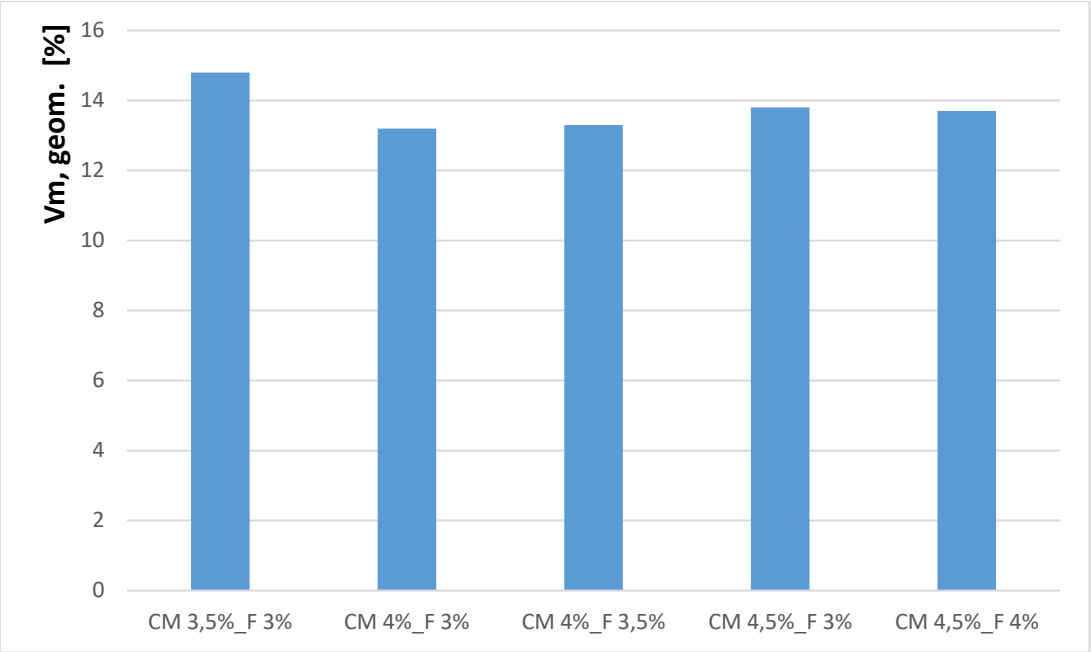


Fig. 3.110 Volume dei vuoti con procedura geometrica a confronto delle miscele analizzate

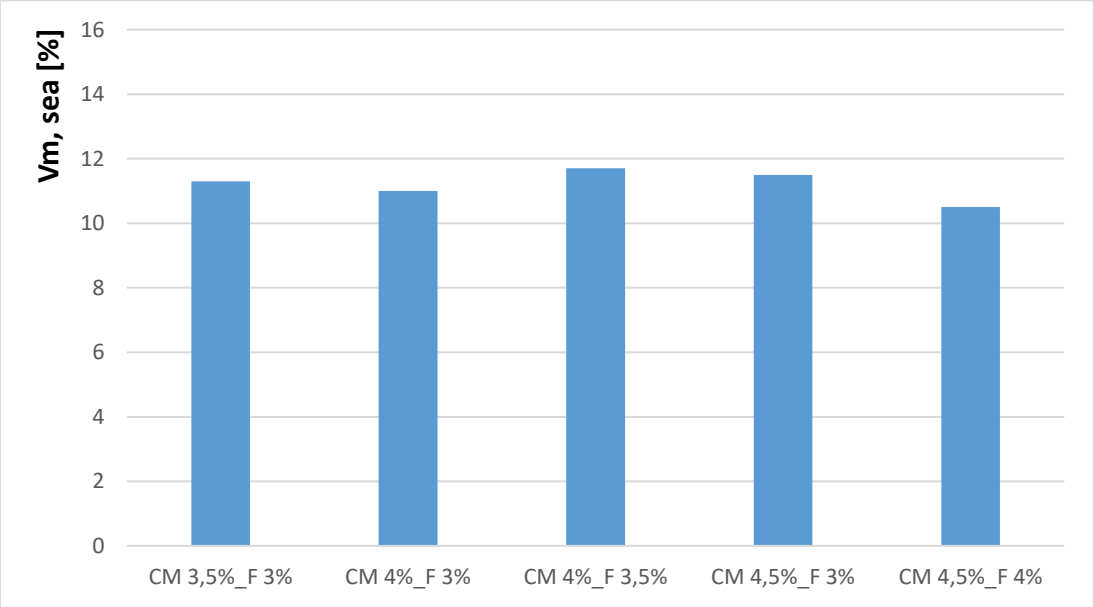


Fig. 3.111 Volume dei vuoti con procedura a provino sigillato a confronto delle miscele analizzate

Nelle tabelle e nei grafici che seguono, vengono riportate le caratteristiche meccaniche delle miscele che vedono a paragone i provini con condizionamento in aria e in acqua.

Miscela	*Time (days)*	*ITSM medio [MPa]*	*ITS [MPa]*	*CTI [MPa]*	*E' [J]*	*E''[J]*	*E tot. [J]*
CM 3,5%_F 3% ARIA	3	4343,33	0,418	46,03	8,26	12,62	20,88
	7	5048,25	0,502	41,15	9,23	15,26	24,49
	14	5730,75	0,54	46,9	7,29	11,21	18,5
CM 3,5%_F 3% ACQUA	3	3973,5	0,416	35,86	7,2	1081	18,01
	7	4709,67	0,46	31,72	8,58	12,83	21,41
	14	6888,7	0,62	74,3	10,29	17,13	27,42
MC 3,5%_F 3% ARIA	3	4282,7	0,39	29,46	7,25	11,45	18,7
	7	5634,17	0,56	43,04	10,18	14,79	24,97
	14	6696,83	0,55	44,56	8,97	13,25	22,22
MC 3,5%_F 3% ACQUA	3	3743,83	0,49	36,13	9,13	15,87	25
	7	5853	0,51	37,85	9,24	12,29	21,53
	14	5848,17	0,588	25,38	11,54	17,38	28,92

Tab. 3.37 Riassunto Caratteristiche meccaniche delle miscele analizzate

Successivamente vengono illustrati i grafici che mettono a confronto le caratteristiche meccaniche riportate nella tabella precedente con i provini condizionati in acqua e in aria. Per il modulo di rigidezza a trazione indiretta si può osservare solo la distinzione tra le diverse emulsioni, in quanto il condizionamento in aria e in acqua e stato fatto dopo la prova di modulo.

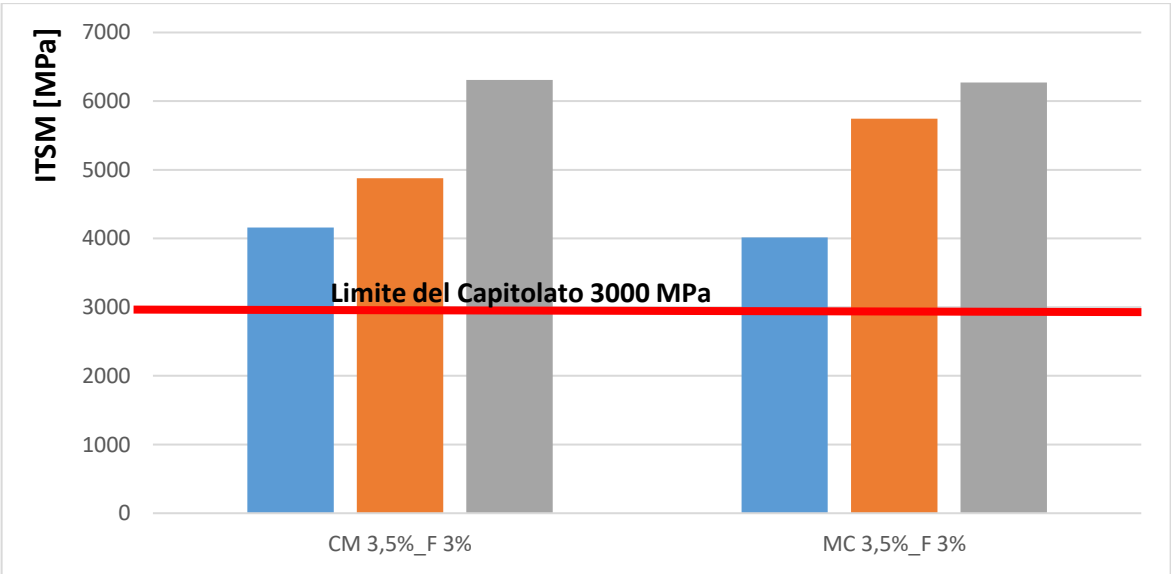


Fig. 3.112 Modulo di rigidezza a trazione indiretta a confronto delle miscele analizzate

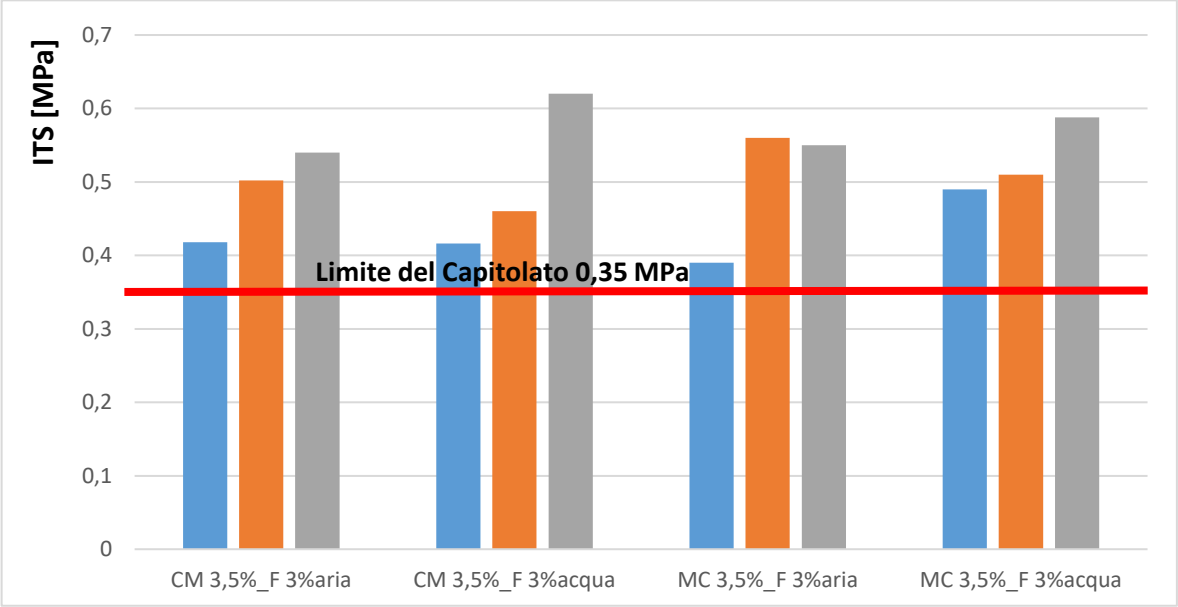


Fig. 3.113 Resistenza a Trazione Indiretta a confronto delle miscele analizzate

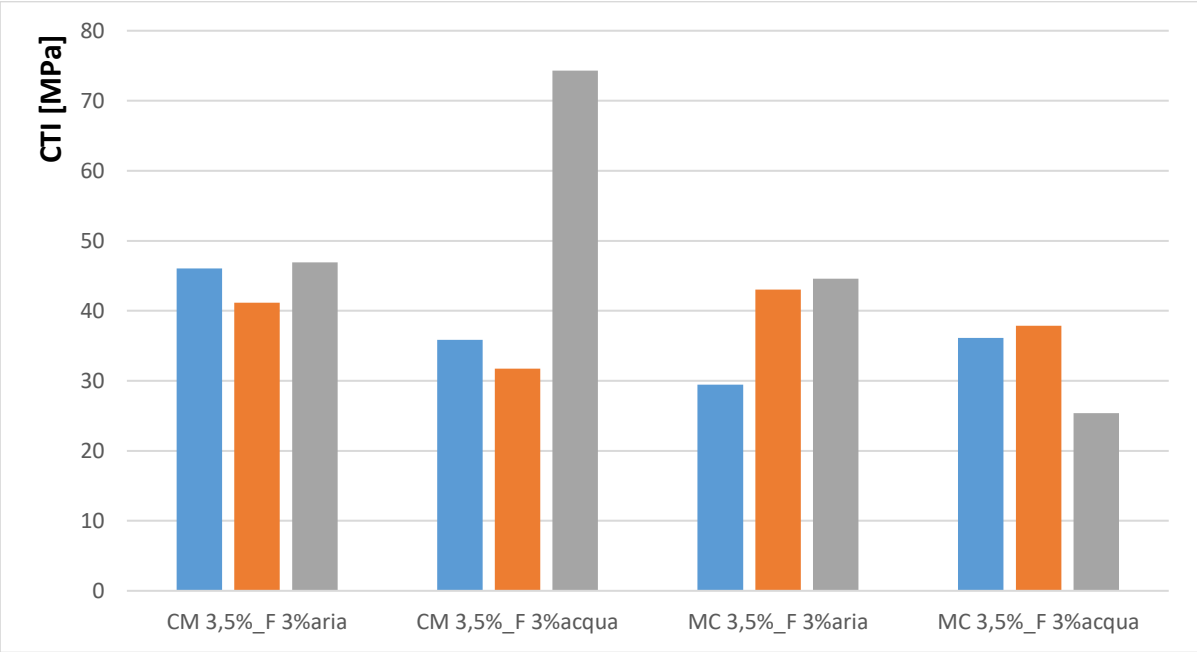


Fig. 3.114 Coefficiente di trazione indiretta a confronto delle miscele analizzate

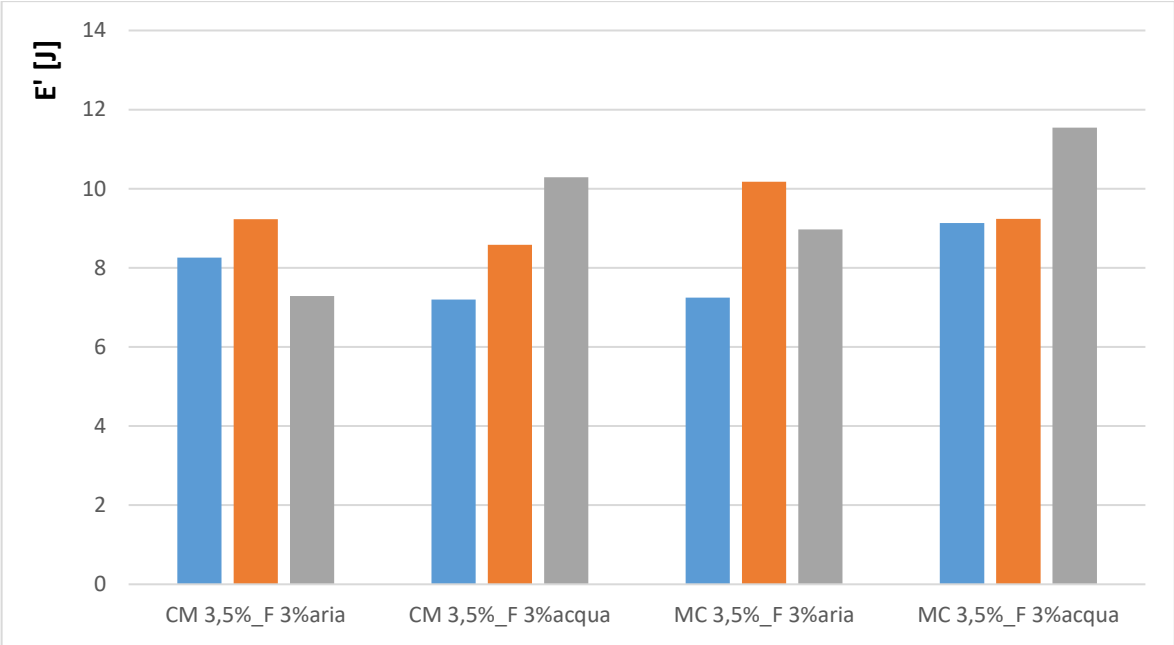


Fig. 3.115 Energia pre-rottura a confronto delle miscele analizzate

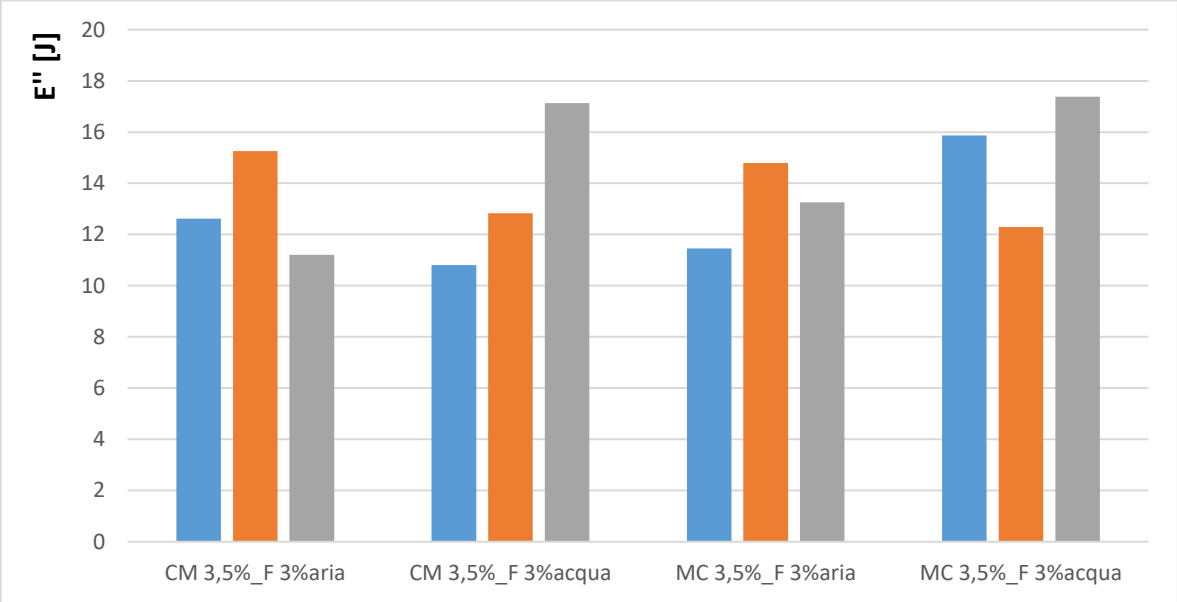


Fig. 3.116 Energia post-rottura a confronto delle miscele analizzate

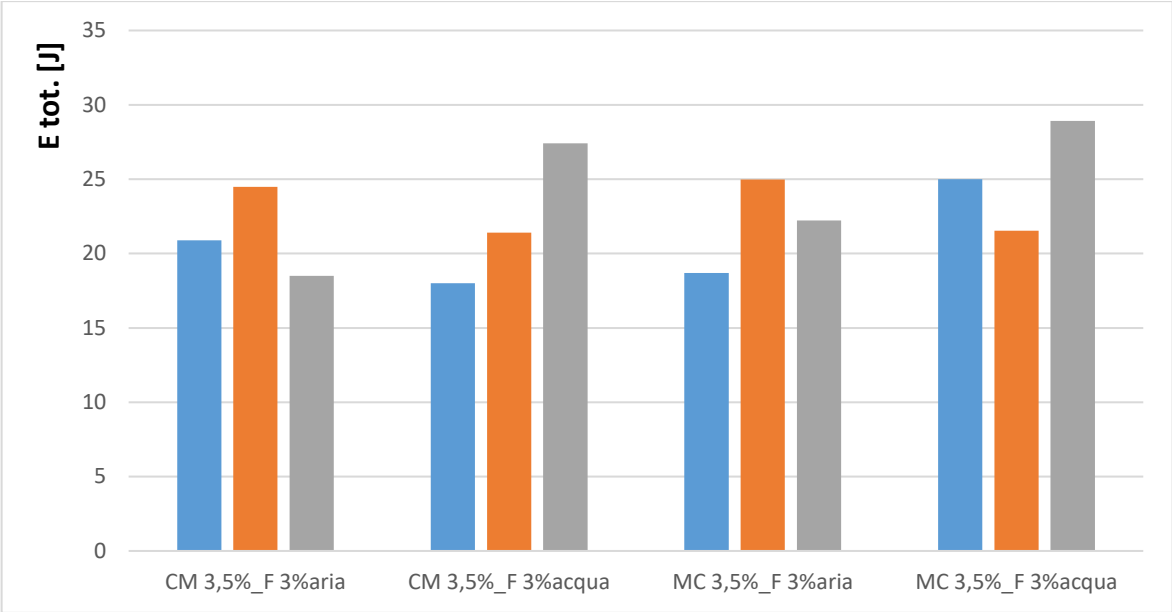


Fig. 3.117 Energia totale a confronto delle miscele analizzate

Confrontando la resistenza a trazione indiretta dei provini con condizionamento in acqua e la resistenza dei provini con condizionamento in aria si osservano i seguenti risultati:

- CM 3,5%_F 3%, Maturazione a 3 giorni

$$\mathrm{ITSr} = \frac{\mathrm{ITS\ wet}}{\mathrm{ITS\ dry}} * 100 = \frac{0{,}416}{0{,}418} * 100 = 0{,}99\ \%$$

- CM 3,5%_F 3%, Maturazione a 7 giorni

$$\mathrm{ITSr} = \frac{\mathrm{ITS\ wet}}{\mathrm{ITS\ dry}} * 100 = \frac{0{,}46}{0{,}502} * 100 = 0{,}92\ \%$$

- CM 3,5%_F 3%, Maturazione a 7 giorni

$$\mathrm{ITSr} = \frac{\mathrm{ITS\ wet}}{\mathrm{ITS\ dry}} * 100 = \frac{0{,}62}{0{,}54} * 100 = 1{,}15\ \%$$

- MC 3,5%_F 3%, Maturazione a 3 giorni

$$\mathrm{ITSr} = \frac{\mathrm{ITS\ wet}}{\mathrm{ITS\ dry}} * 100 = \frac{0{,}49}{0{,}39} * 100 = 1{,}26\ \%$$

- MC 3,5%_F 3%, Maturazione a 7 giorni

$$\mathrm{ITSr} = \frac{\mathrm{ITS\ wet}}{\mathrm{ITS\ dry}} * 100 = \frac{0{,}51}{0{,}56} * 100 = 0{,}91\%$$

- MC 3,5%_F 3%, Maturazione a 14 giorni

$$\mathrm{ITSr} = \frac{\mathrm{ITS\ wet}}{\mathrm{ITS\ dry}} * 100 = \frac{0{,}588}{0{,}55} * 100 = 1{,}07\ \%$$

	ITSr [%]	
CM 3,5%_F 3%	3	0,99%
	7	0,92%
	14	1,15%
MC 3,5%_F 3%	3	1,26%
	7	0,91%
	14	1,07%

Tab. 3.38 Risultati dell'ITSr

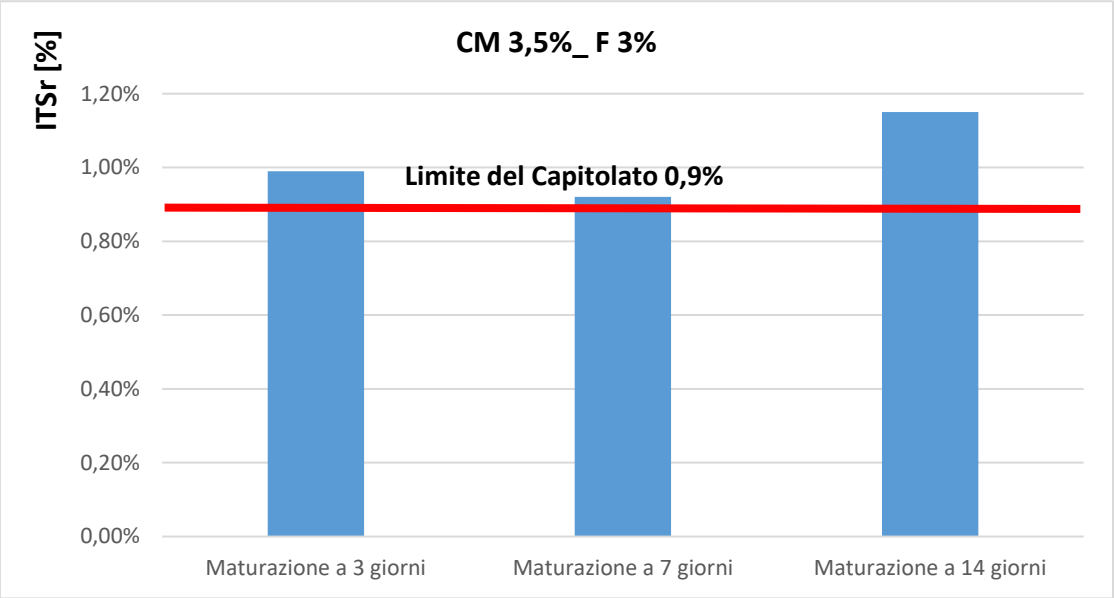


Fig. 3.118 Risultati dell'ITSr della miscela CM 3,5%, filler 3%

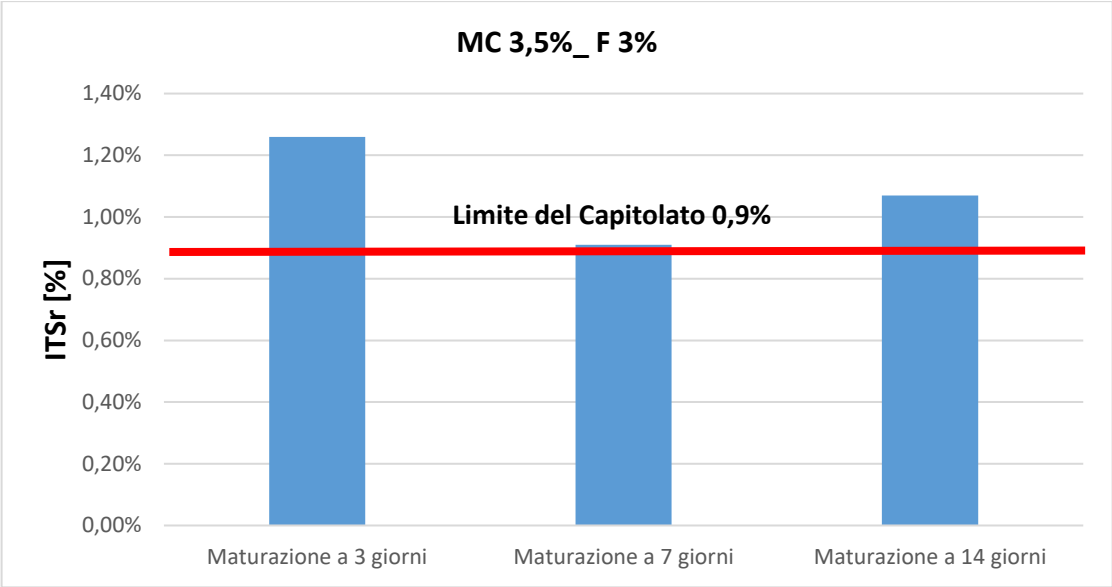


Fig. 3.119 Risultati dell'ITSr della miscela MC 3,5%, filler 3%

Nei grafici che seguono, vengono messe a confronto le varie combinazioni delle percentuali di filler e di emulsione bituminosa al fine di valutare le caratteristiche meccaniche.

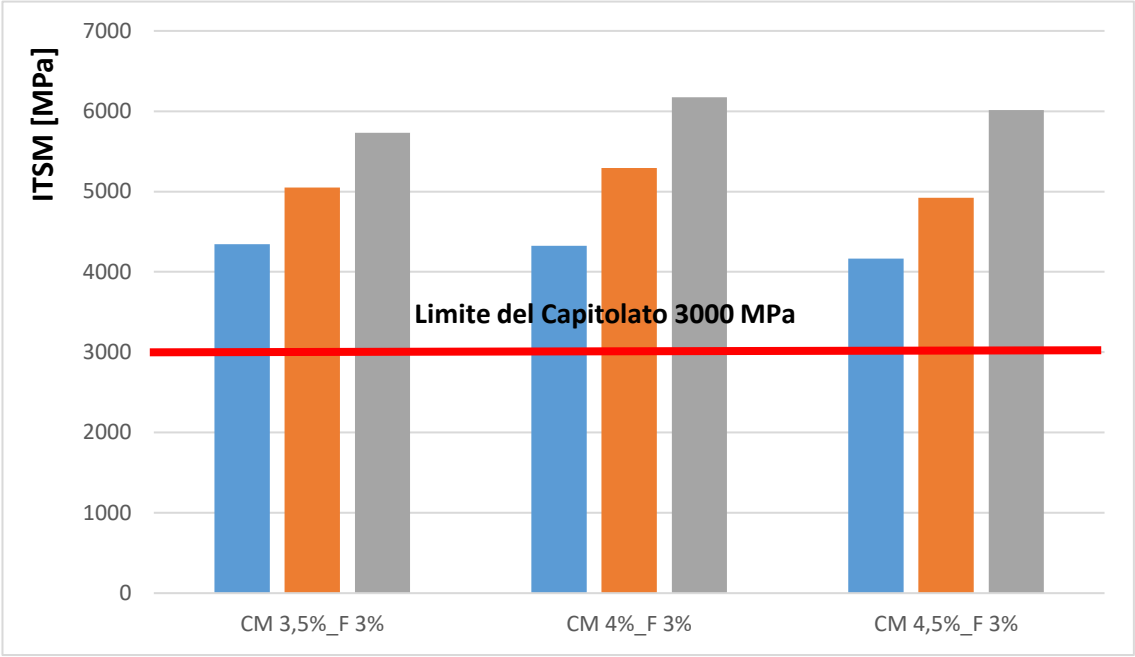


Fig. 3.120 Modulo di rigidezza a trazione indiretta al variare della % dell'emulsione bituminosa, filler costante

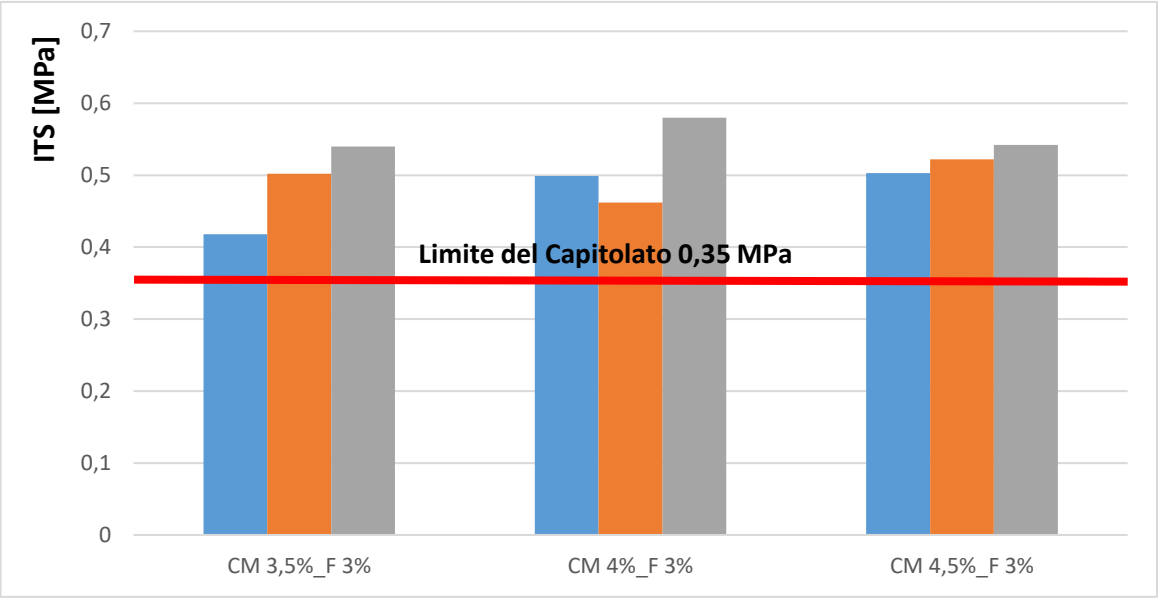


Fig. 3.121 Resistenza a trazione indiretta al variare della % dell'emulsione bituminosa, filler costante

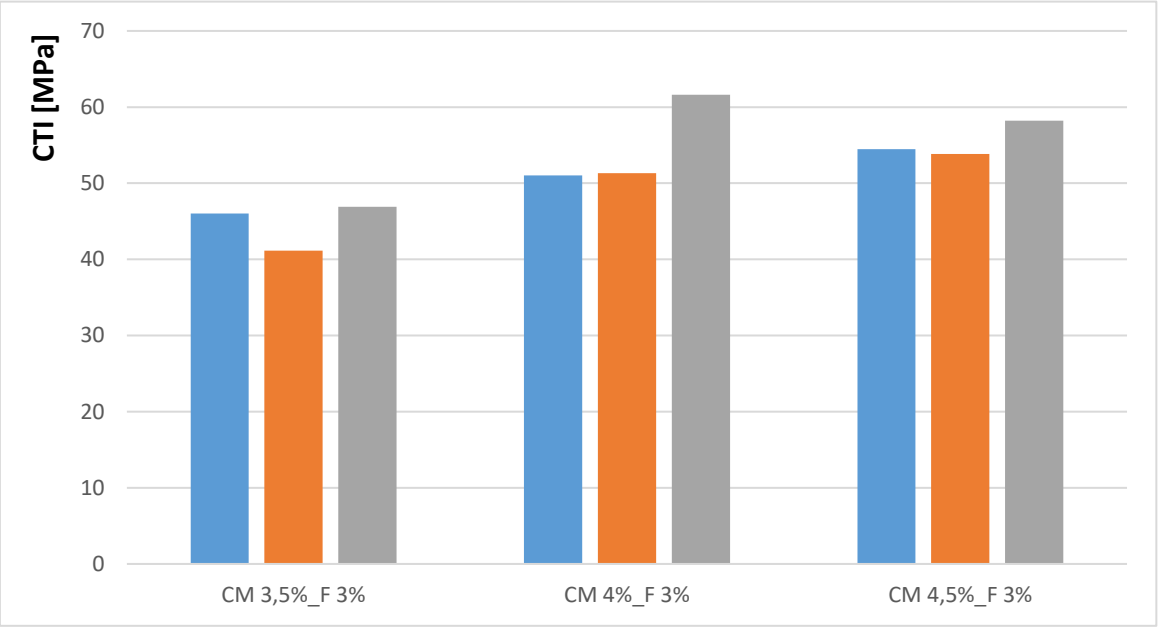


Fig. 3.122 Coefficiente di trazione indiretta al variare della % dell'emulsione bituminosa, filler costante

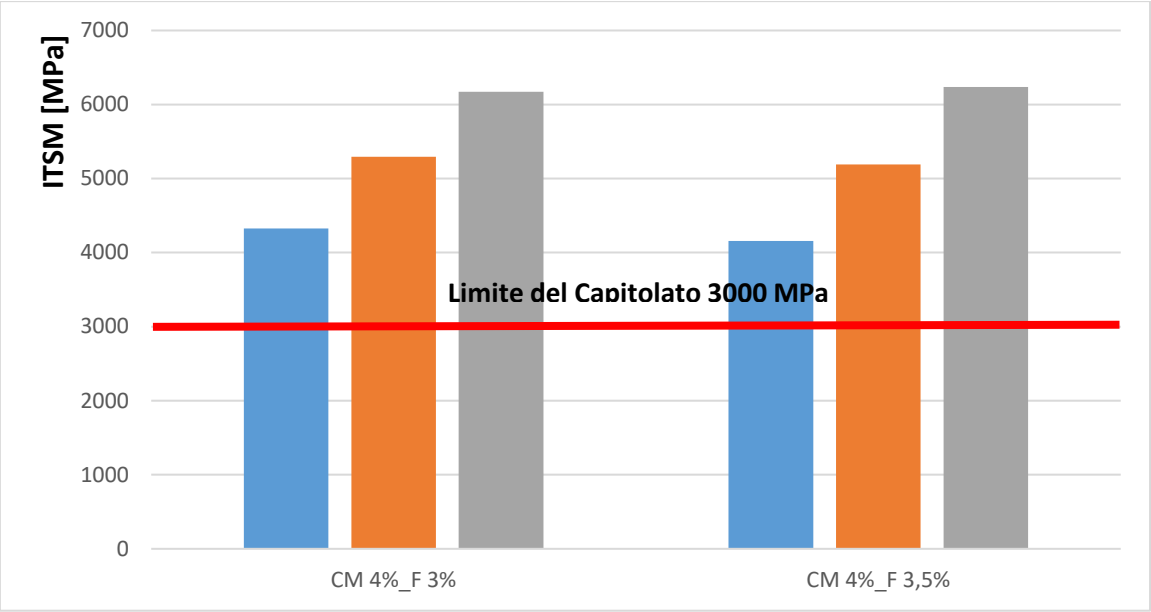


Fig. 3.123 Modulo di rigidezza a trazione indiretta al variare della % di filler, con 4% di emulsione bituminosa

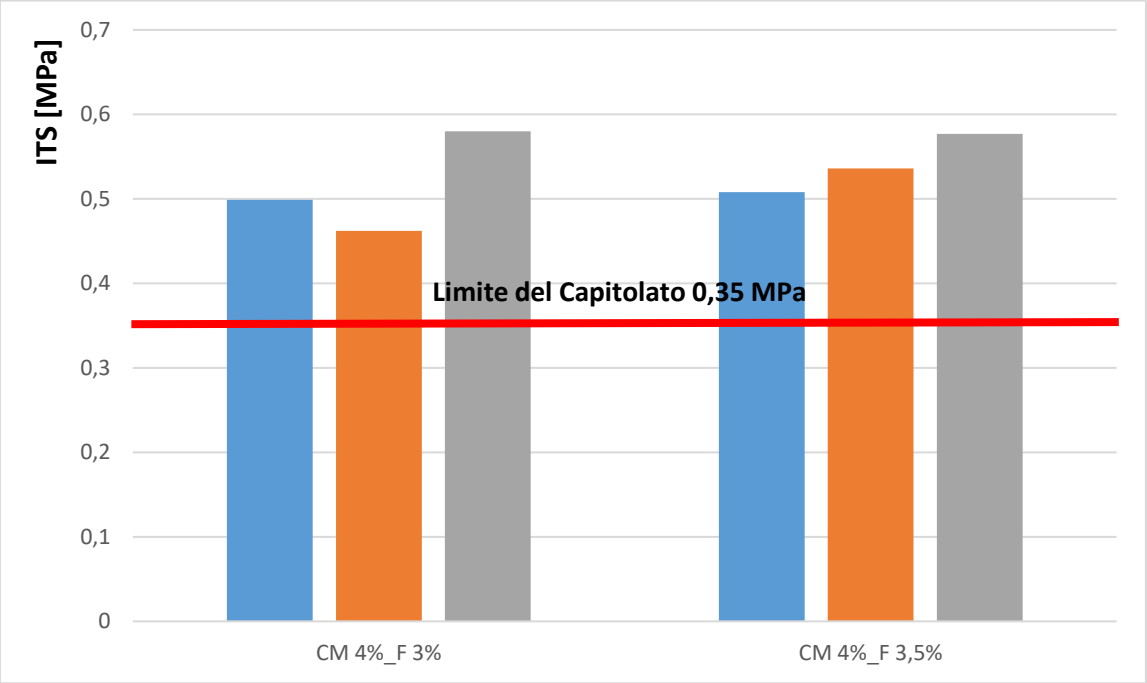


Fig. 3.124 Resistenza a trazione indiretta al variare della % di filler, con 4% di emulsione bituminosa

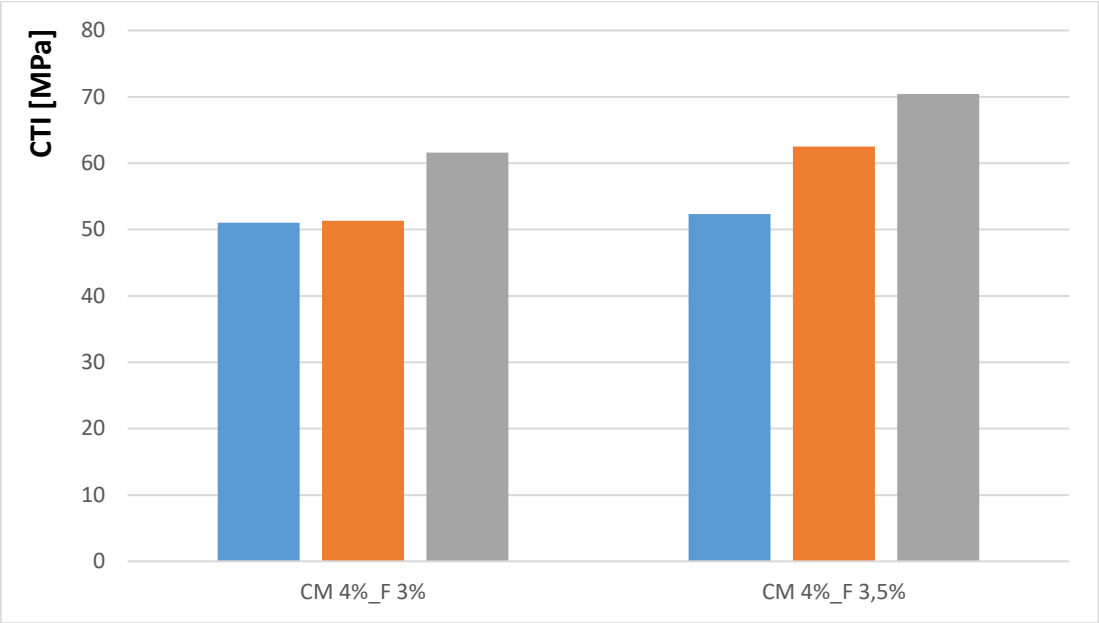


Fig. 3.125 Coefficiente di trazione indiretta al variare della % di filler, con 4% di emulsione bituminosa

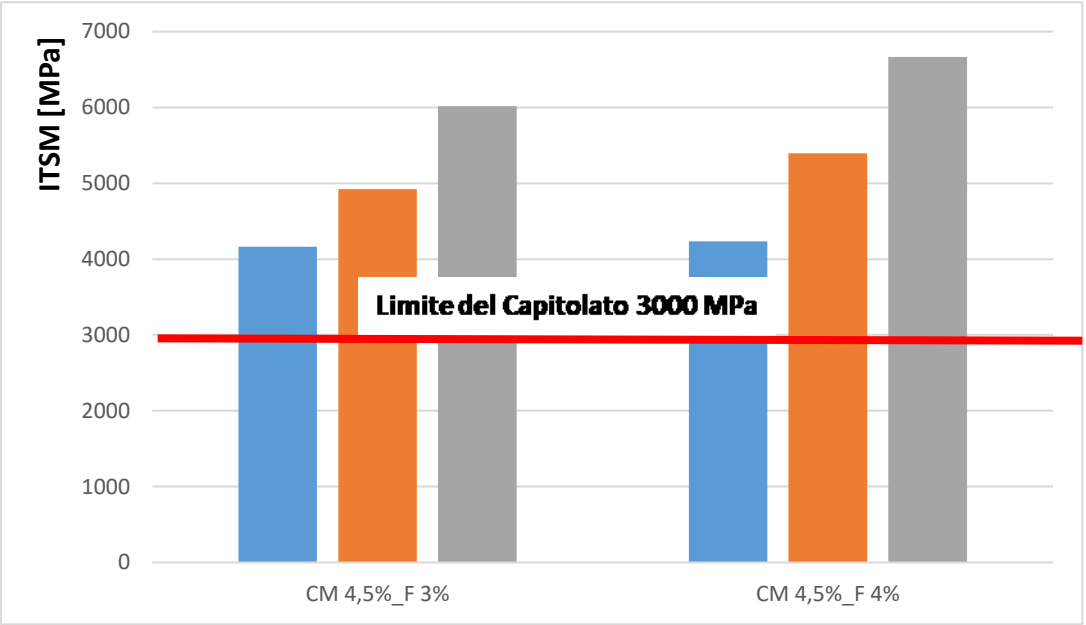


Fig. 3.126 Modulo di rigidezza a trazione indiretta al variare della % di filler, con 4,5 % di emulsione bituminosa

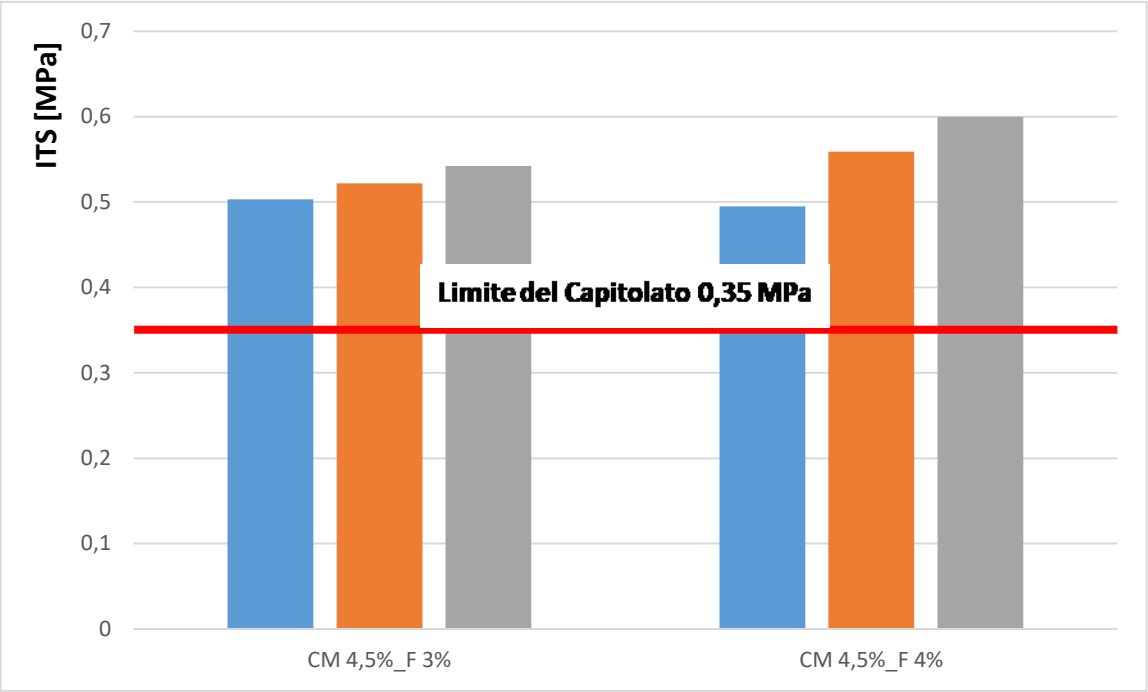


Fig. 3.127 Resistenza a trazione indiretta al variare della % di filler, con 4,5 % di emulsione bituminosa

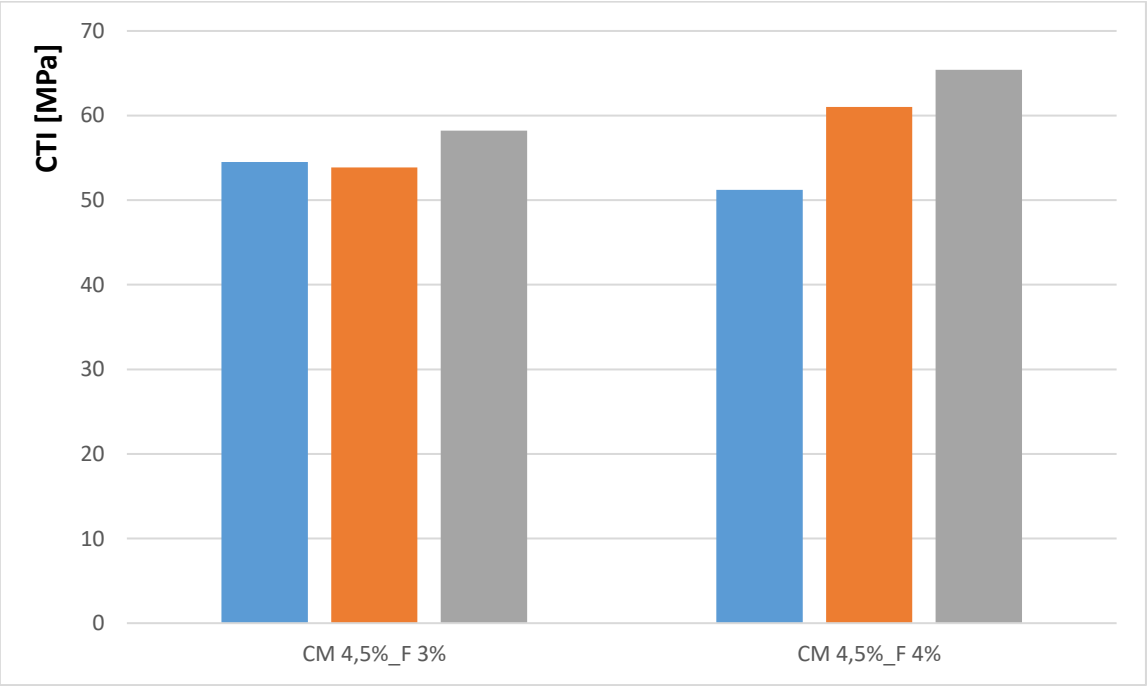


Fig. 3.128 Coefficiente di trazione indiretta al variare della % di filler, con 4,5 % di emulsione bituminosa

Conclusioni

In conclusione, al termine del piano sperimentale possiamo dedurre le seguenti considerazioni:

- Modulo di rigidezza a trazione indiretta
    - Per la maturazione a tre giorni si può concludere che, variando la percentuale di filler e emulsione bituminosa e variando il tipo di emulsione non si hanno variazioni di modulo di resistenza.
    - Utilizzando l'emulsione MC è possibile notare l'incremento del modulo di resistenza per la maturazione a sette giorni, si ha quindi un incremento di rigidezza. Tale incremento si accentua per la maturazione a quattordici giorni.
    - Variando la percentuale di emulsione bituminosa da 3,5% a 4%, come già detto, la maturazione a tre giorni non fornisce variazione, mentre per le maturazioni a sette e quattordici giorni si ha un leggero aumento.
    - Variando l'emulsione da 4% a 4,5%, non si nota nessuna differenza.
    - Aumentando la percentuale di filler da 3% a 3,5% non si notano cambiamenti, mentre si ha un leggero aumento per le maturazioni a sette e quattordici giorni quando il filler passa dal 3% al 4%.
    - Tutte le miscele presentate rispettano i limiti dettati dal Capitolato per il Modulo di resistenza a trazione indiretta pari a 3000 Mpa.

- Resistenza a trazione indiretta:
    - Non si notano significativi cambiamenti al variare del tipo di emulsione.
    - Mantenendo costante la percentuale di filler e variando la percentuale di emulsione (CM), al netto dei problemi riscontrati per la maturazione a sette giorni della miscela CM 4% filler 3%, si può notare un aumento della resistenza passando da CM 3,5% A CM 4% per la maturazione a tre giorni, mentre per la maturazione a quattordici giorni non si verificano particolari variazioni.
    - Passando dalla miscela CM 4% a CM 4,5%, non si notano cambiamenti della resistenza in tutte e tre le maturazioni.

- Variando la percentuale di filler da 3% a 3,5%, i valori della resistenza sono leggermente crescenti ma confrontabili per le maturazioni a tre e quattordici giorni; come detto in precedenza, per la maturazione a sette giorni si sono verificati problemi in laboratorio e quindi nulla si può concludere.
- Incrementando il filler da 3% a 4% si nota un leggero incremento per le maturazioni a sette e quattordici giorni.
- Tutte le miscele presentate rispettano i limiti dettati dal Capitolato per la Resistenza a trazione indiretta pari a 0,35 Mpa.

- Coefficiente di trazione indiretta: i dati elaborati risultano dispersi, pertanto non risulta possibile individuare un trend preciso.

- Volume dei vuoti: si fa riferimento solo al volume dei vuoti dei provini sigillati con la paraffina perché nel volume dei vuoti geometrici vengono prese in considerazione anche le imperfezioni presenti sulle superfici laterali del provino. Dallo studio è risultato che variando la percentuale e tipo di emulsione, variando la percentuale di filler, il volume dei vuoti risulta essere compreso tra l'11 e il 12 %.

- Sensibilità all'acqua:
  - In tutti i provini realizzati ed in tutte le maturazioni di tre, sette e quattordici giorni, l'ITSr è risultato maggiore del limite dettato dal Capitolato pari al 90%. La sensibilità all'acqua non risulta quindi un problema.

Bibliografia e Sitografia

- Felice A. Santagata, “Strade: teoria e tecnica delle costruzioni stradali”, Pearson. Vol. 1 e vol.2;
- P. Ferrari, F. Giannini, “Ingegneria Stradale, Vol. II- Corpo stradale e pavimentazioni”;
- UNI EN 933-1-2009, Analisi granulometrica;
- UNI EN 12697-31, Compattazione di provini cilindrici di miscele bituminose tramite pressa giratoria;
- UNI EN 12697-5, Determinazione della massa volumica massima;
- UNI EN 12697-6, Determinazione della massa volumica in mucchio di provini bituminosi;
- UNI EN 12697-23, Determinazione della Resistenza a trazione indiretta di provini cilindrici di miscele bituminose;
- UNI EN 12697-26, Determinazione della Rigidezza;
- http://www.vallizabban.com/.