

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e del Territorio

Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Orientamento Infrastrutture di Trasporto



Indagine sperimentale sull'impiego di fibre nei misti cementati per pavimentazioni aeroportuali

***Relatore:* Prof. Emanuele TORALDO**

***Correlatore:* Ing. Edoardo MARIANI**

***Tesi di laurea di:*
Simone CAPRIOLI
Matricola 734500**

A.A. 2010-2011

Indice

Indice	2
Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	7
Sommario	10
Introduzione	11
Capitolo 1 Misto cementato fibro-rinforzato in ambito aeroportuale	14
1.1 Lepadimentazioni in ambito aeroportuale.....	15
1.1.1 Caratteristiche delle pavimentazioni aeroportuali.....	15
1.1.2 Cenni sul dimensionamento	17
1.2 Il misto cementato	20
1.2.1 Materiali costituenti e loro qualificazione.....	22
1.2.2 Accettazione delle miscele.....	26
1.2.3 Confezionamento delle miscele.....	27
1.2.4 Preparazione delle superfici di stesa	27
1.2.5 Posa in opera delle miscele	27
1.2.6 Protezione superficiale dello strato finito	28
1.2.7 Controlli.....	29
1.3 Il riciclaggio e gli inerti da riciclo	31
1.3.1 I “rifiuti” edilizi	32
1.3.2 Sintesi aspetti normativi	33
1.3.3 Tecniche e tecnologie per il recupero e il riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione	34
1.3.4 Requisiti generali.....	35
1.3.5 Requisiti prestazionali in base alla destinazione d’impiego.....	36
1.3.6 Gli impieghi e le verifiche di idoneità	37
1.3.7 Misto granulare o cementato per strati di fondazione.....	38
1.4 Le fibre	39
1.4.1 Vantaggi dell’utilizzo di fibre.....	39
1.4.2 Tipologie e proprietà	43

1.4.3	Fibre sintetiche.....	46
Capitolo 2	Materiali e piano sperimentale.....	49
2.1	Materiali costituenti e loro qualificazione.....	50
2.2	Piano sperimentale.....	59
2.3	Metodologia di indagine di laboratorio	63
2.3.1	Valutazione della Massa Volumica Umida tramite Prova Proctor	63
2.3.2	Compattazione dei provini con Pressa a Taglio Giratorio	64
2.3.3	Determinazione del modulo di rigidezza tramite macchina dinamica	71
2.3.4	Prova di resistenza a trazione indiretta (Brasiliana).....	77
2.4	Metodologia di indagine in vera grandezza	79
2.4.1	Determinazione del modulo di deformazione dinamico con LWDT	79
2.4.2	Determinazione del modulo di deformazione statico con Piastra Statica	82
Capitolo 3	Indagini di laboratorio, analisi e discussione dei risultati.....	85
3.1	Caratterizzazione Volumetrica.....	86
3.2	Caratterizzazione Meccanica.....	91
3.2.1	Resistenza a Trazione Indiretta	92
3.2.2	Modulo di rigidezza	96
Capitolo 4	La sperimentazione in vera grandezza	133
4.1	Allestimento del campo prove.....	134
4.2	Confezionamento e stesa	135
4.3	Analisi della compattazione.....	140
4.3.1	Portanza in fase di compattazione	140
4.3.2	Portanza durante la maturazione.....	144
Capitolo 5	Conclusioni	148
	Riferimenti Bibliografici.....	151

Indice delle figure

Figura 1.1 – Pavimentazioni flessibili e semirigide.....	16
Figura 1.2 – Pavimentazioni rigide con lastre non armate.....	16
Figura 1.3 – Pavimentazioni rigide con lastre armate	17
Figura 1.4– Zone critiche e non critiche del sedime aeroportuale.....	18
Figura 1.5 - Esempi di pacchetti di pavimentazione semirigida	21
Figura 1.6 – Relazione tra rapporto d’aspetto e dosaggio delle fibre	41
Figura 1.7– Esempi di fibre di rinforzo [26].....	42
Figura 1.8– Esempi di fibre metalliche	44
Figura 1.9 – Fibre polipropileniche a sezione rettangolare	47
Figura 2.1- fresato di lastra (a) - frantumato di calcestruzzo (b)	52
Figura 2.2 – Curva granulometrica 100% fresato di lastra	53
Figura 2.3 – Curva granulometrica 100% frantumato di calcestruzzo	54
Figura 2.4 – Curva granulometrica dell’aggregato utilizzato.....	55
Figura 2.5– Fibre utilizzate per la sperimentazione.....	57
Figura 2.6– Compattatrice Proctor.....	63
Figura 2.7– Pressa a taglio girevole e schema di esecuzione	65
Figura 2.8– Provini compattati con pressa a taglio girevole	67
Figura 2.9–Schema di applicazione del carico della macchina dinamica	72
Figura 2.10– Particolare del trasduttore	73
Figura 2.11– Castello di carico della macchina dinamica.....	73
Figura 2.12 – Rappresentazione delle curve di carico	74
Figura 2.13 - Sforzi sviluppati nel cuore del provino	77
Figura 2.14– Macchina per prova di resistenza a trazione indiretta (Brasiliana).....	78
Figura 2.15– Piastra dinamica a massa battente.....	80
Figura 2.16– Prova di piastra statica a tre comparatori	82
Figura 2.17– Area interessata dalle sovrappressioni[9].....	83
Figura 2.18– Grafico di una prova a doppio ciclo di carico.....	84
Figura 3.1 – Curva di compattazione con pressa a taglio girevole.....	88
Figura 3.2– Crescita della RTI del MCF a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione	92

Figura 3.3 – Provino di MCF rotto tramite prova Brasiliana.....	93
Figura 3.4– Crescita della RTI del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione.....	94
Figura 3.5 – Confronto tra valori di RTI del MCF e del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni .	95
Figura 3.6– Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MCF	99
Figura 3.7– Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MCF	100
Figura 3.8– Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MCF	101
Figura 3.9 – Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MCF	105
Figura 3.10– Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MCF	106
Figura 3.11 – Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 31 ms per MCF	107
Figura 3.12– Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MC.....	112
Figura 3.13– Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MC.....	113
Figura 3.14– Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MC.....	114
Figura 3.15– Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MC.....	118
Figura 3.16 – Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MC.....	119
Figura 3.17– Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 31 ms per MC.....	120
Figura 3.18 - Andamento modulo di rigidezza del MCF e del MC a 124 ms, in funzione della maturazione.....	129
Figura 3.19 –Andamento modulo di rigidezza del MCF e del MC a 62 ms, in funzione della maturazione.....	130
Figura 3.20 - Andamento modulo di rigidezza del MCF e del MC a 31 ms, in funzione della maturazione.....	131

Figura 4.1 – Campo prove	134
Figura 4.2 – Schema organizzazione del campo prove.....	134
Figura 4.3 – Impianto di miscelazione [14]	136
Figura 4.4 –Misto cementato all'uscita del miscelatore	136
Figura 4.5– Carico degli aggregati nel miscelatore	137
Figura 4.6 – Griglia dell'impianto di miscelazione	138
Figura 4.7- Carico della finitrice e stesa del materiale	139
Figura 4.8- Misurazione dello spessore dello strato.....	139
Figura 4.9- Rullo compattatore acciaio-gomma	140
Figura 4.10- Definizione delle aree di analisi	141
Figura 4.11- Delimitazione di un'area di prova	142
Figura 4.12- Variazione di E_{vd} del MC in relazione al numero di passaggi del rullo	143
Figura 4.13 - Variazione di E_{vd} del MCF in relazione al tempo di maturazione	144
Figura 4.14- Variazione di M_d , M_d' e I_c del MC in relazione al tempo di maturazione	146
Figura 4.15 – Confronto tra E_{vd} e M_d in funzione del tempo di maturazione.....	147

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 – Requisiti di utilizzo per l’aggregato grosso.....	22
Tabella 1.2 – Requisiti di utilizzo per l’aggregato fino.....	23
Tabella 1.3– Requisiti compositivi per i diversi tipi di cemento (UNI EN 197-1) [1].....	24
Tabella 1.4 – Fusso granulometrico per gli aggregati utilizzati nel misto cementato [CNR BU 29/72].....	25
Tabella 1.5 – Requisiti meccanici delle miscele.....	26
Tabella 1.6 –Controllo dei materiali e verifiche prestazionali	30
Tabella 1.7 – Parametri di alcune tipologie di fibre [24].....	42
Tabella 2.1 – Costituenti della miscela di misto cementato con fibre.....	50
Tabella 2.2 - Frazioni granulometriche 100% fresato di lastra.....	53
Tabella 2.3 – Frazioni granulometriche 100% frantumato di calcestruzzo.....	54
Tabella 2.4 – Frazioni granulometriche dell’aggregato utilizzato	55
Tabella 2.6 – Caratteristiche fisico-chimiche della fibra polipropilenica fibrillata [6].....	57
Tabella 2.7 – Parametri di compattazione pressa a taglio giratorio.....	67
Tabella 2.8 – Parametri di prova per il calcolo del modulo elastico.....	75
Tabella 3.1– Densità dei 3 provini dopo compattazione con prova Proctor.....	86
Tabella 3.2– Compattazione con pressa a taglio giratorio – C1 e k dei provini di MCF	88
Tabella 3.3– Compattazione con pressa a taglio giratorio – C1 e k dei provini di MC.....	89
Tabella 3.4 – Coefficiente di variazione di C1 e k per MCF e MC.....	90
Tabella 3.5 – Valori di RTI del MCF a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione.....	92
Tabella 3.6–Valori di RTI del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione	94
Tabella 3.7 – Confronto tra valori di RTI del MCF e del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni	95
Tabella 3.8 – Valori di modulo di rigidezza del MCF testato con macchina dinamica.....	97

Tabella 3.9 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MCF	99
Tabella 3.10 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MCF.....	100
Tabella 3.11 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MCF.....	101
Tabella 3.12 – Media delle variazioni del modulo in funzione dei tempi di picco per MCF.....	102
Tabella 3.13 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MCF	105
Tabella 3.14 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MCF.....	106
Tabella 3.15 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 31ms per MCF.....	107
Tabella 3.16 – Media delle variazioni del modulo in funzione delle tensioni imposte per MCF	108
Tabella 3.17 - Valori di modulo di rigidità del MC testato con macchina dinamica	110
Tabella 3.18 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MC	112
Tabella 3.19 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MC	113
Tabella 3.20 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MC	114
Tabella 3.21 – Media delle variazioni del modulo in funzione dei tempi di picco per MC.....	115
Tabella 3.22 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MC.....	118
Tabella 3.23 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MC.....	119
Tabella 3.24 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 31 ms per MC.....	120

Tabella 3.25 – Media delle variazioni del modulo in funzione delle tensioni imposte per MC.....	121
Tabella 3.26 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco per MCF	123
Tabella 3.27 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco per MC.....	123
Tabella 3.28 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta per MCF	124
Tabella 3.29 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta per MC.....	124
Tabella 3.30 – Valori di modulo di rigidezza del MCF testato con macchina dinamica.....	128
Tabella 3.31 - Valori di modulo di rigidezzadelMC testato con macchina dinamica	128
Tabella 3.32–Variazione del modulo di rigidezzadelMCF rispetto al MC a 124 ms	129
Tabella 3.33–Variazione del modulo di rigidezzadel MCF rispetto al MC a 62 ms	130
Tabella 3.34–Variazione del modulo di rigidezzadel MCF rispetto al MC a 31 ms	131
Tabella 4.1 – Valori di E _{vd} del MCF in relazione al numero di passaggi del rullo	143
Tabella 4.2 - Valori di E _{vd} delMCF a 1 – 2 – 3 giorni di maturazione	144
Tabella 4.3 - Valori di M _d , M _d ' e I _c del MCF a 24 - 48 - 72 -96 ore di maturazione	146

Sommario

In questa tesi è stato indagato il comportamento meccanico dei misti cementati fibrorinforzati attraverso una serie di test sperimentali in laboratorio e in situ. L'approccio metodologico, con cui è stata eseguita l'indagine di laboratorio, è stato pensato con l'obiettivo di mettere in luce le prestazioni del misto cementato con l'additivazione di fibre. Nella prima fase dello studio è stato analizzato il comportamento di campioni sottoposti a prova di trazione indiretta e di determinazione del modulo di rigidezza, successivamente alla valutazione di lavorabilità e autocompattazione. Si sono poste a confronto due miscele nominalmente identiche, ma con l'aggiunta in una di esse di un dosaggio di fibra pari allo 0,04% in peso rispetto alla componente lapidea secca, equivalente a 1kg di fibre ogni metro cubo di materiale compattato. Le due miscele verranno successivamente nominate MCF e MC: la prima sigla è riferita al misto cementato rinforzato con fibre, mentre con la seconda identifica il misto cementato senza aggiunta di fibre. Contemporaneamente è stato realizzato un campo prove nel sedime aeroportuale di un importante aeroporto milanese, durante l'ottobre 2010, dove è stata effettuata la stesa di 50 metri di solo misto cementato fibrorinforzato (MCF), per uno spessore di 18 cm, al di sopra di un sottofondo naturale stabilizzato a cemento. Ciò ha permesso di valutare le procedure operative di miscelazione, stesa e compattazione e le prestazioni in scala reale del materiale fibrorinforzato nel tempo.

Introduzione

Il comportamento delle fibre in polipropilene fibrillato all'interno delle sovrastrutture semirigide non è ancora del tutto chiaro. Le difficoltà possono essere ricondotte alla differente risposta del misto cementato durante la vita utile. In una prima fase, in assenza di fessurazione, il comportamento del materiale è assimilabile a quello di uno strato rigido dotato di resistenza flessionale. Successivamente, in seguito ai carichi, al ritiro e alle sollecitazioni dovute ai cicli termici, si produce una fessurazione diffusa. L'interasse delle fessurazioni trasversali dipende dalle caratteristiche di resistenza del materiale e può essere collegato, a parità delle altre condizioni, al dosaggio dei leganti idraulici nella miscela e delle aggiunte. Nel primo caso, un basso dosaggio di cemento determina minori fessure, ma esse crescono in estensione, interasse e apertura all'aumentare della quantità di legante. Anche il modulo elastico cresce con il tenore di cemento, aumentando le aliquote di sforzo nel materiale, senza che esso abbia sufficienti caratteristiche di resistenza. Il risultato è dunque quella di una fessurazione latente che si origina nelle prime fasi di stesa e maturazione e si evolve nel tempo in funzione delle condizioni termiche, igrometriche e dei carichi di esercizio. L'intensità e il numero di questi conducono a fenomeni di fatica che sono direttamente connessi alla fragilità del materiale. La singola fessura, dopo la sua formazione, si propaga aumentando progressivamente la sua apertura in corrispondenza di ciascun ciclo di carico e proporzionalmente all'intensità di questo. Il risultato finale è quello di un materiale che può essere al più considerato un buon misto granulare stabilizzato. Ulteriore aspetto critico può essere individuato nel fatto che quasi tutti i materiali granulari, siano essi legati o meno, risentono di fenomeni di post-consolidamento durante il primo anno di vita utile. Ciò può determinare la riduzione nell'omogeneità del supporto su cui poggia il misto cementato che vede così incrementare le sollecitazioni di trazione per flessione. Da ciò consegue che il miglioramento delle prestazioni del misto cementato passa attraverso l'incremento delle caratteristiche di resistenza a trazione, in particolare nelle

prime fasi di messa in opera del materiale e durante il primo e secondo anno di vita utile [15].

Deve essere anche considerato che, in questa tesi, lo scheletro solido della miscela è costituito interamente da materiali di recupero che devono garantire, oltre alle garanzie di compatibilità ambientale, prestazioni strutturali e di durabilità commisurate al valore economico e sociale dell'opera. Questi materiali di riciclo sono spesso caratterizzati da problemi di bassa resistenza a compressione, ampia variabilità in termini di qualità, alta suscettibilità all'acqua e basso modulo elastico causati dalla contaminazione da parte di materiali di natura estranea, nonché dalla presenza di un'importante componente di pasta cementizia relativamente debole.

Una promettente tecnologia è quella di conseguire un miglioramento delle prestazioni introducendo fibre polipropileniche fibrillate. Sinora, sono stati fiorenti gli studi finalizzati alla valutazione delle prestazioni del calcestruzzo confezionato con aggregati di riciclo e rinforzato con l'aggiunta di varie tipologie di fibre. L'idea di aggiungere fibre al calcestruzzo confezionato con materiali di riciclo è nata dal desiderio di migliorarne le proprietà, aumentandone le prestazioni meccaniche e nel contempo salvaguardare l'ambiente in un'ottica di "sviluppo sostenibile", [17-19]. I dati ottenuti da queste sperimentazioni, in particolar modo per quel che riguarda l'aggiunta di fibre polipropileniche, hanno fornito esiti positivi in termini di prestazioni meccaniche del materiale [16].

Da questi presupposti, si è pensato di adottare la stessa idea anche nel campo delle sovrastrutture stradali ed aeroportuali, in particolare utilizzando le fibre come aggiunta ai misti cementati confezionati con materiali di riciclo, per aumentare le prestazioni di tale strato all'interno di una pavimentazione. Le ricerche in tal senso sono limitate, ma, nell'ambito di studi condotti presso il Politecnico di Milano, sono state svolte attività sia di laboratorio che di campo, inerenti all'ottimizzazione di un misto cementato rinforzato con fibre per strati di base di pavimentazioni aeroportuali. I dati ottenuti hanno proposto un primo esito positivo in termini di miglioramento delle caratteristiche meccaniche del materiale per un determinato dosaggio di fibre [2][13].

Le verifiche svolte in questa tesi su un misto cementato, costituito al 100% da materiali di recupero e rinforzato con fibre polipropileniche fibrillate, sono una

naturale conseguenza delle esperienze suddette. Tali verifiche sono volte a illustrare i risultati dei test sperimentali, condotti presso il Laboratorio Sperimentale Stradale DIAR – Politecnico di Milano, in merito ad una miscela di misto cementato di caratteristiche predeterminate, con l'aggiunta in una di un dosaggio di fibra pari allo 0,04% in peso rispetto alla componente lapidea secca. L'applicazione di tale materiale vede un riscontro pratico per la realizzazione di uno strato di base nell'ambito della riqualifica infrastrutturale delle vie di rullaggio attualmente in corso presso un importante aeroporto milanese, dove sono state effettuate prove atte a valutarne le prestazioni grazie ad una campagna di sperimentazione in vera grandezza.

Capitolo 1

Misto cementato fibro-rinforzato in ambito aeroportuale

In questo primo capitolo verrà descritto, in primo luogo, l'ambito di utilizzo del misto cementato rinforzato con fibre studiato in questa tesi, cioè la pavimentazione aeroportuale. In particolare si darà una visione generale delle caratteristiche salienti di queste pavimentazioni, conoscendo le quali saranno note le esigenze a cui dovranno rispondere i materiali utilizzati, tra cui anche il misto cementato. In seguito verrà proposta una descrizione del misto cementato e dei suoi materiali costituenti, nonché accenni riguardanti il confezionamento, la posa, la protezione e il controllo. In aggiunta, poiché il misto cementato analizzato è costituito totalmente da aggregati ottenuti dalla frantumazione e vagliatura di materiali di riciclo, quali lastre armate in calcestruzzo di una pavimentazione aeroportuale e materiali in calcestruzzo di risulta da demolizioni, verrà brevemente trattato l'argomento riguardante il riciclaggio nel campo delle costruzioni. Successivamente verranno descritte nel dettaglio le tipologie di fibre utilizzate come aggiunte e gli effetti benefici e gli svantaggi risultati dal loro utilizzo. In questo frangente rientra una particolareggiata analisi delle fibre polipropileniche fibrillate utilizzate come rinforzo al misto cementato analizzato in questa tesi, riportando i risultati sperimentali di precedenti esperienze e lo stato dell'arte.

1.1 Le pavimentazioni in ambito aeroportuale

1.1.1 Caratteristiche delle pavimentazioni aeroportuali

Le pavimentazioni aeroportuali presentano alcune peculiarità degne di approfondimento. La struttura è formata da una successione di strati costituiti da materiali con caratteristiche diverse, il cui insieme è in grado di assolvere i seguenti compiti:

- formare una struttura stabile nel tempo e poco deformabile capace di resistere alle ripetute sollecitazioni dovute al passaggio degli aeromobili;
- trasferire il carico al piano di posa compatibilmente con la portanza di quest'ultimo;
- garantire una circolazione rapida e sicura degli aeromobili a terra in relazione ai problemi di aderenza pneumatico-pavimentazione;
- realizzare una superficie sufficientemente regolare tale da escludere vibrazioni dannose e assicurare un adeguato confort per i passeggeri.

Pertanto le pavimentazioni aeroportuali risultano funzionalmente simili a quelle stradali ma con alcune differenze imputabili alla diversità tra i due traffici, in particolare:

1. *entità del carico*: il carico massimo per asse singolo in ambito stradale è 12 t pertanto con carico su ruota singola pari a 6 t, un DC-10 Sr 30 ha un carico su ruota singola di 24 t;
2. *pressione di gonfiaggio*: nel caso dei veicoli stradali le pressioni sono variabili tra 2 e 6 bar mentre per gli aeromobili commerciali sono contenute tra 1,5 e 14 bar, per aeromobili militari comprese tra 14 e 20 bar;
3. *geometria del carico*: le ruote del carrello di un velivolo presentano diverse configurazioni (ruota singola, ruote gemellate, tandem, tridem, ecc.);
4. *numero di ripetizioni di carico*: il numero delle ripetizioni è inferiore in ambito aeroportuale (es. forte traffico 130.000 mov/anno) rispetto ad un caso stradale (es. autostrada >1.000.000 pass/anno);
5. *velocità di percorrenza*: le velocità di percorrenza degli aeromobili presentano una variabilità maggiore rispetto al campo stradale. Ad

esempio sulla pista di volo esse variano tra 100 e 300 km/h mentre sulle vie di circolazione le stesse sono contenute tra 20 e 50 km/h;

6. *maggiore influenza alle condizioni climatiche*: a causa della grande estensione, delle deboli pendenze longitudinali e trasversali e dell'assenza di vegetazione.

La pavimentazione aeroportuale deve quindi avere maggiori caratteristiche di portanza rispetto ad una pavimentazione stradale.

Le pavimentazioni aeroportuali, come quelle stradali, possono essere realizzate secondo schemi classici del pacchetto multistrato ovvero in conglomerato bituminoso, con presenza o meno di fondazione in misto cementato, oppure con lastre in calcestruzzo (Figura 1.1, Figura 1.2, Figura 1.3) [22].

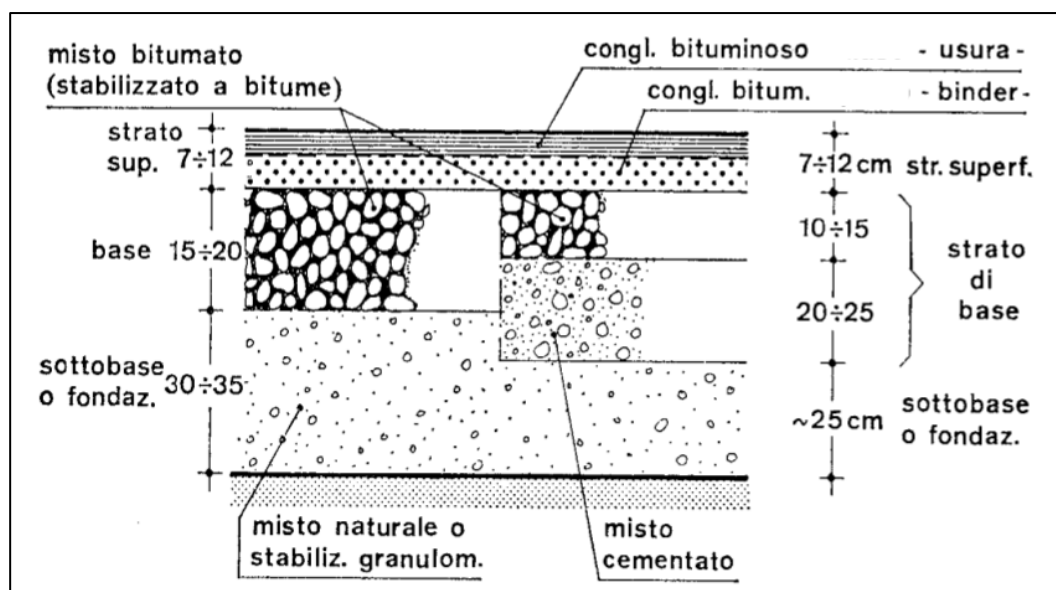


Figura 1.1 - Pavimentazioni flessibili e semirigide

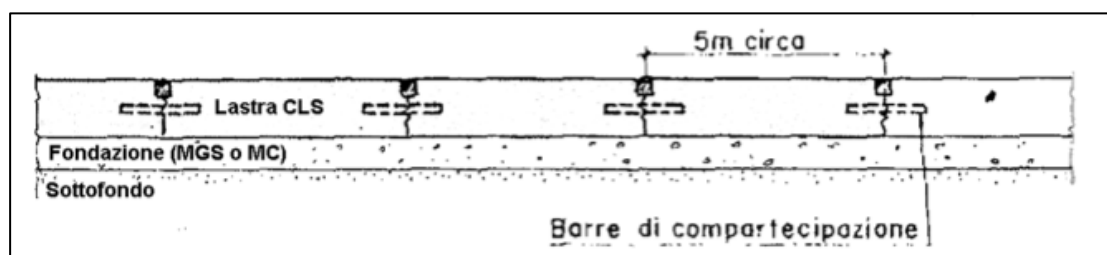


Figura 1.2 - Pavimentazioni rigide con lastre non armate

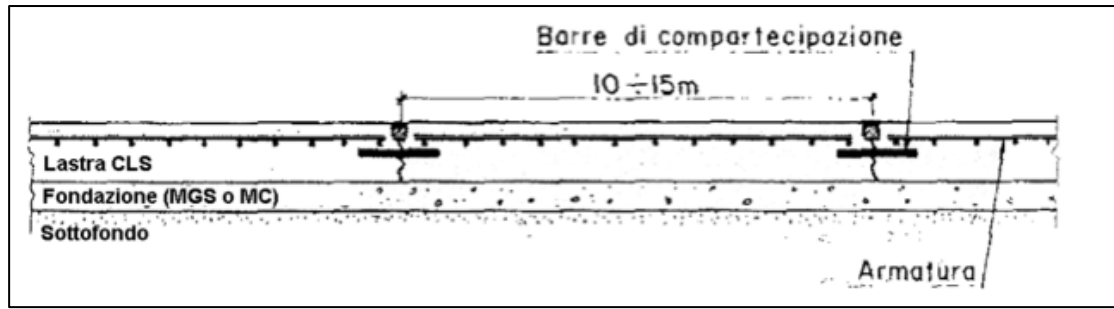


Figura 1.3 – Pavimentazioni rigide con lastre armate

1.1.2 Cenni sul dimensionamento

Il dimensionamento è l'insieme di tutte le operazioni che concorrono alla definizione degli spessori degli strati costituenti la pavimentazione e delle proprietà dei relativi materiali, relativamente ad una determinata durata e traffico previsto.

Il corretto dimensionamento della pavimentazione deve considerare le seguenti peculiarità dell'ambito aeroportuale:

- non omogeneità delle caratteristiche degli aerei: diversità del peso, della disposizione delle ruote e della loro pressione di gonfiaggio;
- diversità del carico in relazione alle condizioni operative: uno stesso aeromobile presenta diverso carico se in fase di decollo, atterraggio, ecc.;
- differente sollecitazione della pavimentazione: a causa della variazione di velocità e della diversa canalizzazione del traffico;
- assolvimento a diversi scopi funzionali e strutturali: perdite di carburante o getto caldo dei motori, tipologie di sforzi di sollecitazione.

Ai fini del dimensionamento è utile effettuare una distinzione tra le diverse zone pavimentate dell'aeroporto, in particolare tra le zone definite critiche e quelle non critiche. Le prime sono zone dell'air side nelle quali gli aeromobili si muovono secondo precisi itinerari (movimenti canalizzati) e a causa delle basse velocità la portanza alare è nulla e il carico dell'aereo si scarica completamente sulla pavimentazione: Vie di rullaggio, Piazzali di sosta, Aree di attesa, Testate delle piste di volo. Le seconde, denominate zone non critiche, sono zone dell'air side percorse dagli aeromobili in velocità e pertanto intervenendo la portanza

alare il carico del velivolo si scarica solo parzialmente sulla pavimentazione: Pista di volo, Vie di uscita rapida. In Figura 1.4 sono rappresentate le zone sopra descritte.

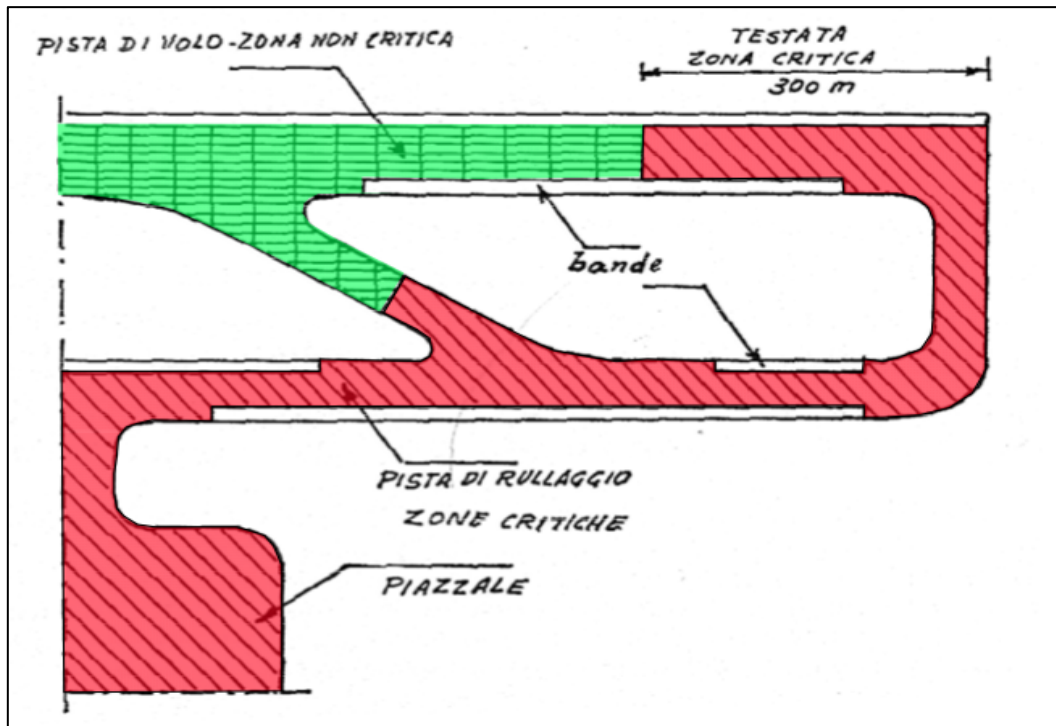


Figura 1.4- Zone critiche e non critiche del sedime aeroportuale

Inoltre, esistono in aeroporto pavimentazioni sollecitate da carichi diversi da quelli degli aeromobili e che pertanto vanno trattate separatamente. Si tratta delle fasce antipolvere, o shoulder, che devono sopportare i carichi accidentali di aerei che fuoriescono dalla pista, in genere vengono dimensionate per sopportare il traffico dei veicoli di servizio; si hanno anche aree di servizio nell'ambito dei parcheggi aeromobili che sono zone prospicienti il fronte dell'aerostazione interessate dal transito dei veicoli di servizio quali autobotti carburante, veicoli VVFF, portacontainers, passerelle telescopiche, etc. Queste zone molte volte sono sollecitate da carichi anche più gravosi degli aeromobili (ingenti carichi concentrati e elevate azioni tangenziali). Infine, vi sono le strade di servizio che sono percorse dai veicoli di servizio e pertanto possono essere dimensionate con le stesse regole utilizzate nel progetto delle pavimentazioni stradali.

I dati aeroportuali si progetto necessari per il dimensionamento strutturale delle

pavimentazioni aeroportuali sono:

1. *carichi di traffico*: per la definizione del traffico di progetto è indispensabile conoscere i carichi effettivi e il numero di movimenti che ciascuna tipologia di aeromobile effettuerà nell'arco della "vita utile" visto che il peso di un aeromobile è molto variabile in funzione delle operazioni che esegue. Occorre inoltre in alcuni casi considerare l'azione dinamica sui carrelli degli aeromobili che aumenta con l'aumentare della velocità e delle irregolarità superficiali;
2. *caratteristiche di portanza del terreno di sottofondo*: con terreno di sottofondo si fa riferimento alla porzione più superficiale del terreno su cui viene posta la pavimentazione. Il suo spessore varia da 50 a 150 cm e il suo studio è finalizzato alla definizione della sua capacità portante. Tale grandezza verrà valutata secondo le diverse procedure richieste dal metodo di dimensionamento impiegato;
3. *condizioni ambientali*: generalmente comprende i dati di temperatura e piovosità. I primi sono indispensabili per valutare le sollecitazioni igrotermiche e la variazione di comportamento meccanico dei materiali. Le seconde per valutare le condizioni di umidità del sottofondo al fine di determinare le sue caratteristiche di portanza. Importante è anche la profondità di penetrazione del gelo;
4. *caratteristiche dei materiali costituenti la pavimentazione*: sono parametri indispensabili per effettuare le necessarie verifiche strutturali della pavimentazione, e quindi definire i costi di realizzazione. Al variare delle caratteristiche dei materiali si modifica, infatti, lo stato tenso-deformativo della pavimentazione e di conseguenza variano gli spessori degli strati costituenti.

Sulla base di tali dati di input esistono numerosi metodi di calcolo delle pavimentazioni, tutti riferibili a due grandi famiglie: metodi empirici, metodi razionali. I primi, sviluppati da diverse entità di controllo e gestione dell'aviazione civile, come la FAA (Federal Aviation Administration); i secondi basati su calcoli analitici o numerici [22].

1.2 Il misto cementato

Terminata la descrizione dei principali requisiti funzionali a cui deve rispondere una pavimentazione aeroportuale, è possibile dare una definizione del pacchetto di pavimentazione che è stato oggetto di studio in questa tesi: il misto cementato. Questo materiale è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego, o di riciclo, trattata con un legante idraulico (cemento), a cui possono essere addizionate differenti tipologie di aggiunte. La miscela deve assumere, dopo un adeguato tempo di stagionatura, una resistenza meccanica durevole ed apprezzabile mediante prove eseguibili su provini di forma assegnata, anche in presenza di acqua o gelo [31].

Il misto cementato è stato utilizzato in tutto il mondo per migliorare le caratteristiche delle basi di pavimentazioni stradali, aeroportuali e di edifici. Quando il cemento Portland viene miscelato con acqua e aggregati hanno inizio reazioni di idratazione che portano al miglioramento delle caratteristiche meccaniche del materiale nel tempo. Per questo motivo il misto cementato è utilizzabile, all'interno delle pavimentazioni, come strato di base o fondazione che hanno principalmente il compito di resistere ai carichi verticali ripartendoli sugli strati sottostanti di minori qualità portanti, e nel contempo di ridurre la quantità di conglomerato bituminoso da utilizzare, diminuendo notevolmente il costo dell'opera. Le pavimentazioni così realizzate, sostituendo uno degli strati portanti di una pavimentazione flessibile con il misto cementato, vengono denominate pavimentazioni semirigide. In Figura 1.5 A) e B) vengono rappresentati due esempi di pavimentazioni semirigide in cui rispettivamente il pacchetto di base e il pacchetto di fondazione sono stati sostituiti dal misto cementato. In essa sono rappresentati:

- a) Strato di usura (conglomerato bituminoso)
- b) Strato di collegamento o binder (conglomerato bituminoso)
- c) Strato di base (misto cementato)
- d) Strato di base (misto bitumato)
- e) Strato di fondazione (misto granulare)
- f) Strato di fondazione (misto cementato)
- g) Sottofondo

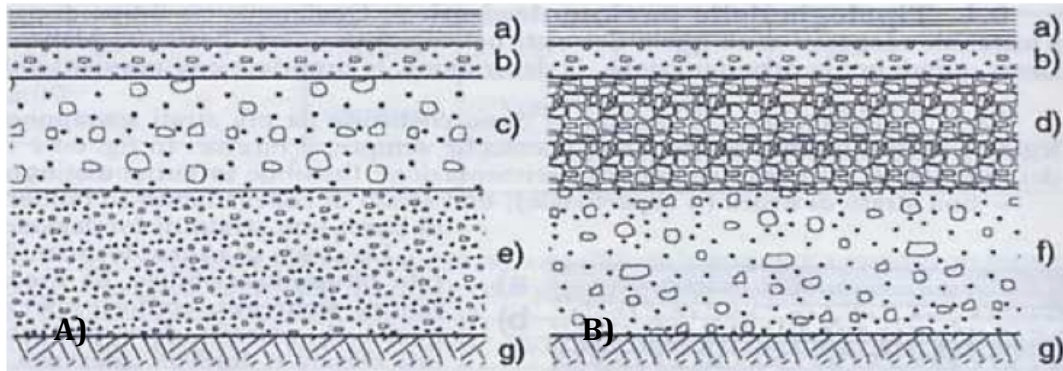


Figura 1.5 - Esempi di pacchetti di pavimentazione semirigida

La minor deformabilità dello strato rigido implica una minor deformabilità globale della sovrastruttura. A parità di ogni altra condizione, la pavimentazione risentirà quindi meno dei fenomeni di fatica e di deformazioni permanenti localizzate degli strati superficiali.

Nonostante questi aspetti pregevoli del misto cementato, insorgono anche problematiche dovute al fatto che i fenomeni di idratazione portano ad un ritiro del materiale e ad una conseguente fessurazione dello stesso [32][33]. La resistenza a trazione del materiale svolge, quindi, un ruolo fondamentale nel limitare le fessurazioni dovute non soltanto al ritiro del materiale nella fase iniziale di idratazione, ma anche durante la vita di quest'ultimo in quanto è soggetto ad importanti e ripetute sollecitazioni flessionali dovute al traffico. Se il materiale non possiede una resistenza a trazione tale da resistere alle suddette sollecitazioni, possono insorgere delle fessurazioni che si propagano negli strati sovrastanti raggiungendo, in alcuni casi, anche la superficie. Queste fessurazioni, oltre a diminuire la capacità portante, accelerano il processo di deterioramento favorendo l'infiltrazione dell'acqua all'interno della pavimentazione e rendendola più suscettibile agli effetti causati dal gelo-disgelo.

Sono stati eseguiti studi che hanno analizzato il meccanismo di fessurazione da ritiro delle basi in misto cementato e dei suoli trattati a cemento [31] [32] [34], concludendo che tali fessurazioni potrebbero essere attenuate adottando opportuni accorgimenti quali: controllo della quantità massima di argilla; uso di additivi come ceneri volanti; controllo della qualità del materiale con particolare riguardo alla densità massima, al contenuto ottimale di acqua e all'uniformità della miscela; aumentando lo spessore della pavimentazione in conglomerato

bituminoso, sovrastante il pacchetto di misto cementato; riducendo il contenuto di cemento. Inoltre, recenti studi hanno mostrato che l'aggiunta di fibre nel misto cementato migliora significativamente la resistenza a trazione del materiale, riducendone la fessurazione dovuta al ritiro [4][5][35]. Altre sperimentazioni atte a valutare gli effetti del rinforzo del misto cementato grazie alle fibre, hanno portato alla conclusione che queste aumentano considerevolmente la resistenza a trazione indiretta e il modulo di rigidità del materiale[36]. Infine, sono state condotti studi in merito alla risposta di un misto granulare trattato a cemento e fibro-rinforzato sottoposto a prove di fatica, ottenendo dei risultati positivi in termini di incremento del numero di cicli e di tensione imposta, necessari per raggiungere la rottura [37][15].

1.2.1 Materiali costituenti e loro qualificazione

Aggregati

Gli aggregati sono gli elementi lapidei miscelando i quali si ottiene il misto granulare che costituisce la base del misto cementato.

Essi risultano composti dall'insieme degli aggregati grossi e dagli aggregati fini.

L'aggregato grosso deve essere costituito da elementi ottenuti dalla frantumazione di rocce lapidee, da elementi naturali tondeggianti, da elementi naturali tondeggianti frantumati, da elementi naturali a spigoli vivi. Tali elementi potranno essere di provenienza o natura petrografica diversa purché, per ogni tipologia, risultino soddisfatti alcuni requisiti, come quelli ad esempio riportati nella Tabella 1.1.

Tabella 1.1 – Requisiti di utilizzo per l'aggregato grosso

AGGREGATO GROSSO			
<i>Parametro</i>	<i>Normativa</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori richiesti</i>
Los Angeles	CNR 34/73	%	≤ 30
Quantità di frantumato	-	%	≥ 70
Dimensione max	CNR 23/71	mm	40
Sensibilità al gelo	CNR 80/80	%	≤ 30
Passante al setaccio 0.075	CNR 75/80	%	≤ 1

L'aggregato fino deve essere costituito da elementi naturali o di frantumazione anch'esso dotato di idonee caratteristiche fisico/composizionali, che possono essere quelle riassunte nella Tabella 1.2.

Tabella 1.2 – Requisiti di utilizzo per l'aggregato fino

AGGREGATO FINO			
<i>Parametro</i>	<i>Normativa</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valori richiesti</i>
Equivalente in sabbia	CNR 27/72	%	≥ 60
Indice Plasticità	CNR-UNI 10014	%	N.P.
Limite liquido	CNR-UNI 10014	%	≤ 25

All'interno di un cantiere, ai fini dell'accettazione, almeno 15 giorni prima dell'inizio della posa in opera, l'Impresa esecutrice è tenuta a predisporre la qualificazione degli aggregati tramite certificazione attestante i requisiti prescritti.

Cemento

Il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, mescolato con acqua, forma una pasta che rapprende e indurisce a seguito di processi e reazioni di idratazione e che, una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua.

Possono essere impiegati i seguenti tipi di cemento, elencati nella norma UNI EN 197-1:

- tipo CEM II (Portland composito);
- tipo CEM II (d'altoforno);
- tipo CEM IV (pozzolanico);
- tipo CEM V (composito).

La suddivisione, suggerita dalla norma UNI EN 197-1 è basata sulla combinazione di differenti quantitativi (espressi in percentuali in massa) di clinker di Portland e aggiunte minerali, definisce così la possibilità di produrre 25 diversi tipi di cemento (Tabella 1.3).

Tabella 1.3- Requisiti compositivi per i diversi tipi di cemento (UNI EN 197-1) [1]

Tipo	Denominazione	Sigla	Clinker	Loppa d'altoforno o Granulata	Micro silice	Pozzolana		Cenere volante		Scisto calcinato	Calcare	Costituenti Secondari	
						naturale	industriale	silicica	calcica				
						K	S	D	P				Q
I	Cemento Portland	I	95-100									0-5	
II	Cemento Portland alla loppa	II-A/S II-B/S	80-94 65-79	6-20 21-35	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	0-5 0-5	
	Cemento Portland alla micro silice	II-A/D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland alla pozzolana	II-A/P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		II-B/P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		II-A/Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		II-B/Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland alla cenere volante	II-A/V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		II-B/V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		II-A/W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		II-B/W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Cemento Portland allo scisto calcinato	II-A/T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		II-B/T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland al calcare	II-A/L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
II-B/L		65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
Cemento Portland composito	II-A/M	80-94	6-20										
	II-B/M	65-79	21-35										
III	Cemento d'altoforno	III-A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		III-B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		III-C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
IV	Cemento pozzolanico	IV-A	65-89	-	11-35			-	-	-	-	0-5	
		IV-B	45-64	-	36-55			-	-	-	-	0-5	
V	Cemento composito	V-A	40-64	18-30	-	18-30		-	-	-	-	0-5	
		V-B	20-39	31-50	-	31-50		-	-	-	-	0-5	

I cementi utilizzati dovranno rispondere ai requisiti previsti dalla L. 595/65. Ai fini dell'accettazione, prima dell'inizio dei lavori, i cementi utilizzati dovranno essere controllati e certificati come previsto dal DPR 13/9/93 n. 246 e dal D.M. 12/07/93 n. 314. Tale certificazione sarà rilasciata dall'Istituto Centrale per la Industrializzazione e la Tecnologia Edilizia (I.C.I.T.E.), o da altri organismi autorizzati ai sensi del D.M. 12/07/93 n. 314.

Acqua

L'acqua deve essere esente da impurità dannose, come oli, acidi, alcali, materia organica, frazioni limo-argillose e qualsiasi altra sostanza nociva. In caso di dubbio sulla sua qualità l'acqua andrà testata secondo la norma UNI EN 1008.

Aggiunte

Le aggiunte sono materiali inorganici finemente macinati che possono essere aggiunti alla miscela per modificarne le caratteristiche o ottenerne di speciali.

È ammesso l'utilizzo di ceneri volanti conformi alla norma UNI EN 450, sia ad integrazione dell'aggregato fine sia in sostituzione del cemento. La quantità in peso di ceneri da aggiungere, in sostituzione del cemento, per ottenere pari caratteristiche meccaniche, sarà stabilita con prove di laboratorio, nella fase di studio delle miscele e comunque non potrà superare il 40% del contenuto di cemento indicato in prima istanza.

Miscela

La miscela di aggregati (misto granulare) da adottarsi per la realizzazione del misto cementato deve avere una composizione granulometrica in grado di rispettare i requisiti capitolari richiesti, un esempio di fuso di riferimento è riportato in Tabella 1.4, tratto dalla normativa tecnica CNR BU 29/72.

Tabella 1.4 – Fuso granulometrico per gli aggregati utilizzati nel misto cementato [CNR BU 29/72]

UNI EN 903/1	mm	<i>Fuso A</i>	<i>Fuso B</i>
		<i>strade principali</i>	<i>Strade secondarie</i>
Passante (%)			
Setaccio	40	100	100
Setaccio	31,5	90 - 100	90 - 100
Setaccio	16	60 - 80	56 - 85
Setaccio	8	40 - 55	35 - 67
Setaccio	4	26 - 40	23 - 53
Setaccio	2	17 - 30	14 - 40
Setaccio	1	12 - 22	10 - 28
Setaccio	0,5	6 - 15	6 - 18
Setaccio	0,25	4 - 10	4 - 12
Setaccio	0,125	2 - 6	2 - 6
Setaccio	0,063	2 - 5	2 - 5

Il contenuto di cemento, delle eventuali ceneri volanti dosate in sostituzione del cemento stesso, ed il contenuto d'acqua della miscela, vanno espressi come

percentuale in peso rispetto al totale degli aggregati costituenti il misto granulare di base.

Tali percentuali saranno stabilite in base ad uno studio della miscela, effettuato in laboratorio, secondo quanto previsto ad esempio dalla norma CNR BU 29/72. In particolare, secondo tale normativa, la miscele adottate dovranno possedere i requisiti riportati nella Tabella 1.5.

Tabella 1.5 – Requisiti meccanici delle miscele

<i>Parametro</i>	<i>Normativa</i>	<i>Valore</i>
Resistenza a compressione a 7gg	CNR 29	$2.5 \leq R_c \leq 4.5 \text{ N/mm}^2$
Resistenza a trazione indiretta a 7gg (Prova Brasiliana)	CNR 97	$R_t \geq 0.25 \text{ N/mm}^2$

Per particolari casi è facoltà della Direzione Lavori accettare valori di resistenza a compressione fino a 7.5 N/mm^2 .

Nel caso in cui il misto cementato debba essere impiegato in zone in cui sussista il rischio di degrado per gelo-disgelo, è facoltà della Direzione Lavori richiedere che la miscela risponda ai requisiti della norma SN 640 59a.

1.2.2 Accettazione delle miscele

L'Impresa è tenuta a comunicare alla Direzione Lavori, con congruo anticipo rispetto all'inizio delle lavorazioni e per ciascun cantiere di produzione, la composizione delle miscele che intende adottare. Ciascuna composizione proposta deve essere corredata da una completa documentazione dello studio di composizione effettuato, che non dovrà essere più vecchio di un anno.

Una volta accettato da parte della Direzione Lavori lo studio delle miscele, l'Impresa deve rigorosamente attenersi ad esso.

Nella curva granulometrica sono ammessi variazioni delle singole percentuali per l'aggregato grosso di ± 5 punti e di ± 2 punti per l'aggregato fino.

In ogni caso non devono essere superati i limiti del fuso.

Per la percentuale di cemento nelle miscele è ammessa una variazione di $\pm 0.5\%$.

1.2.3 Confezionamento delle miscele

Il misto cementato deve essere confezionato mediante impianti fissi automatizzati, di idonee caratteristiche, mantenuti sempre perfettamente funzionanti in ogni loro parte.

L'impianto deve comunque garantire uniformità di produzione ed essere in grado di realizzare miscele rispondenti a quelle indicate nello studio presentato ai fini dell'accettazione.

La zona destinata allo stoccaggio degli aggregati deve essere preventivamente e convenientemente sistemata per evitare la presenza di sostanze argillose e ristagni di acqua che possano compromettere la pulizia degli aggregati. I cumuli delle diverse classi devono essere nettamente separati tra di loro e l'operazione di rifornimento nei pre-dosatori eseguita con la massima cura. Non è consentito il mescolamento di cementi diversi per tipo, classe di resistenza o provenienza. Il cemento e le aggiunte dovranno essere adeguatamente protetti dall'umidità atmosferica e dalle impurità.

1.2.4 Preparazione delle superfici di stesa

La miscela verrà stesa sul piano finito dello strato precedente dopo che sia stata accertata dalla Direzione Lavori la rispondenza di quest'ultimo ai requisiti prescritti. Ogni depressione, avvallamento o ormaia presente sul piano di posa deve essere corretta prima della stesa. Prima della stesa è inoltre necessario verificare che il piano di posa sia sufficientemente umido e, se necessario, provvedere alla sua bagnatura evitando tuttavia la formazione di una superficie fangosa.

1.2.5 Posa in opera delle miscele

La stesa verrà eseguita impiegando macchine finitrici. Il tempo massimo tra l'introduzione dell'acqua nella miscela del misto cementato e l'inizio della compattazione non dovrà superare i 60 minuti.

Le operazioni di compattazione dello strato devono essere realizzate preferibilmente con apparecchiature e sequenze adatte a produrre il grado di addensamento e le prestazioni richieste. La stesa della miscela non deve di norma essere eseguita con temperature ambiente inferiori a 0°C e mai sotto la pioggia.

Nel caso in cui le condizioni climatiche (temperatura, soleggiamento, ventilazione) comportino una elevata velocità di evaporazione, è necessario provvedere ad una adeguata protezione delle miscele sia durante il trasporto che durante la stesa.

Il tempo intercorrente tra la stesa di due strisce affiancate non deve superare di norma le due ore per garantire la continuità della struttura.

Particolari accorgimenti devono adottarsi nella formazione dei giunti longitudinali che andranno protetti con fogli di polietilene o materiale simile. Il giunto di ripresa deve essere ottenuto terminando la stesa dello strato a ridosso di una tavola e togliendo la tavola al momento della ripresa della stesa. Se non si fa uso della tavola si deve, prima della ripresa della stesa, provvedere a tagliare l'ultima parte dello strato precedente, in modo che si ottenga una parete perfettamente verticale. Non devono essere eseguiti altri giunti all'infuori di quelli di ripresa.

1.2.6 Protezione superficiale dello strato finito

Subito dopo il completamento delle lavorazioni di compattazione e finitura dello strato, deve essere applicato un velo protettivo di emulsione bituminosa in ragione di almeno 1,0 kg/m² (in relazione al tempo ed alla intensità del traffico di cantiere cui potrà venire sottoposto) e successivo spargimento di sabbia.

Il tempo di maturazione protetta non dovrà essere inferiore a 72 ore, durante le quali il misto cementato dovrà essere protetto dal gelo.

Il transito di cantiere potrà essere ammesso sullo strato a partire dal terzo giorno dopo quello in cui è stata effettuata la stesa e limitatamente ai mezzi gommati. Aperture anticipate sono consentite solo se previste nella determinazione della resistenza raggiunta dal misto cementato.

Strati eventualmente compromessi dalle condizioni meteorologiche o da altre cause imputabili all'Impresa devono essere rimossi e sostituiti a totale cura e spese dell'Impresa.

1.2.7 Controlli

Il controllo della qualità dei misti cementati e della loro posa in opera deve essere effettuato mediante prove di laboratorio sui materiali costituenti, sulla miscela prelevata allo stato fresco al momento della stesa, sulle carote estratte dalla pavimentazione e con prove in sito.

Un esempio di ubicazione dei prelievi e di frequenza delle prove sono indicati nella Tabella 1.6.

Le prove saranno eseguite da un laboratorio competente indicato dal Committente.

Il prelievo del misto cementato fresco avverrà in contraddittorio al momento della stesa. Sui campioni saranno effettuati i controlli della percentuale di cemento, della distribuzione granulometrica dell'aggregato; i valori misurati in sede di controllo dovranno essere conformi a quelli dichiarati nella documentazione presentata prima dell'inizio dei lavori. Per la determinazione del contenuto di cemento si farà riferimento alla norma UNI 6395. Inoltre con tale campionamento saranno confezionati in laboratorio opportuni provini al fine del controllo della resistenza a compressione e della resistenza a trazione indiretta dopo 3 e 7 giorni di maturazione.

Sullo strato finito saranno effettuati i controlli dello spessore, della densità in sito e della portanza.

Lo spessore dello strato verrà determinato, per ogni tratto omogeneo di stesa, facendo la media delle misure (quattro per ogni carota) rilevate dalle carote estratte dalla pavimentazione.

A compattazione ultimata la densità in sito, nel 95% dei prelievi, non deve essere inferiore al 98% del valore di riferimento (ottimo) misurato in laboratorio sulla miscela di progetto e dichiarato prima dell'inizio dei lavori. Le misure della densità sono effettuate secondo la norma CNR 22.

La misura della portanza viene determinata con prove di carico su piastra da 300 mm secondo ad esempio la norma CNR BU 146/92. Il Modulo di deformazione M_d deve risultare non inferiore a quanto prescritto dal Capitolato di riferimento o dal documento di prequalifica predisposto dall'Impresa esecutrice, a diversi tempi di maturazione.

Nella Tabella 1.6 vengono riportati come esempio le modalità e le frequenze dei controlli da eseguirsi durante la realizzazione di uno strato in misto cementato.

Tabella 1.6 – Controllo dei materiali e verifiche prestazionali

TIPO DI CAMPIONE	UBICAZIONE PRELIEVO	FREQUENZA PROVE	REQUISITI RICHIESTI
Aggregato grosso	Impianto	Settimanale oppure ogni 2500 m ³ di stesa	Riferimento Tabella 1.1
Aggregato fino	Impianto	Settimanale oppure ogni 2500 m ³ di stesa	Riferimento Tabella 1.2
Acqua	Impianto	Iniziale	Riferimento Par. 1.2.1
Cemento	Impianto	Iniziale	Riferimento Par. 1.2.1
Aggiunte	Impianto	Iniziale	Riferimento Par. 1.2.1
Misto cementato fresco	Vibrofinitrice	Giornaliera oppure ogni 5.000 m ² di stesa	Curva granulometrica di progetto; Contenuto di cemento
Carote per spessori	Pavimentazione	Ogni 100m di fascia di stesa	Spessore previsto in progetto
Strato finito (densità in sito)	Strato finito	Giornaliera oppure ogni 5.000 m ² di stesa	98% del valore risultante dallo studio della miscela
Strato finito (portanza) 7 giorni dopo la posa in opera	Strato finito o Pavimentazione	Ogni 100 m di fascia stesa	Prestazioni previste in progetto

1.3 Il riciclaggio e gli inerti da riciclo

Poiché il materiale studiato è composto totalmente da aggregati di riciclo provenienti dalla frantumazione e vagliatura di lastre armate in calcestruzzo di una pavimentazione aeroportuale e materiali in calcestruzzo di risulta da demolizioni, è necessario definire il significato del termine, le tecniche e le tecnologie di recupero, le normative vigenti e le caratteristiche prestazionali richieste in particolare per l'utilizzo all'interno di un misto cementato.

Il problema della gestione dei rifiuti è diventato sempre più di rilevanza nazionale e direttamente sotto gli occhi dei cittadini. La smodata crescita dei consumi e l'urbanizzazione degli ultimi decenni hanno da un lato aumentato moltissimo la produzione dei rifiuti e dall'altro ridotto le zone disabitate in cui trattare o depositare i rifiuti stessi. La società moderna oggi si trova quindi costretta a gestire una grande quantità di rifiuti in spazi sempre più limitati.

Se si indaga, in particolare, il riciclaggio nell'ambito delle costruzioni civili, un fattore di grande importanza riguarda l'utilizzo degli aggregati. Negli ultimi tempi, le problematiche ambientali hanno reso sempre più difficoltoso il prelievo da cava degli inerti per le costruzioni civili e, nel contempo, sempre più restrittiva la regolamentazione per la gestione delle discariche di rifiuti. Da alcuni anni si sta sperimentando di impiegare, in alternativa ai materiali tradizionali, i detriti di risulta delle demolizioni dei manufatti edilizi, la cui produzione annua in Italia può essere stimata in diverse decine di milioni di tonnellate [23]. L'utilizzo, previo adeguato trattamento, di tali scarti edilizi nell'ambito delle realizzazioni dell'ingegneria civile, può consentire benefici economici ed ambientali, indipendenza della minore necessità del loro trasporto a rifiuto, del minore impegno di spazi da destinare alle discariche autorizzate, e del notevole risparmio di materiali tradizionali di cava.

Quando si parla di materiali alternativi, generalmente si è portati a pensare ad aggregati con caratteristiche inferiori a quelle offerte dai materiali il cui uso sia ormai consueto e codificato. Spesso si tratta di materiali "fuori prescrizioni di norma", per i quali il recupero avviene mediante correzioni o stabilizzazioni, affinché si possano comunque raggiungere caratteristiche prestazionali, in genere modeste che ne consentono l'utilizzo, anche se non generalizzato. Nel

caso dei materiali di scarto edilizio, invece, se provenienti da idonei impianti di frantumazione, trattamento ed omogeneizzazione, le caratteristiche prestazionali sono per molti aspetti di gran lunga superiori a quelle dei migliori misti naturali ed i campi d'impiego quasi tutti quelli dei materiali sciolti da costruzione.

La non perfetta rispondenza ad alcune particolari prescrizioni di normativa, studiate emesse a punto per i materiali di cava deve essere valutata con obiettività cercando di giungere a conclusioni non preconcepite sulla possibilità di impiego di tali materiali, ed individuando, in particolare per gli usi più nobili, le opportune metodologie di posa in opera, cosicché si possano sfruttare al meglio le grandi possibilità di una ricchezza attualmente in gran parte non utilizzata.

Molto utile può allora rivelarsi la disponibilità di evidenze sperimentali sulle caratteristiche prestazionali e sulle procedure di preparazione e posa in opera dei misti granulari sciolti e dei conglomerati cementizi o bituminosi confezionati con materiali costituiti esclusivamente o parzialmente dagli scarti delle attività di demolizione o di produzione nel settore dell'edilizia e delle opere civili in genere.

1.3.1 I “rifiuti” edilizi

Nelle diverse fasi del processo edilizio vengono prodotti “rifiuti” o scarti in grande quantità. La demolizione di pareti o di rivestimenti degli appartamenti nel corso dell'attività di ristrutturazione è forse l'aspetto che più immediatamente sovviene alla memoria del comune cittadino, in relazione ai cumuli di macerie spesso incivilmente abbandonati abusivamente lungo strade e corsi d'acqua.

Le cause di tale scempio possono essere sintetizzate in 3 fattori principali:

- mancanza di controlli efficaci da parte delle autorità competenti;
- costi non trascurabili per lo smaltimento e il trasporto in discarica dei rifiuti;
- carenza nelle zone a maggiore densità abitativa di discariche autorizzate e/o di piattaforme per il recupero e il riciclo dei rifiuti.

Grandi quantità di rifiuti vengono però prodotti anche durante la costruzione, la ricostruzione, la demolizione e/o la decostruzione di edifici, murature, grandi strutture civili, palificazioni, fognature, sovrastrutture stradali. Regolari contributi di volumi di scarto provengono dalla fabbricazione o dalla prefabbricazione di elementi e componenti delle costruzioni civili (mattoni, piastrelle, pannelli, componenti strutturali, etc.).

È abbastanza evidente, ma è bene sottolinearlo con chiarezza, che sotto la denominazione di inerti di riciclo in edilizia, sono da comprendere tutti i materiali di rifiuto o scarto prodotti nei processi di realizzazione, di eliminazione e di trasformazione di opere nel campo dell'edilizia e delle opere civili, come ad esempio calcestruzzo (normale o precompresso), cemento e malte varie, conglomerati e misti bituminosi, ecc.

1.3.2 Sintesi aspetti normativi

Il D. Lgs. n° 22 del 5 febbraio 1997 considera i rifiuti inerti da costruzione e demolizione come rifiuti speciali da smaltire in discarica di II° categoria tipo 2A. Se invece di smaltire i rifiuti inerti non pericolosi in discarica, si decide di recuperarli, risulta che: "le attività di recupero di scarti nello stesso luogo di produzione non sono soggette a comunicazione ed autorizzazione perché non ricorre la condizione che il produttore se ne disfi o abbia l'obbligo di disfarsi" (art. 7). Il recupero di materiali inerti non pericolosi in opere complesse di ripristino ambientale è attività soggetta a comunicazione amministrativa (art.5 del 5 febbraio 1998). Tuttavia, anche se il decreto esonera dall'obbligo di autorizzazione le attività di recupero, nel luogo di produzione devono essere effettuate nel rispetto delle prescrizioni tecniche dettate dalle leggi per i rifiuti non pericolosi, garantendo la salvaguardia dell'ambiente, della salute dell'uomo e delle normali condizioni di sicurezza.

Se il recupero dei rifiuti inerti non pericolosi avviene presso impianti autorizzati, il rifiuto inerte, al termine di una serie di trattamenti finalizzati al raggiungimento degli standard merceologici e alla verifica della compatibilità ambientale, diventa MPS (materia prima secondaria), comparabile ad una materia prima e quindi esclusa dalle norme sui rifiuti.

1.3.3 Tecniche e tecnologie per il recupero e il riciclaggio dei rifiuti da costruzione e demolizione

Demolizione selettiva

La separazione all'origine richiede l'ausilio di tecniche di decostruzione che sono indicate con il termine generale di demolizione selettiva: si tratta di un processo di disassemblaggio che, in genere, avviene in fase inversa alle operazioni di costruzione. Lo scopo della decostruzione è quello di aumentare il livello di riciclabilità degli scarti generati sul cantiere di demolizione secondo un approccio che privilegia l'aspetto della qualità del materiale ottenibile dal riciclaggio. Alla demolizione tradizionale con il conferimento delle macerie in discarica si sostituisce la demolizione selettiva che consente un recupero in percentuali elevate dei materiali attraverso tecniche in grado di separare le diverse frazioni omogenee per poterle, successivamente, inviare a idonei trattamenti di valorizzazione.

Demolizione controllata

In alternativa alla separazione all'origine si può ricorrere al trattamento del rifiuto, raccolto alla rinfusa, in impianti appositamente realizzati. L'impiantistica in oggetto è stata caratterizzata, negli ultimi anni, da un notevole sviluppo tecnologico, portando a realizzazioni tali da rendere possibili l'adduzione di rifiuti indifferenziati ottenendo in uscita almeno tre categorie merceologiche differenti:

- inerti lapidei di caratteristiche granulometriche predefinite, mediante sistemi di frantumazione, deferrizzazione e vagliatura ormai ampiamente testati;
- materiale metallico separato dalle macerie mediante l'utilizzo di adeguati separatori magnetici;
- frazione leggera costituita in prevalenza da materiale ad elevato potere calorifico (carta, legno, plastica) ottenuta mediante varie tipologie di sistemi (si passa, infatti, dalla separazione manuale, a sistemi di aspirazione e ventilazione, per arrivare ad ingegnosi sistemi di separazione per flottazione).

1.3.4 Requisiti generali

Di tutta questa molteplicità di materiali, spesso associati in modo caotico nei cumuli o sui mezzi utilizzati per il trasporto alle discariche, possono essere propriamente definiti “inerti”, idonei al reimpiego nel campo delle costruzioni civili come aggregati sciolti o legati, solamente quelli che non producano effetti negativi né dal punto di vista dell’efficienza delle parti in cui vengono reimpiegati, né dal punto di vista dei possibili rilasci di sostanze inquinanti. Gli inerti di riciclo possono essere così suddivisi in due principali sottoclassi:

1 - calcestruzzo:

- calcestruzzi armati e non;
- scarti dell’industria dei manufatti in cemento;
- scarti della prefabbricazione civile.

2 - macerie:

- inerti di risulta dalle demolizioni (laterizi, piastrelle, etc.)
- scarti dell’industria delle ceramiche e dei laterizi
- elementi di c.a. non selezionati per il “calcestruzzo”
- frammenti di pavimentazioni stradali
- sfridi di materiali lapidei provenienti da scavi.

Il primo tipo di aggregato, previa eliminazione delle barre di armatura, può essere considerato di qualità più elevata, perché costituito dalla malta cementizia e dagli inerti di cava originariamente selezionati per la composizione del calcestruzzo. Le macerie invece risultano costituite da elementi eterogenei, cioè di natura molto diversa; in pratica, possono essere considerate come il risultato finale di una demolizione non selettiva.

Per essere convenientemente avviato al reimpiego, il materiale deve essere sottoposto ad un “trattamento”, ovvero una serie di operazioni che possono essere sinteticamente intese come processi successivi di selezione, frantumazione, deferrizzazione, asportazione di materiali leggeri, omogeneizzazione del prodotto finale.

Poiché notevoli sono i rischi di cattiva esecuzione delle diverse fasi di riqualificazione del materiale, si deve far ricorso ad una tecnologia evoluta,

possibilmente controllata in modo automatico. E' pertanto necessario che, per garantire un riutilizzo privo di problemi, l'"inerte" provenga da appositi impianti di frantumazione e trattamento, grazie ai quali è possibile eliminare le sostanze estranee od inquinanti, come i metalli, la plastica, la carta, il legno e tutti gli altri elementi non idonei.

Condizioni prioritarie per esprimere valutazioni attendibili sul comportamento in esercizio sono inoltre l'omogeneità statistica e la costanza della composizione e della curva granulometrica. Allo stato dell'arte, gli impianti, in particolare quelli fissi, sono in grado di realizzare un'apprezzabile costanza di composizione del prodotto. Ad essa si può tendere mediante l'adozione di speciali procedure di estrazione dai cumuli, che permettono di ottenere una certa qual "miscelazione" di apporti differenziati, ricercandosi in sostanza la massima "eterogeneità" di costituzione mineralogica e petrografica, a garanzia dell'auspicata "costanza" del comportamento prestazionale.

E' possibile però che, a causa di conferimenti consistenti di materiale della stessa provenienza, concentrati in poco tempo, il prodotto finale si presenti molto "omogeneo" dal punto di vista costitutivo (ad esempio tutto tufo o tutto laterizio), scostandosi così da quella che potrebbe essere una media di riferimento.

L'inconveniente può verificarsi quando la frantumazione viene effettuata, come di norma avviene negli impianti mobili, senza adottare le necessarie precauzioni nel prelievo dai cumuli: rivolte ad ottenere una miscelazione preventiva.

La vulnerabilità nel tempo della curva granulometrica, che dipende principalmente dalla tipologia e dalla regolazione dell'impianto di frantumazione, può essere verificata mediante prelievi a cadenze regolari integrate da controlli casuali.

1.3.5 Requisiti prestazionali in base alla destinazione d'impiego

Per valutare se le caratteristiche dei materiali da riciclo, trattati ed identificati come detto nel paragrafo precedente, siano idonee ai loro diversi possibili impieghi, occorre riferirsi specificamente alle necessità prestazionali richieste da

ciascuna applicazione, di solito tradotte in prescrizioni e criteri di accettazione da norme di legge o di buona pratica tecnica.

In Italia si deve far riferimento alle norme nazionali, che costituiscono un corpus ormai consolidato ed alle norme europee, che sono in corso di definizione per i diversi ambiti costruttivi.

Per i materiali di riciclo è in primo luogo possibile verificare se essi risultano pienamente rispondenti alle dette normative. In tal caso il loro utilizzo è completamente equiparabile dal punto di vista tecnico, a quello dei corrispondenti materiali naturali.

Si noti peraltro che non sussiste alcun valido motivo per scartare a priori un materiale, naturale od artificiale, il quale, benché non totalmente rispondente alle prescrizioni della normativa, sia però in grado di garantire la funzionalità e la curabilità dell'opera cui sia destinato.

Al termine “materiali marginali o alternativi o non tradizionali” si può dare la seguente definizione: “qualsiasi materiale non completamente conforme alle prescrizioni in vigore in un paese o in una regione per i materiali stradali normali: ma che può essere usato con successo in relazione a particolari condizioni climatiche o grazie ai progressi tecnici, ovvero dopo aver subito idoneo trattamento”.

Si deve sottolineare che il concetto di marginalità è legato ad una certa epoca o luogo o modalità di impiego. Sta quindi nell'intelligenza del tecnico applicare dei criteri consolidati, ma anche utilizzare tutti i materiali effettivamente disponibili, allo scopo di minimizzare i costi monetari ed energetici delle opere.

Anche in questa luce si analizzeranno di seguito alcuni aspetti specifici dell'impiego di materiali di scarto edilizio.

1.3.6 Gli impieghi e le verifiche di idoneità

Per il materiale opportunamente trattato, si può pensare ad una molteplicità di utilizzi nell'ambito delle costruzioni in terra in genere, delle costruzioni stradali, ferroviarie ed aeroportuali, delle costruzioni civili (magroni e calcestruzzi armati o non), della prefabbricazione (elementi strutturali e di arredo stradale od

ambientale) contemplando tutti i gradi di passaggio dagli aggregati non legati, ai misti legati, ai calcestruzzi ed ai conglomerati bituminosi.

Per ognuno di questi impieghi occorre garantire che la realizzazione corrisponda a determinati requisiti, sotto i diversi aspetti della funzionalità, della durabilità e della pratica fattibilità.

1.3.7 Misto granulare o cementato per strati di fondazione

Per lo strato di fondazione stradale, chiamato ad assolvere funzioni più gravose, in considerazione della posizione più ravvicinata al punto di applicazione dei carichi, devono essere adottati criteri di selezione più restrittivi. Tale strato deve, infatti, fornire appoggio stabile e sufficientemente rigido ed indeformabile agli strati superiori, nonché impedire la risalita capillare dell'acqua e l'inquinamento con materiale fino. Riguardo al sottofondo deve consentire buon drenaggio ed aerazione; nei periodi di gelo il misto granulare o cementato assolve, inoltre, alla funzione di strato coibente, se costituito di materiale adatto, o quantomeno allontana l'isoterma zero dal sottofondo o ne riduce il tempo di influenza.

La norma CNR-UNI 10006 per i materiali del tipo I (duri e tenaci), prescrive pertanto che vadano rispettate condizioni precise riguardo alla composizione granulometrica (curva rientrante in un fuso stabilito), alla forma dei grani, alla sensibilità all'acqua ed al gelo, ed infine alle caratteristiche di resistenza e di indeformabilità (carico su piastra).

È previsto anche l'uso di materiali teneri, per i quali l'aggregato grosso e medio è costituito da elementi che, per effetto del costipamento, si frantumano, assumendo, dopo la posa in opera, un assetto granulometrico diverso da quello iniziale, quali ghiaie e brecce calcaree tenere, detriti di arenarie e di tufi, calcinacci, ceneri vulcaniche, tufine, pozzolane etc.. L'impiego dei misti teneri è subordinato all'accertamento della loro idoneità, da condursi mediante opportune prove, in laboratorio ed in sito.

In molti casi i materiali di scarto edilizio evidenziano caratteristiche che soddisfano i requisiti richiesti, mentre in altri se ne discostano per alcuni aspetti.

1.4 Le fibre

Con l'intento di migliorare le caratteristiche meccaniche di misti cementati confezionati con aggregati di riciclo, negli anni sono state sperimentate delle miscele con l'aggiunta di notevoli differenti tipologie di fibre, da quelle in acciaio a quelle sintetiche, da fibre naturali a quelle in vetro. Di seguito verranno riproposti i benefici e gli svantaggi risultanti dall'utilizzo delle fibre ed un'analisi delle proprietà delle principali tipologie di fibre adottate e il loro effetti. In particolare, saranno trattati gli effetti riscontrati dall'utilizzo di fibre polipropilene, che sono quelle utilizzate per il rinforzo del misto cementato in questa tesi. La descrizione degli effetti delle fibre sarà valutata all'interno del calcestruzzo, ma tali risultati non sono lontani da quelli che possono essere raggiunti dal loro utilizzo in miscele di misto cementato, che è anch'esso un materiale legato a cemento, sebbene la quantità di quest'ultimo all'interno della miscela sia notevolmente inferiore e le prescrizioni sui materiali costituenti siano meno restrittive.

1.4.1 Vantaggi dell'utilizzo di fibre

Negli ultimi decenni, i principali elementi in calcestruzzo, strutturali e non, sono stati rinforzati con le fibre in parziale o totale sostituzione dei rinforzi convenzionali. I principali vantaggi derivanti dall'aggiunta di fibre alla miscela sono di tipo costruttivi e strutturali. I primi si concretizzano in una possibile eliminazione dei rinforzi convenzionali, in una riduzione delle lavorazioni e dei controlli sul prodotto finito, nonché in una distribuzione corretta e omogenea dei rinforzi all'interno del materiale. I vantaggi strutturali rappresentano la caratteristica principale dell'utilizzo di fibre e si traducono in[26]:

- incremento delle caratteristiche meccaniche, in particolare per quanto riguarda la resistenza a fatica. Tale caratteristica è influenzata da alcuni fattori legati alle fibre quali le caratteristiche meccaniche, il dosaggio, il rapporto di aspetto, la geometria e l'aderenza fibra-matrice cementizia;
- riduzione dell'ampiezza delle fessurazioni da ritiro;
- aumento della vita utile del materiale.

Le fibre sono tipicamente aggiunte al calcestruzzo con un basso dosaggio in volume (spesso inferiore all'1%), e hanno mostrato di essere efficaci nella riduzione delle fessurazioni da ritiro plastico. Generalmente le fibre non alterano in modo significativo il libero ritiro del calcestruzzo nei primi giorni di idratazione, tuttavia, ad alti dosaggi, possono aumentare la resistenza alla fessurazione nel tempo e ridurre l'ampiezza delle fessure [28].

Un aspetto che deve essere studiato con attenzione è la distribuzione delle fibre all'interno del materiale. Molte fibre sono localizzate in modo inefficace per resistere a tensioni di trazione derivanti dai carichi applicati, quindi agendo sul mix design e sul metodo di confezionamento, è possibile garantire il requisito di omogeneità della dispersione delle fibre.

Inoltre, si è osservato che molte fibre si posizionano con angoli di 90° in corrispondenza delle fessurazioni e possono avere una lunghezza di ancoraggio minore rispetto a quella necessaria per lo sviluppo di un adeguato collegamento con la pasta cementizia. Pertanto, solo una piccola percentuale della massa fibrosa può essere efficace nel resistere alle sollecitazioni di trazione o flessione [24]. Può essere definito un "rapporto di aspetto" (λ) come rapporto tra la lunghezza media delle fibre (L) e il loro diametro equivalente (D_e):

$$\lambda = L/D_e$$

questo rapporto e la geometria delle fibre sono due caratteristiche fondamentali a cui far riferimento per migliorare la capacità di ancoraggio e quindi le caratteristiche di resistenza del materiale. In aggiunta, da analisi effettuate [26], si è riscontrato che per un λ più alto, ottenuto riducendo il diametro equivalente delle fibre a parità di lunghezza:

- a parità di dosaggio, la superficie delle fibre aumenta;
- si ottiene lo stesso numero di fibre con un dosaggio teorico minore (Figura 1.6), ma lo sforzo di trazione sulla fibra cresce in modo esponenziale;
- a parità di dosaggio, si ottiene un numero di fibre più alto (Figura 1.6), ma la lavorabilità diventa problematica.

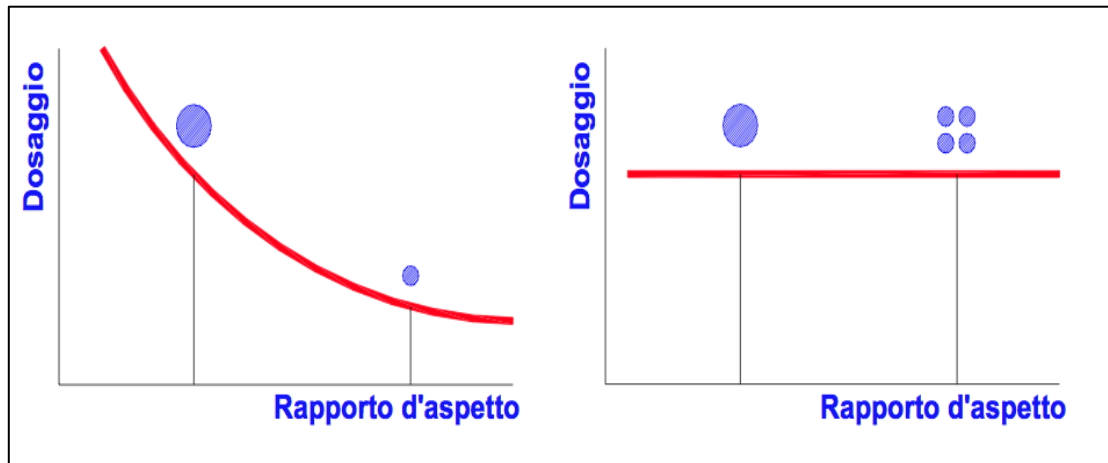


Figura 1.6 – Relazione tra rapporto d'aspetto e dosaggio delle fibre

Quindi, per poter definire un dosaggio corretto di fibre da aggiungere alla miscela bisogna conoscere i seguenti parametri caratteristici delle fibre utilizzate: lunghezza (L), diametro equivalente (D_e), rapporto d'aspetto (λ), resistenza a trazione (R_i), forma, processo produttivo e composizione chimica, rivestimento superficiale, allungamento a rottura (ϵ) e modulo elastico (E).

Noti questi parametri è possibile determinare un mix design corretto, tale da ottimizzare le prestazioni del materiale in termini di: lavorabilità, resistenza alla fessurazione da ritiro, sviluppo della resistenza alle brevi stagionature e resistenza alla fatica.

Prima della breve descrizione di alcune fibre utilizzate ed entrando più nel dettaglio in merito alle fibre polipropileniche, di interesse per questa tesi, si riportano in Figura 1.7e in Tabella 1.7 le immagini e le caratteristiche di alcune tra le principali fibre di rinforzo utilizzate nel calcestruzzo.



Figura 1.7- Esempi di fibre di rinforzo [26]

Tabella 1.7 - Parametri di alcune tipologie di fibre [24]

Fiber type	Relative density (specific gravity)	Diameter, μm (0.001 in.)	Tensile strength, MPa (ksi)	Modulus of elasticity, MPa (ksi)	Strain at failure, %
Steel	7.80	100-1000 (4-40)	500-2600 (70-380)	210,000 (30,000)	0.5-3.5
Glass					
E	2.54	8-15 (0.3-0.6)	2000-4000 (290-580)	72,000 (10,400)	3.0-4.8
AR	2.70	12-20 (0.5-0.8)	1500-3700 (220-540)	80,000 (11,600)	2.5-3.6
Synthetic					
Acrylic	1.18	5-17 (0.2-0.7)	200-1000 (30-145)	17,000-19,000 (2,500-2,800)	28-50
Aramid	1.44	10-12 (0.4-0.47)	2000-3100 (300-450)	62,000-120,000 (9,000-17,000)	2-3.5
Carbon	1.90	8-0 (0.3-0.35)	1800-2600 (260-380)	230,000-380,000 (33,400-55,100)	0.5-1.5
Nylon	1.14	23 (0.9)	1000 (140)	5,200 (750)	20
Polyester	1.38	10-80 (0.4-3.0)	280-1200 (40-170)	10,000-18,000 (1,500-2,500)	10-50
Polyethylene	0.96	25-1000 (1-40)	80-600 (11-85)	5,000 (725)	12-100
Polypropylene	0.90	20-200 (0.8-8)	450-700 (65-100)	3,500-5,200 (500-750)	6-15
Natural					
Wood cellulose	1.50	25-125 (1-5)	350-2000 (51-290)	10,000-40,000 (1,500-5,800)	
Sisal			280-600 (40-85)	13,000-25,000 (1,900-3,800)	3.5
Coconut	1.12-1.15	100-400 (4-16)	120-200 (17-29)	19,000-25,000 (2,800-3,800)	10-25
Bamboo	1.50	50-400 (2-16)	350-500 (51-73)	33,000-40,000 (4,800-5,800)	
Jute	1.02-1.04	100-200 (4-8)	250-350 (36-51)	25,000-32,000 (3,800-4,600)	1.5-1.9
Elephant grass		425 (17)	180 (26)	4,900 (710)	3.6

1.4.2 Tipologie e proprietà

Fibre d'acciaio

Le fibre d'acciaio hanno una lunghezza limitata con un rapporto tra lunghezza e diametro pari a circa 20 – 100. Alcune fibre di acciaio con gli estremi ad uncino migliorano la loro capacità di ancoraggio, aumentando in questo modo la resistenza al ritiro di un materiale legato a cemento.

Si hanno diverse tipologie di fibre metalliche caratterizzate da differenti metodi di fabbricazione e svariate geometrie.

La percentuale di fibre in acciaio utilizzate all'interno del calcestruzzo è variabile dallo 0,25% al 2%. I volumi superiori al 2% in generale portano ad una riduzione della lavorabilità e ad una dispersione delle fibre tale da richiedere uno speciale mix design e specifiche tecniche di getto.

La resistenza a compressione del calcestruzzo è solo leggermente influenzata dalla presenza di questa tipologia di fibra, ma l'aggiunta di una percentuale di fibre pari all'1,5% in volume può aumentare la resistenza a trazione diretta fino al 40% e la resistenza alla flessione fino al 150%.

Le fibre in acciaio non influiscono sul libero ritiro tipico della fase di idratazione successive alla messa in opera, ma ritardano la frattura del calcestruzzo durante le fasi di ritiro e migliorandola resistenza agli sforzi dovuti al fenomeno del rilassamento (creep)[27].

L'aggiunta di fibre non porta evidenti effetti migliorativi in merito al fenomeno del gelo-disgelo.

Se la miscela è correttamente progettata la corrosione delle fibre è poca o nulla, in quanto le fibre sono protette dalla corrosione grazie all'ambiente alcalino della matrice cementizia in cui sono immersi [39].

Nella scelta della tipologia di fibra da adottare, devono essere tenute in considerazione delle caratteristiche rilevanti tipiche delle fibre metalliche, in particolare l'elevato modulo di elasticità e la buona adesione tra fibre e matrice cementizia, che può essere rinforzata con mezzi meccanici di ancoraggio o grazie ad un aumento della rugosità della superficie (Figura 1.8).

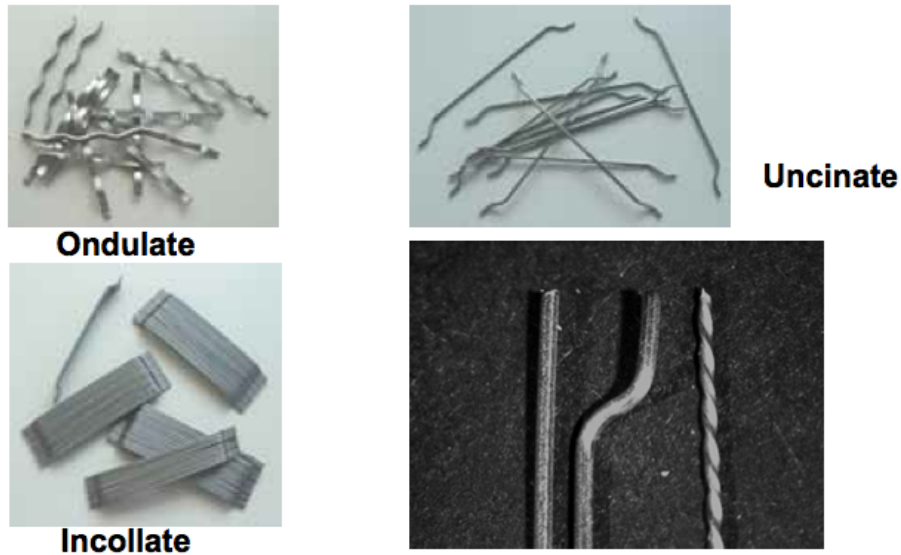


Figura 1.8- Esempi di fibre metalliche

Per quanto detto, le fibre di acciaio come rinforzo per il misto cementato, sebbene potrebbero essere una soluzione apprezzabile per il miglioramento delle prestazioni in ambito stradale, non possono però essere utilizzate come rinforzo negli strati di misto cementato in contesti più delicati come quelli aeroportuali dove potrebbero subire una magnetizzazione e influire negativamente sui sofisticati apparati di sicurezza e gestione del traffico aereo ivi presenti.

Fibre di vetro

La prima ricerca effettuata in merito all'utilizzo delle fibre di vetro nel calcestruzzo risale ai primi anni Sessanta. I test mostrarono che la reattività alcalina di alcune tipologie di fibre con la pasta cementizia portava ad una riduzione della resistenza. La continua ricerca ha portato alla diffusione di fibre di vetro alcalo-resistenti che, sebbene da una parte apportano un miglioramento alla durabilità del materiale, dall'altra causano una riduzione delle prestazioni meccaniche del calcestruzzo. La reattività alcalina e l'idratazione del cemento sono le basi per le due teorie, di seguito riportate, che cercano di spiegare questa diminuzione di resistenza e duttilità del calcestruzzo rinforzato con fibre di vetro [24]:

- l'attacco degli alcali sulla superficie delle fibre di vetro, ne riduce la resistenza a trazione;
- l'idratazione del cemento causa la penetrazione di particelle di idrossido di calcio all'interno delle fibre, le quali subiscono una riduzione della loro duttilità e una conseguente diminuzione della resistenza a trazione.

I vantaggi dell'impiego delle fibre di vetro nel calcestruzzo sono dovuti al fatto che sono inorganiche e incombustibili e le superfici finali del manufatto rimangono lisce con densità tale da limitare il passaggio dell'acqua.

Poiché lo scopo finale dell'aggiunta di fibre all'interno del misto cementato indagato in questa tesi è quello di ottenere un aumento delle prestazioni meccaniche del materiale, in particolare della resistenza a trazione, l'utilizzo di queste fibre non è consigliato.

Fibre naturali

Le fibre naturali sono state utilizzate come forma di rinforzo ancor prima dell'avvento del cemento armato tradizionale. I mattoni di fango rinforzati con paglia è solo una dei tanti esempi di come le fibre naturali sono state utilizzate da tempo come forma di rinforzo.

Anche se i calcestruzzi realizzati con l'aggiunta di fibre naturali mostrano buone proprietà meccaniche, hanno delle carenze in termini di durabilità. Molte delle fibre naturali sono altamente suscettibili alle variazioni di volume dovute alle variazioni dell'umidità contenuta nelle fibre, e ciò comporta una drastica riduzione dell'adesione tra fibra e matrice cementizia.

Le fibre di cellulosa di legno hanno proprietà meccaniche relativamente buone rispetto a molte fibre sintetiche, raggiungendo una resistenza a trazione anche dell'ordine dei 2000 MPa, ma le caratteristiche finali di queste fibre sono fortemente influenzate dal metodo di produzione.

Poiché una delle caratteristiche necessarie per un buon misto cementato fibro-rinforzato in ambito aeroportuale è la durabilità, l'utilizzo di fibre naturali non risulta essere la soluzione ottimale.

1.4.3 Fibre sintetiche

Le fibre sintetiche sono il risultato di attività di ricerca e sviluppo nell'ambito petrolchimico e tessile. I tipi di fibre che sono utilizzate all'interno del calcestruzzo sono: acrilico, carbonio, nylon, poliestere, polietilene e polipropilene.

Alcune delle principali caratteristiche di queste fibre sono: la capacità di controllare la fessurazione da ritiro, miglioramento della resistenza al fuoco e riduzione dell'ampiezza delle fessure.

Le problematiche connesse all'utilizzo di questa tipologia di fibre possono essere: una bassa adesione tra fibre e matrice cementizia, un incremento marginale delle prestazioni per piccole aggiunte di fibre, un basso modulo di elasticità per le fibre in polipropilene ed un alto costo delle fibre in carbonio [24].

Le fibre polipropileniche

Le fibre polipropileniche sono le fibre più utilizzate in quanto sono caratterizzate dalle seguenti proprietà:

- bassa densità, la minore tra tutte le fibre impiegate;
- chimicamente inerti, resistenti quindi agli acidi e alle basi anche in condizioni piuttosto drastiche di temperatura e concentrazione;
- completa insensibilità all'azione dell'acqua, da cui deriva che le proprietà del materiale asciutto sono uguali a quelle del materiale bagnato;
- ottimale dispersione all'interno della pasta cementizia;
- controllo della fessurazione da ritiro;
- riduzione dell'ampiezza delle fessurazioni;
- miglioramento della resistenza al fuoco;
- modesta aderenza e modulo elastico, migliorabili con opportuni accorgimenti riguardanti le caratteristiche fisico-chimiche e le modalità di produzione.

Esse possono essere prodotte come monofilamento cilindrico continuo che può essere tagliato alla lunghezza voluta, oppure fibrillate, ovvero realizzate mediante uno schema a “rete”, con sezione trasversale rettangolare (Figura 1.9).



Figura 1.9 – Fibre polipropileniche a sezione rettangolare

Se vengono aggiunte alla miscela con una percentuale di almeno lo 0,1% in volume di calcestruzzo, le fibre polipropileniche portano notevoli vantaggi in termini di riduzione delle fessurazioni da ritiro ed una riduzione dell'ampiezza delle fessure [29].

Un'ulteriore importante caratteristica di queste fibre è la loro capacità di “trattenere” l'acqua nel calcestruzzo, in quanto, sebbene il polipropilene è un materiale che, come detto, è idrofobo, la notevole quantità di filamenti presenti, in particolar modo se si tratta di fibre fibrillate, riducono notevolmente la fuoriuscita dell'acqua dal calcestruzzo per un lungo periodo di tempo, promuovendo l'idratazione del cemento e riducendo la sudorazione [30].

Nuovi sviluppi dimostrano che delle innovative fibre monofilamento sono in grado di fibrillare durante la miscelazione producendo numerose fibrille alle estremità del filamento che, rispetto alle fibre classiche monofilo, migliorano l'adesione tra fibra e pasta cementizia e aumentano la tenacità del materiale [25]. Oltre ad essere utilizzate come rinforzo nei calcestruzzi, le fibre polipropileniche sono state sperimentate anche come aggiunta nei terreni stabilizzati a cemento

per fondazioni o sottofondi stradali, al fine di incrementarne la coesione e quindi le prestazioni. I risultati di queste sperimentazioni hanno dato esiti positivi, in termini di miglioramento della resistenza a trazione e di incremento degli indici di rigidità. [3][4][5].

Recenti studi in merito all'aggiunta di fibre polipropilene fibrillate [2], come rinforzo ad un misto cementato utilizzato in ambito aeroportuale, hanno dimostrato che per un dosaggio di fibre in ragione di 1kg/m^3 di materiale finito si è ottenuto, rispetto alla miscela di riferimento senza fibre:

- un leggero miglioramento dell'autoaddensamento;
- una leggera diminuzione della lavorabilità;
- un aumento, del 5-10%, della resistenza a compressione;
- un incremento della resistenza a trazione indiretta.

La stessa campagna di indagine ha dimostrato che, a parità di lunghezza delle fibre e di dosaggio in aggiunta alla miscela di riferimento, le fibre di tipo polipropilene fibrillato hanno dato risultati migliori, in termini di prestazioni meccaniche e di addensamento della miscela, rispetto alle fibre poliolefine.

In ragione di quanto detto finora, le fibre sintetiche e, in special modo, quelle polipropilene fibrillate, grazie alle loro proprietà, sono quelle che suscitano maggiore interesse come aggiunta ad un misto cementato utilizzato per pavimentazioni aeroportuali.

Capitolo 2

Materiali e piano sperimentale

Questo capitolo contiene tutta la parte di descrizione del materiale utilizzato e il piano sperimentale seguito per l'analisi del materiale predetto sia in laboratorio che in situ.

Poiché lo scopo di questa tesi è quello di caratterizzare il misto cementato con aggiunta di fibre, si è deciso di confrontare i dati risultanti con quelli ottenuti dall'analisi di una miscela identica a meno dell'aggiunta di fibre. I materiali utilizzati e le ricette per il confezionamento di entrambe le miscele saranno quindi i medesimi.

Ad un'iniziale descrizione del tipo di aggregati utilizzati, fresato da lastra e materiale di risulta frantumato, seguirà una descrizione particolareggiata della tipologia di fibre aggiunte alla miscela per ottenere il misto cementato fibro-rinforzato e delle sue caratteristiche salienti.

Successivamente si illustrerà il piano sperimentale seguito, in particolare si descriverà il processo che ha portato alla caratterizzazione e alla verifica del materiale oggetto di analisi in questa tesi, in termini di valutazioni di tipo prestazionale conseguenti ad analisi di laboratorio e prove in situ. Più nel dettaglio, verranno descritte le metodologie di indagine seguite sia in laboratorio che in situ con una descrizione degli strumenti utilizzati e dei dati da essi acquisiti.

2.1 Materiali costituenti e loro qualificazione

Il misto cementato è costituito da una miscela di aggregati lapidei di primo impiego o di riciclo (misto granulare), trattata con un legante idraulico (cemento). La miscela deve assumere, dopo un adeguato tempo di stagionatura, una resistenza meccanica durevole ed apprezzabile mediante prove eseguibili su provini di forma normata.

I componenti della miscela utilizzata e l'ottimizzazione delle percentuali di dosaggio sono il risultato di precedenti attività sperimentale di ricerca [2][10]. Questa miscela ottimale, denominata misto cementato fibro-rinforzato o MCF, sarà la base per tutte le attività di verifica che verranno proposte in questa tesi.

Poiché si è voluto non solo verificare le prestazioni del materiale oggetto di studio, ma anche dimostrare il miglioramento delle sue caratteristiche dovuto all'utilizzo di fibre in polipropilene, si sono confezionate due miscele, la prima di misto cementato fibro-rinforzato (MCF), la seconda di misto cementato di identica composizione a meno della presenza delle fibre (MC).

In particolare, per entrambe le miscele, la frazione lapidea risulta costituita per 2/3 da materiale derivante da un processo di fresatura, pulizia e vagliatura di calcestruzzo proveniente dalla demolizione di lastre aeroportuali e per 1/3 da materiali di risulta provenienti dalla riqualifica di scarti da demolizione di elementi in calcestruzzo.

Il contenuto di cemento, delle aggiunte, ed il contenuto d'acqua della miscela, sono espressi come percentuale in peso rispetto al peso totale secco degli aggregati costituenti.

La ricetta della miscela è riportata in Tabella 2.1, in cui appaiono i materiali costituenti la miscela e le rispettive percentuali di impiego.

Tabella 2.1 – Costituenti della miscela di misto cementato con fibre

MATERIALE	%
Fresato da lastra di calcestruzzo	66,6
Materiale di riciclo frantumato	33,3
Acqua	9,0
Cemento	4,0

Il misto cementato fibro-rinforzato ha in aggiunta una quantità di fibre pari a 0,04% in peso rispetto alla frazione lapidea secca. Le caratteristiche di tali fibre saranno meglio descritte nel seguito.

Infine, è importante evidenziare il fatto che l'aggiunta di cemento in proporzione all'acqua ha un valore decisamente modesto. Questo porterebbe a pensare che la miscela risultante non possa raggiungere prestazioni meccaniche soddisfacenti [2] a causa di un rapporto acqua/cemento decisamente alto; si deve però considerare che la totalità degli aggregati è composto da materiale derivante dalla fresatura e dalla frantumazione di materiali in calcestruzzo, quindi ricche di cemento che, come noto dalla letteratura [11], contiene dei componenti che partecipano alla reazione di idratazione in tempi molto lunghi e che, quindi, possiedono, al momento del loro utilizzo nella miscela, una residua capacità di idratazione, che andrà a partecipare all'incremento delle caratteristiche meccaniche del materiale. Inoltre, lo stesso calcestruzzo è un materiale fortemente poroso che quindi tende ad assorbire acqua, sottraendola alle sue funzioni principali di idratazione del cemento e di lubrificazione del composto per permettere l'idonea lavorabilità nelle fasi di stesa e compattazione.

Aggregati

Gli aggregati sono gli elementi grazie alla miscelazione dei quali si ottiene lo scheletro solido del misto cementato.

Gli aggregati utilizzati provengono completamente da materiale di risulta: fresato di lastre in cemento armato di una pavimentazione aeroportuale (Figura 2.1 – a) e frantumato di materiali di risulta provenienti dalla riqualifica di scarti di demolizione in calcestruzzo (Figura 2.1– b). Si è, quindi, resa necessaria una caratterizzazione di laboratorio del materiale per mezzo di un'analisi granulometrica di due campioni, uno per ciascun materiale, più un'analisi realizzata su un materiale costituito per il 66% da fresato e per il 33% da frantumato.

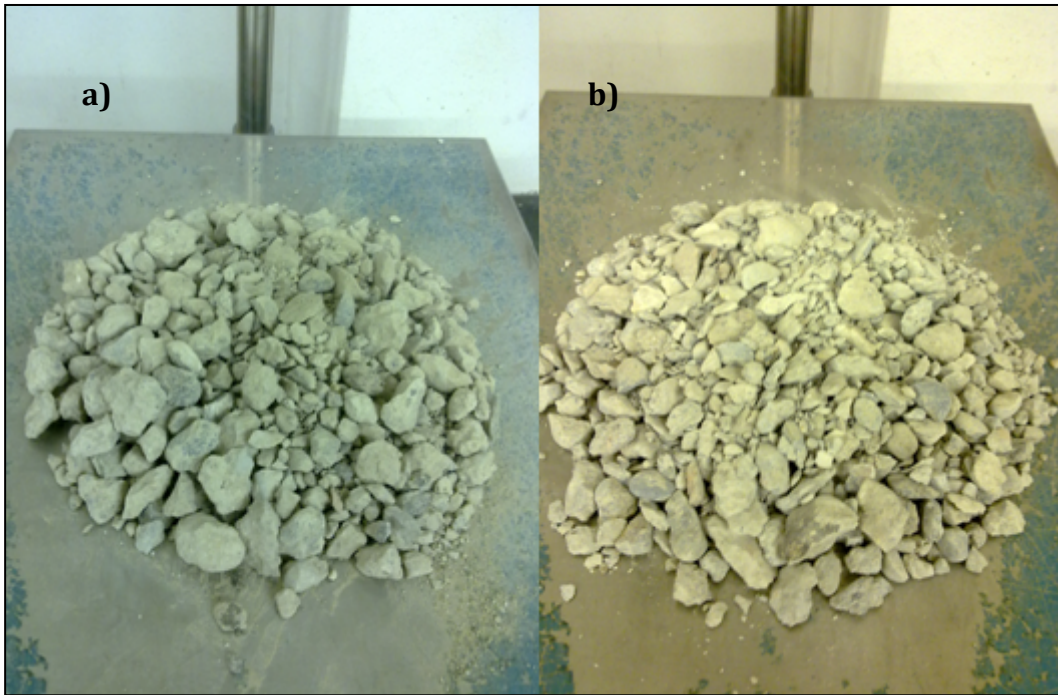


Figura 2.1- fresato di lastra (a) - frantumato di calcestruzzo (b)

I valori, ottenuti dall'analisi, rappresentano il passante/trattenuto ai setacci ISO 3310-1 e ISO 3310-2 secondo la normativa UNI EN 933-1. I dati vengono riportati:

- Tabella 2.2 e Figura 2.2: analisi di 100% fresato di lastra di calcestruzzo;
- Tabella 2.3 e Figura 2.3: analisi di 100% frantumato di materiali di risulta in calcestruzzo;
- Tabella 2.4 e Figura 2.4: analisi dell'aggregato utilizzato nella miscela composto per il 66% da fresato e per il 33% da frantumato.

Osservando i dati relativi all'aggregato utilizzato, si può notare come circa il 40% degli aggregati sia di medie/grandi dimensioni, comprese tra i 2 e i 16 mm di diametro massimo e solo l'8% ha un diametro superiore ai 31,5 mm.

Tabella 2.2 - Frazioni granulometriche 100% fresato di lastra

		100% FRESATO DI LASTRA			
		Apertura	Trattenuto	Passante	Passante
		[mm]	[g]	[g]	[%]
SETACCI ISO 3310-1 e ISO 3310-2		125	0,0	4665,0	100,0
		63	0,0	4665,0	100,0
		31,5	394,8	4270,2	91,5
		16	1245,4	3419,6	73,3
		8	2236,0	2429,0	52,1
		4	2716,6	1948,4	41,8
		2	3365,5	1299,6	27,9
		1	3723,0	942,0	20,2
		0,500	4021,6	643,4	13,8
		0,400	4099,0	566,0	12,1
		0,250	4263,4	401,6	8,6
		0,125	4447,7	217,3	4,7
		0,075	4528,6	136,4	2,9
		0,063	4547,3	117,8	2,5
Peso aggregati [g]			4665,0		

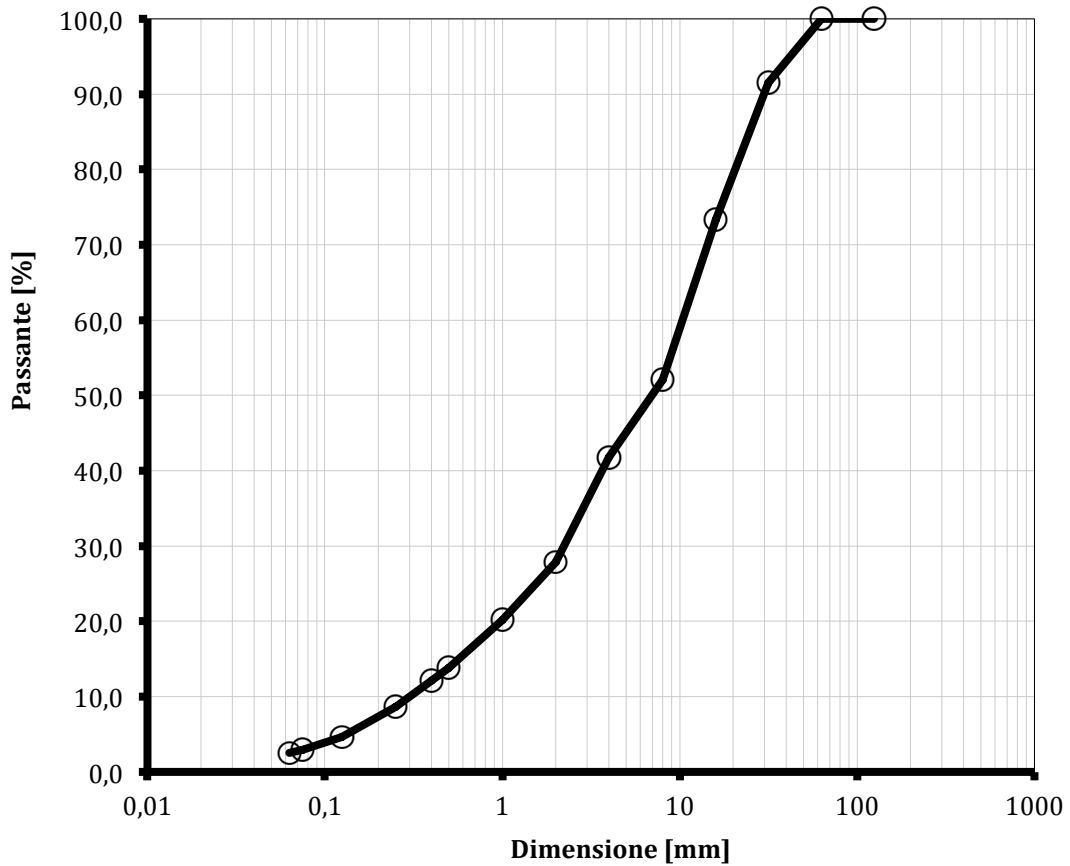


Figura 2.2 - Curva granulometrica 100% fresato di lastra

Tabella 2.3 – Frazioni granulometriche 100% frantumato di calcestruzzo

100% FRANTUMATO DI CALCESTRUZZO				
	Apertura	Trattenuto	Passante	Passante
	[mm]	[g]	[g]	[%]
SETACCI ISO 3310-1 e ISO 3310-2	125	0,0	3837,0	100,0
	63	0,0	3837,0	100,0
	31,5	105,8	3731,2	97,2
	16	386,5	3450,6	89,9
	8	1034,8	2802,3	73,0
	4	1714,4	2122,6	55,3
	2	2183,8	1653,3	43,1
	1	2597,1	1239,9	32,3
	0,500	2931,4	905,7	23,6
	0,400	3022,8	814,2	21,2
	0,250	3189,8	647,2	16,9
	0,125	3354,4	482,6	12,6
	0,075	3448,2	388,9	10,1
	0,063	3483,0	354,0	9,2
Peso aggregati [g]		3837,0		

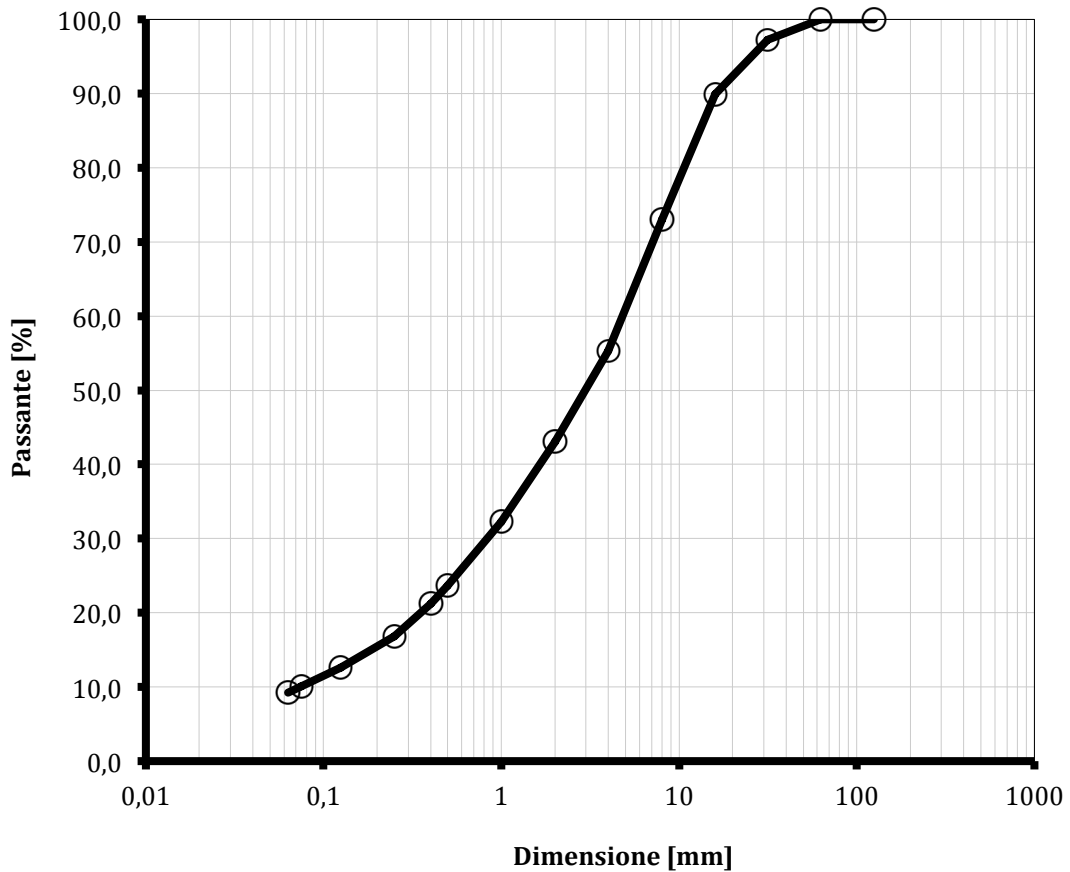


Figura 2.3 – Curva granulometrica 100% frantumato di calcestruzzo

Tabella 2.4 – Frazioni granulometriche dell'aggregato utilizzato

66% FRESATO DI LASTRA + 30% FRANTUMATO Di CLS					
		Apertura	Trattenuto	Passante	Passante
		[mm]	[g]	[g]	[%]
SETACCI ISO 3310-1 e ISO 3310-2		125	0,0	4174,1	100,0
		63	0,0	4174,1	100,0
		31,5	339,4	3834,7	91,9
		16	1140,4	3033,7	72,7
		8	1874,1	2300,0	55,1
		4	2505,9	1668,1	40,0
		2	2927,9	1246,2	29,9
		1	3271,3	902,8	21,6
		0,500	3541,2	632,9	15,2
		0,400	3613,4	560,7	13,4
		0,250	3748,5	425,6	10,2
		0,125	3877,5	296,6	7,1
		0,075	3948,8	225,3	5,4
		0,063	3970,9	203,2	4,9
Peso aggregati [g]			4174,1		

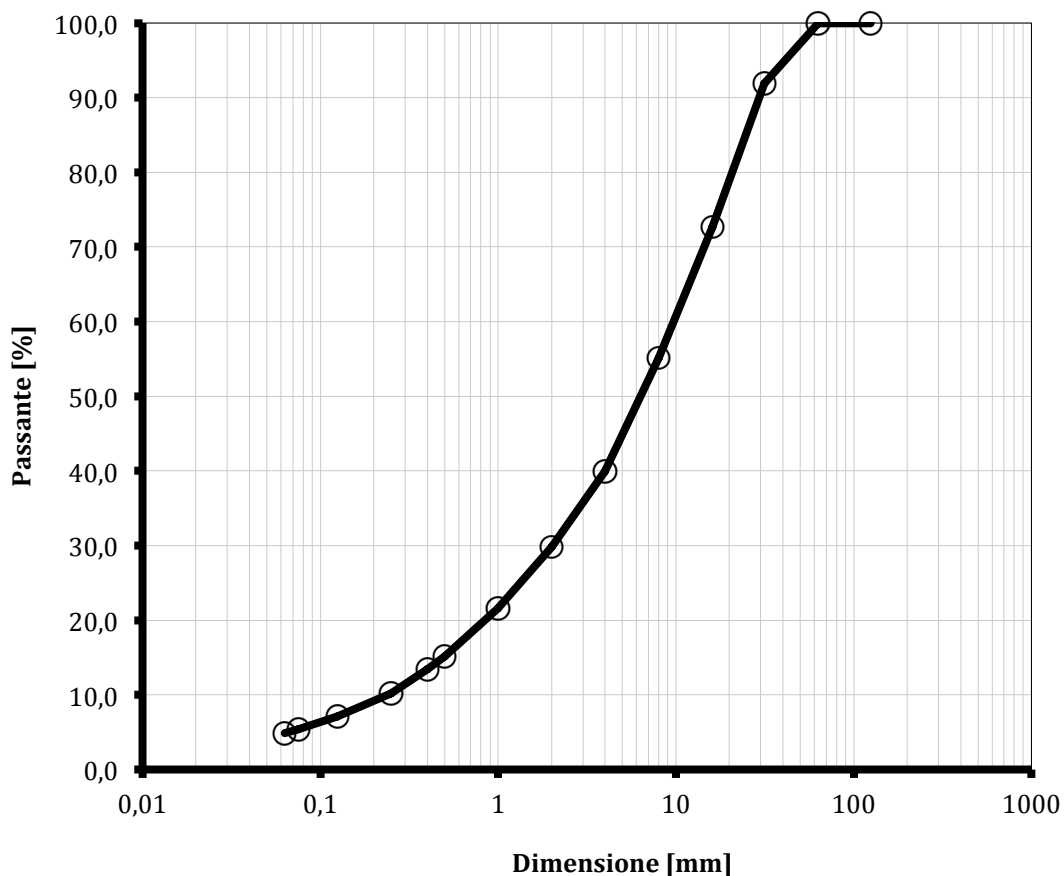


Figura 2.4 – Curva granulometrica dell'aggregato utilizzato

Cemento

Il cemento utilizzato nella miscela analizzata è di tipo CEM II/B-P 32,5R, cioè un cemento Portland caratterizzato dall'aggiunta di pozzolana dal 21% al 35% ed una resistenza a compressione caratteristica di 32,5 MPa a 28 giorni di maturazione. Le aggiunte pozzolaniche favoriscono la formazione di un processo di idratazione secondaria, in aggiunta a quello del clinker di cemento, il quale favorisce un miglioramento della resistenza agli agenti aggressivi (CO_2 , SO_4^{--} , Cl^- , ecc.). Tuttavia, si ha un ritardo nello sviluppo delle prestazioni meccaniche del materiale, al quale si deve necessariamente garantire una stagionatura più lunga [20].

Fibre

Le fibre scelte sono il risultato di una precedente sperimentazione, la quale ha permesso di verificare le migliori proprietà di un misto cementato con aggiunta di fibre polipropileniche fibrillate rispetto ad uno confezionato con fibre poliolefiniche, in particolare per quanto riguarda addensamento, lavorabilità e caratteristiche meccaniche [2][13].

Le fibre che sono state utilizzate all'interno della miscela di MCF per lo 0,04% in peso rispetto alla frazione lapidea secca, sono fibre di polipropilene fibrillate a fascetti, ottenute da una miscela di fibre sintetiche monofilamento a base di polipropilene vergine 100%, senza aggiunta di olefina rigenerata. Le fibre utilizzate sono rappresentate in Figura 2.5.

Tali fibre rispettano la normativa EN 14889-2 per applicazioni non strutturali nel calcestruzzo, nelle malte e nelle malte di iniezione.

Le caratteristiche fisico-chimiche sono riportate in Tabella 2.5.

Tabella 2.5 – Caratteristiche fisico-chimiche della fibra polipropilenica fibrillata [6]

CARATTERISTICHE FISICO - CHIMICHE	
Materiale	100% polipropilene vergine
Forma	fibrillata
Peso specifico	0,91 kg/dm ³
Lunghezza	graduata
Resistenza agli acidi, basi e sali	totale
Punto di fusione	160 °C
Punto di accensione	590 °C



Figura 2.5- Fibre utilizzate per la sperimentazione

Le caratteristiche principali delle fibre utilizzate sono le seguenti:

- inibizione e controllo delle fessurazioni intrinseche del calcestruzzo dovute al ritiro plastico;
- in caso di incendio, si evita il fenomeno dello “spalling”, cioè l’esplosione violenta della struttura. Questa proprietà è dovuta al fatto che durante un incendio le fibre, raggiunta la loro temperatura di fusione, si decompongono senza produrre gas nocivi e trasformando il volume che occupavano in precedenza nella pasta cementizia in una serie di canali tra loro interconnessi. I canali fungono da via di fuga per il calore ed il vapore che si genera, in seguito alla repentina ebollizione dell’acqua interstiziale.

Il dosaggio consigliato è di 0,1% di fibre in volume, pari a 0,9kg/m³, proporzione che è stata rispettata nel confezionamento della miscela di misto cementato valutata in questa tesi.

Inoltre, l'aggiunta di fibre deve essere effettuata direttamente nell'apparato mescolatore presso l'impianto di betonaggio, e non devono mai essere aggiunte per prime. Questa disposizione è stata rispettata sia in impianto per la stesa del campo prova, sia in laboratorio durante la produzione della miscela per il confezionamento dei provini.

Infine, l'aggiunta di fibre non implica alcuna modifica delle percentuali d'acqua ne del mix design della miscela originale.

2.2 Piano sperimentale

Nel seguente paragrafo si illustrerà il piano sperimentale seguito, in particolare si illustreranno le due tipologie di sperimentazioni effettuate sul materiale: la prima sui provini confezionati e testati in laboratorio, la seconda sul campo prove realizzato per la sperimentazione in vera grandezza.

Le miscela di misto cementato fibro-rinforzato è stata confezionata in situ, presso un impianto di miscelazione, mentre in laboratorio è stata utilizzata una betoniera. L'aggregato utilizzato per la realizzazione del campo prove era presente in loco disposto in cumuli, ed in parte è stato prelevato e trasportato al Laboratorio Sperimentale Stradale del DIAR – Politecnico di Milano, per il confezionamento dei provini.

Poiché lo scopo di questa tesi non è solo la verifica prestazionale di un misto cementato rinforzato con fibre, ma anche la valutazione di come l'aggiunta di fibre in una miscela incida sulle sue prestazioni, le prove che verranno di seguito descritte saranno effettuate su provini confezionati con due miscele nominalmente identiche, ma con l'aggiunta, in una di esse, dello 0,04% di fibre in peso rispetto alla frazione lapidea secca.

La prima parte del piano sperimentale ha previsto l'attività di laboratorio, che, come primo punto, tratta la valutazione della Massa Volumica Umida di campioni confezionati con tecnica impulsiva (Proctor), nota la quale è stato possibile determinare la quantità di materiale necessaria nella compattazione in pressa a taglio giratorio, per raggiungere il medesimo grado di addensamento per entrambe le tecniche di compattazione. I campioni confezionati con pressa giratoria hanno un diametro di 150 mm ed uno spessore di 70 mm e per ciascuno di essi sono state valutate le caratteristiche volumetriche, in particolare Lavorabilità e Autoaddensamento.

Le prove di caratterizzazione meccanica eseguite sui campioni così prodotti sono state essenzialmente due:

- prova di determinazione del modulo di rigidezza in configurazione di trazione indiretta (tramite macchina dinamica);
- la prova di resistenza a trazione indiretta – RTI (Brasiliana).

La determinazione del modulo di rigidezza permette di caratterizzare la capacità di una miscela di deformarsi in conseguenza delle tensioni dovute alla applicazione di un carico sinusoidale. Data la mancanza di una componente viscosa ed una elevata rigidezza, caratteristica del misto cementato, si è optato per la realizzazione di prove a carico controllato in luogo di quelle a deformazione controllata, le quali avrebbero sollecitato il provino in modo eccessivo, causandone la rottura. Si sono, quindi, eseguite prove sui campioni a differenti tensioni imposte e a differenti tempi di carico di picco (parametro legato alla frequenza di applicazione del carico) in modo da determinare il grado di dipendenza del modulo elastico del materiale da questi parametri.

La prova di resistenza a trazione indiretta (Brasiliiana), effettuata sugli stessi provini testati con macchina dinamica, permette di determinare il valore di sforzo a trazione massimo che un campione, di date dimensioni, è in grado di sopportare prima di giungere a rottura. Con questa prova, imponendo la velocità di spostamento del pistone, il carico aumenta progressivamente fino alla rottura del campione stesso.

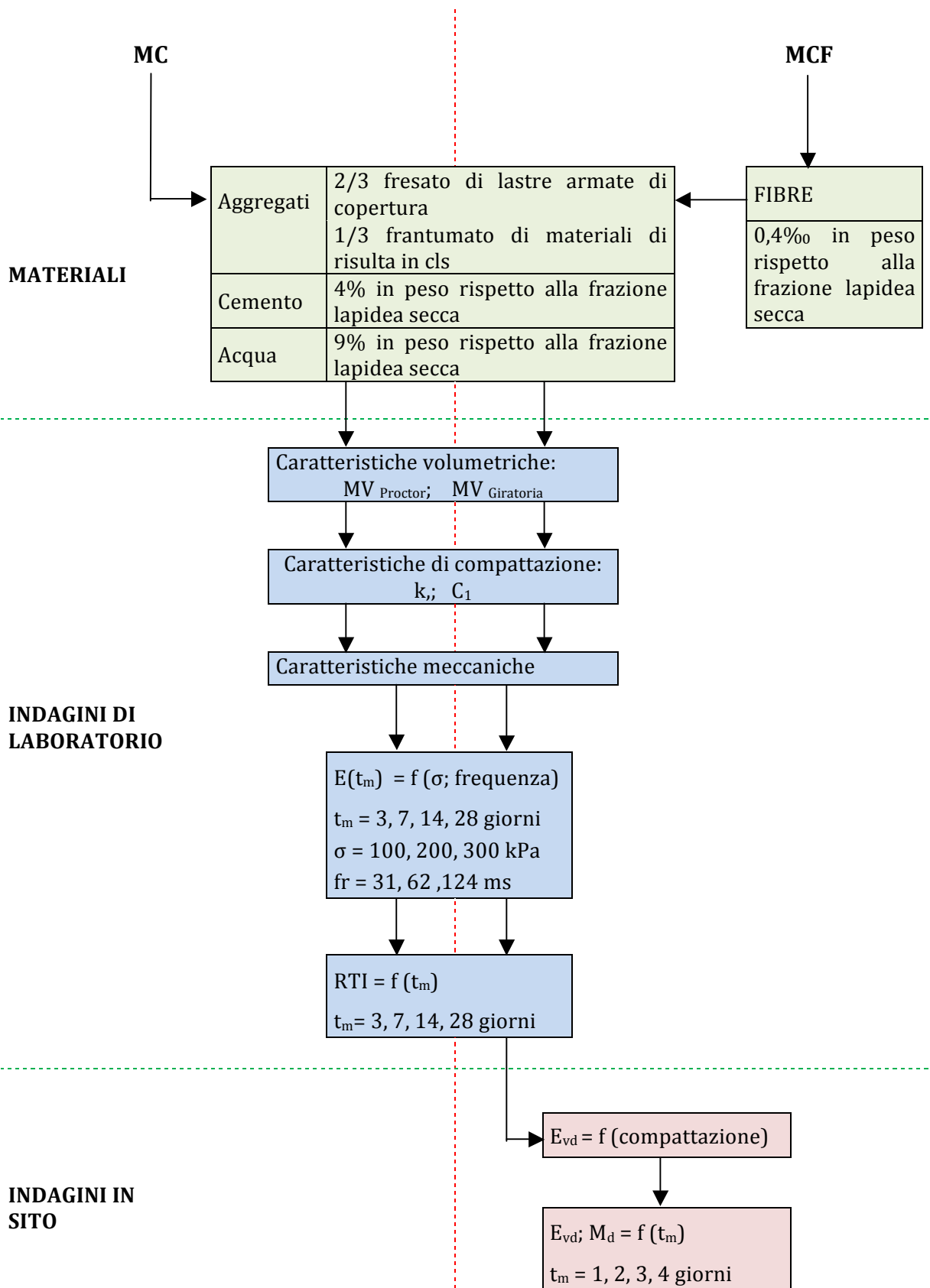
In conclusione all'attività sperimentale di laboratorio, si sono effettuate considerazioni in merito alla variazione delle caratteristiche meccaniche del misto cementato fibro-rinforzato mediante l'analisi della resistenza a trazione indiretta e dei moduli di rigidezza ottenuti dalle prove sul materiale. Mentre le analisi a proposito dei valori di RTI sono fondate unicamente sulla loro variazione in funzione dei diversi tempi di maturazione, i moduli di rigidezza hanno subito un'attenta valutazione basata non solo sul tempo di maturazione, ma in particolare sui risultati ottenuti in base alla variazione delle impostazioni dei parametri di prova, cioè delle tensioni di prova e dei tempi di carico imposti. Le conclusioni dedotte sono presentate nel Capitolo 3.

Successivamente è stata svolta una sperimentazione in vera grandezza tramite prove realizzate su di una stesa di misto cementato con aggiunta di fibre di 180 mm di spessore. Tali prove sono state realizzate per mezzo del Light Weight Drop Tester (LWDT) e della piastra statica. Le prime sono state eseguite durante la stesa, ogni due passaggi del rullo compattatore e a compattazione ultimata, e nei tre giorni successivi, mentre le seconde sono state previste ogni 24 ore, dal primo al quarto giorno di maturazione, poiché più adatte a determinare la

portanza di un materiale divenuto più rigido grazie alla maturazione. I dati risultanti dalle analisi ora presentate sono stati riportati nel Capitolo 3.

Di seguito è riassunto schematicamente il piano sperimentale seguito mediante un diagramma di flusso.

PIANO SPERIMENTALE



2.3 Metodologia di indagine di laboratorio

L'indagine sperimentale, come detto, è stata svolta attraverso prove di laboratorio eseguite su provini compattati tramite la pressa a taglio giratorio. Dalle prove con macchina dinamica sono stati ricavati i valori di modulo di rigidezza in funzione di differenti tempi di maturazione e di una combinazione di tre tensioni imposte e di tre tempi di picco, mentre dalla prova Brasiliana si sono ottenuti i valori di resistenza a trazione indiretta. Entrambe hanno fornito parametri atti alla valutazione delle prestazioni meccaniche del materiale. Di seguito saranno illustrate le metodologie di indagine e le procedure di prova.

2.3.1 Valutazione della Massa Volumica Umida tramite Prova Proctor

Il confezionamento dei provini con metodologia Proctor (CNR BU 29/72) ha come obiettivo, per questa tesi, la produzione di materiale idoneo al calcolo della sola massa volumica. Il macchinario utilizzato per effettuare la compattazione impulsiva è rappresentato in Figura 2.6.



Figura 2.6- Compattatrice Proctor

Sono stati confezionati tre provini utilizzando solo la miscela di misto cementato presentata nel Paragrafo 2.1. Il confezionamento è stato svolto compattando 5 strati per ogni provino, ogni strato viene battuto per 85 volte, con una sequenza di 6 colpi sul bordo e 1 colpo al centro, con una massa cadente da un'altezza di 47,5 cm e con massa di 4535 g. Una volta compattati tutti e 5 gli strati e dopo aver effettuato una rasatura sul materiale in eccesso, si è provveduto alla pesatura della fustella contenente il materiale e al calcolo della Massa Volumica Umida del provino, in quanto noto il peso della sola fustella.

2.3.2 Compattazione dei provini con Pressa a Taglio Giratorio

Per il confezionamento dei provini da sottoporre alle prove di rottura è stata utilizzata la pressa a taglio giratorio, in dotazione presso il Laboratorio Sperimentale Stradale del DIAR –Politecnico di Milano.

La pressa giratoria

La pressa giratoria (Figura 2.7) è una macchina utilizzata generalmente per la compattazione dei conglomerati bituminosi, ma in questo caso è stata utilizzata per la compattazione dei misti cementati, in quanto ben si presta a realizzare campioni con tale materiale.

Essa permette di preparare campioni cilindrici aventi caratteristiche di addensamento e di organizzazione interna dei granuli di aggregato molto simili a quelle ottenute in situ mediante la compattazione dei rulli di cantiere.

Secondo la normativa di riferimento UNI-EN 12697-31 tale apparecchiatura può essere utilizzata per:

- determinare il volume dei vuoti di una miscela ad un numero dato di rotazioni;
- determinare una curva di addensamento in funzione del numero di rotazioni;
- confezionare provini di una data altezza ad una predeterminata densità, da sottoporre successivamente a prove per determinarne le caratteristiche meccaniche.

Il materiale è collocato all'interno di una fustella metallica e sottoposto ad una pressione costante, la cui direzione di applicazione risulta essere inclinata rispetto all'asse della fustella stessa. Inoltre, durante il processo di compattazione, quest'ultima ruota attorno al proprio asse ad una velocità costante.



Figura 2.7- Pressa a taglio giratorio e schema di esecuzione

Questa metodologia di compattazione è preferibile a quella Marshall, poiché essa riproduce in modo più fedele l'addensamento del materiale subito durante la fase di stesa in cantiere, dato che il campione è sottoposto sia ad uno sforzo di compressione verticale, che di taglio orizzontale dovuto alla rotazione della fustella attorno ad un asse inclinato di un angolo α rispetto alla verticale (angolo giratorio). Per maggior chiarezza si osservi la Figura 2.7.

La pressa giratoria utilizzata per il presente lavoro di ricerca presenta caratteristiche conformi alle prescrizioni tecniche delle norme SHRP M-002, UNI-EN 12697-10, UNI-EN 12697-31, ASTM-D6307.

Per l'avvio della compattazione, l'operatore imposta i parametri di prova: in tal

modo il controllo di tutte le fasi della compattazione viene effettuato in automatico dal computer interno. Durante il funzionamento della macchina, il computer controlla che sia applicata la corretta pressione di compattazione, il giusto valore dell'angolo girevole e che la rotazione avvenga alla velocità opportuna. A compattazione terminata, la testa di carico assume automaticamente la posizione di riposo ed il provino può essere estruso dalla fustella mediante un pistone elettrico.

Si riportano di seguito i parametri di prova che possono essere impostati:

- Pressione di compattazione;
- Angolo di compattazione;
- Velocità di rotazione;
- Altezza minima di compattazione;
- Numero di giri;
- Modalità di compattazione:
 - A numero di giri imposto;
 - Ad altezza imposta.

È possibile, inoltre, utilizzare due diverse tipologie di fustelle con diverso diametro:

- Diametro $150,0 \pm 0,1$ mm e altezza 250 mm;
- Diametro $75,0 \pm 0,1$ mm e altezza 250 mm.

Le tecniche per il confezionamento dei campioni da sottoporre alle prove di caratterizzazione volumetrica e meccanica hanno richiesto una fase di studio preliminare, che ha portato all'elaborazione di opportuni protocolli di compattazione.

Confezionamento dei provini

Per realizzare i provini si inserisce nella fustella (con profilo interno cilindrico e diametro da 150 mm) una quantità di materiale tale da ottenere, alla fine della prova, il medesimo grado di addensamento ottenuto con tecnica Proctor. Fatto ciò, si posiziona la fustella nella camera di compattazione e si impostano i parametri di prova riassunti nella Tabella 2.6, infine, si avvia la prova.

Tabella 2.6 – Parametri di compattazione pressa a taglio giratorio

CARATTERISTICHE TECNICHE DI PROVA	
Pressione di compattazione	600 kPa
Angolo di compattazione	21,83 mrad
Velocità di rotazione	60 rpm
Numero max di giri	500 giri
Diametro della fustella	150 mm
Modalità di compattazione	Altezza imposta 70 mm

Raggiunto il valore di altezza imposto, la pressa si ferma consentendo di estrarre la fustella e porla nell'estrusore che, mediante un pistone azionato elettricamente, permette di sfilare il provino dalla stessa.

Estratti i campioni dalla fustella vengono contrassegnati (Figura 2.8) e posti in camera di maturazione.

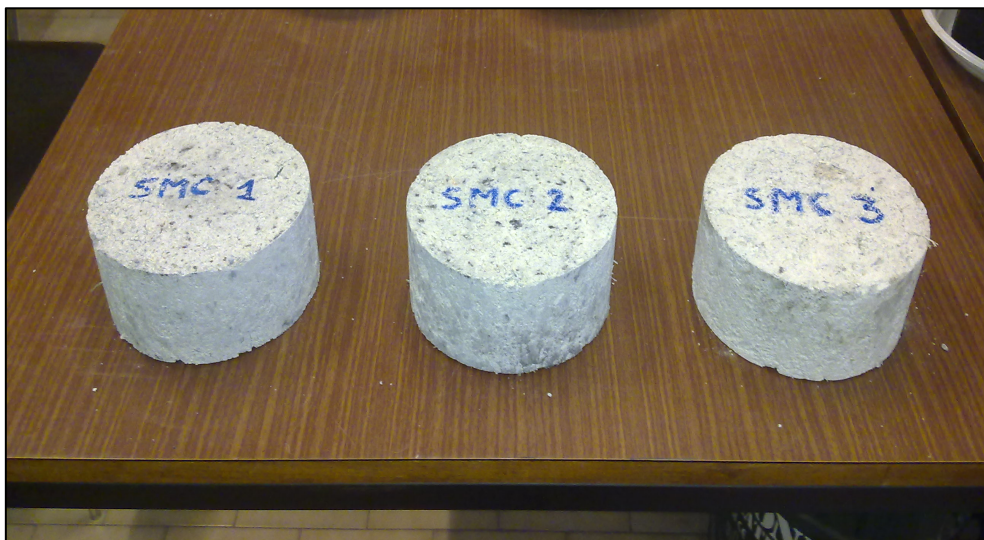


Figura 2.8- Provini compattati con pressa a taglio giratorio

Lavorabilità e Autoaddensamento delle miscele

La pressa giratoria è dotata di sensori che permettono di registrare in ogni fase della compattazione alcune caratteristiche volumetriche della miscela; in funzione del numero di giri, essa fornisce i valori di altezza e peso del provino, densità, taglio e grado di compattazione.

Attraverso tali risultati sono state ricavate le curve di compattazione, che solitamente si ottengono riportando su un grafico semi-logaritmico il numero di giri in ascissa e la percentuale di massima densità raggiunta in ordinata (grado di compattazione).

Il grado di compattazione calcolato ad ogni giro del processo di compattazione in base al peso e all'altezza del campione è denominata densità "non corretta" (C_{ux}). La densità "non corretta" ad un determinato numero di giri "x" è calcolata come percentuale della massima massa volumica teorica del misto cementato mediante la seguente equazione.

$$C_{ux} = \frac{100}{TMD} * \frac{W_m}{V_{mx}}$$

Dove:

- V_{mx} = volume del provino a "x" giri pari a $\pi * d^2 * \frac{h_x}{4}$ [cm³];
- W_m = massa inserita nella fustella [g];
- **TMD** = massima massa volumica del misto cementato [g/cm³];
- **d** = diametro del campione [cm];
- h_x = altezza del campione a "x" giri [cm].

La relazione analitica che lega i parametri di compattazione è la seguente.

$$C(\%) = C_1(\%) * k \ln(N)$$

Dove:

- C_1 indica l'Autoaddensamento della miscela dopo il primo giro;
- **k** indica la lavorabilità della miscela, ovvero la capacità del materiale o comunque di una miscela di compattarsi e deformarsi sotto l'azione di una forza;
- **C(%)** rappresenta il grado di costipamento, ossia il complementare a 100% della percentuale dei vuoti.

Dall'esame delle curve di compattazione si derivano i due parametri che esprimono in maniera quantitativa la lavorabilità: la pendenza (k) della curva di compattazione, la lavorabilità, e la sua ordinata d'origine (C_1) che identifica l'Autoaddensamento. Tali parametri sono stati determinati mediante regressione lineare dalle curve di compattazione di ciascun provino.

In riferimento alle lavorazioni in situ, l'Autoaddensamento, misurato in laboratorio al primo giro della pressa, esprime il grado di compattazione che il materiale raggiunge nel corso della stesa con vibrofinitrice, mentre il parametro k definisce la capacità del materiale di lasciarsi compattare sotto l'azione del rullo.

L'Autoaddensamento, in particolare, è legato alle caratteristiche granulometriche degli aggregati ed è tanto maggiore quanto più la granulometria è vicina a quella del massimo addensamento, inoltre esso varia con il valore di attrito interno della miscela che risulta molto sensibile alla forma degli aggregati.

Invece, i parametri che maggiormente influenzano la lavorabilità sono: il contenuto d'acqua, le caratteristiche dell'aggregato, il rapporto acqua/cemento e la presenza di additivi, in questo caso fibre polipropileniche [1].

Entrando più nello specifico, la messa in opera di un misto cementato avviene "vincendo" la forza di taglio intergranulare della miscela stessa:

$$\tau = c + \sigma * \tan \varphi$$

dove possiamo distinguere la coesione c e il contributo dovuto agli aggregati φ , detto angolo di attrito interno [7].

Il valore di resistenza al taglio non deve essere troppo alto (in quanto sarebbe difficile da superare con i mezzi d'opera) né tanto meno troppo basso (poiché il materiale non terrebbe la forma una volta steso).

Ovviamente, come tutte le grandezze relative ai misti cementati, anche nel caso della lavorabilità sono molteplici i fattori che ne influenzano l'entità. In primo luogo la granulometria ed il grado di angolosità degli aggregati, in quanto essi agiscono sull'angolo di attrito interno φ in maniera marcata: per questo motivo, gli aggregati di frantumazione hanno sì una resistenza maggiore, ma causano una

minor lavorabilità in quanto si rende più difficoltoso il mutuo scorrimento tra i granuli.

Un ulteriore fattore che incide in modo importante sulla lavorabilità e sull'addensamento della miscela è la quantità d'acqua presente, in quanto, un suo aumento nella miscela crea inizialmente un effetto "lubrificante", che permette un più facile scorrimento dei granuli, e quindi un aumento di lavorabilità e addensamento, ma, raggiunto il valore ottimale, qualunque aumento può avere un effetto negativo; infatti, l'acqua riempie i vuoti tra i grani e riduce lo spazio a disposizione dell'aria per uscire e quando viene sottoposta a sforzi di compressione, subisce un aumento della pressione con effetti deleteri sia per l'addensamento che per la resistenza meccanica del materiale, come già noto per le terre [7][8].

Inoltre, va tenuto in considerazione il rapporto acqua/cemento nella miscela che, come noto, al suo diminuire, la rende meno lavorabile [1]. Sebbene il cemento aggiunto sia solo del 4% in peso rispetto alla frazione lapidea secca, a fronte di una presenza del 9% di acqua in peso, si deve considerare il fatto che, come precedentemente accennato, gli aggregati presenti sono totalmente costituiti da calcestruzzo.

Infine, per quanto concerne la presenza di fibre come additivo alla miscela, si è potuto osservare, da precedenti attività di sperimentazione [2], che un aumento della percentuale di fibre inizialmente porta benefici in termini di Autoaddensamento, ma una volta raggiunto il valore ottimale, qualunque aumento riporta effetti negativi su tale parametro. In corrispondenza della percentuale di fibre che offre maggiori garanzie in termini di addensamento, si ha un congruo valore di lavorabilità, la quale, però, diminuisce all'aumentare del contenuto di fibre nella miscela.

2.3.3 Determinazione del modulo di rigidezza tramite macchina dinamica

Le deformazioni, che il misto cementato subisce in funzione delle sollecitazioni applicate, hanno un ritardo nel tempo decisamente breve, in quanto, essendo un materiale rigido, il suo comportamento è prevalentemente di tipo elastico.

La parte elastica del misto cementato, è regolata dal legame costitutivo sforzi-deformazioni secondo il modulo di elasticità o di Young.

Nello svolgimento del presente piano sperimentale si è determinato il modulo di rigidezza con una macchina dinamica.

L'apparecchiatura in questione permette di valutare alcune tra le più importanti proprietà meccaniche di un misto cementato, tra cui il modulo di rigidezza. Essa presenta caratteristiche conformi alla normativa UNIEN 12697/26.

Tale macchinario ricava la misura del modulo di rigidezza applicando una trazione indiretta a provini cilindrici e rilevando le deformazioni orizzontali reversibili, agendo in modo non distruttivo.

Il carico è applicato mediante un dispositivo oleopneumatico, fissato su un telaio d'acciaio, ed è distribuito lungo tutto lo spessore del provino, attraverso due barre d'acciaio di dimensioni standard, detti coltelli, e con raggio di curvatura pari a quello del provino da testare. La macchina è dotata di due serie di coltelli adatti ad effettuare prove sia su campioni da 150 mm, che è la dimensioni dei provini confezionati con pressa a taglio girevole, che da 100 mm.

Il coltello inferiore è fissato saldamente alla base di appoggio, mentre quello superiore è rimovibile e trasmette il carico attraverso un perno d'acciaio che garantisce l'applicazione di una forza assiale (Figura 2.9).

La cella di carico del sistema misura la forza applicata dal dispositivo ad ogni ciclo. Il sistema di misurazione della deformazione calcola le deformazioni orizzontali massime perpendicolari alla direzione di applicazione del carico attraverso i trasduttori di spostamento fissati mediante un supporto sul diametro del provino (Figura 2.10).

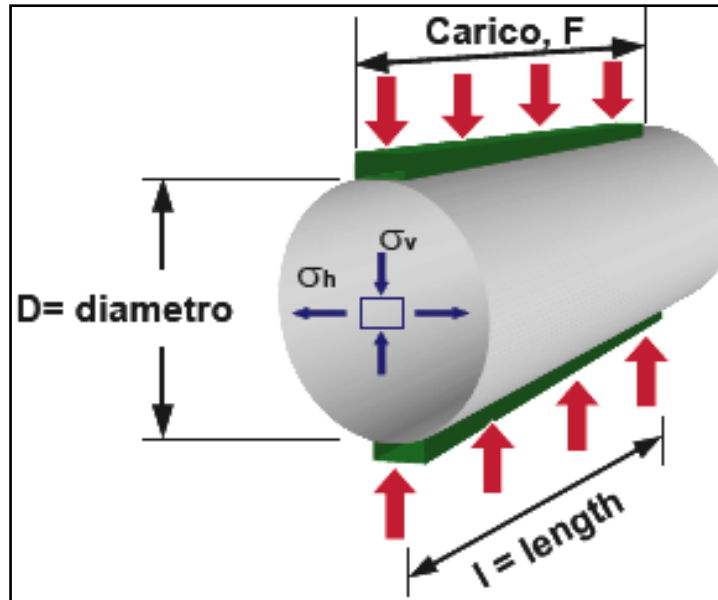


Figura 2.9–Schema di applicazione del carico della macchina dinamica

Descritta la parte meccanica dell'apparecchiatura si introduce brevemente la componente software del sistema.

La macchina dinamica è collegata ad una centralina, la quale a sua volta è collegata ad un computer su cui è installato il software di funzionamento della macchina stessa.

Prima di iniziare il test occorre aprire il software ed impostare i parametri di esecuzione della prova, di seguito descritti. Il programma permette di salvare e di esportare in vari formati i risultati delle prove eseguite.

Una caratteristica fondamentale della macchina dinamica utilizzata è la possibilità di poter effettuare la prova con due differenti modalità:

- a deformazione controllata;
- a carico controllato.

Nel caso presente è stato seguito il secondo procedimento, in quanto, se si fosse imposta una deformazione controllata, a causa della rigidità del provino, i primi colpi di assestamento avrebbero potuto causarne la rottura.



Figura 2.10- Particolare del trasduttore

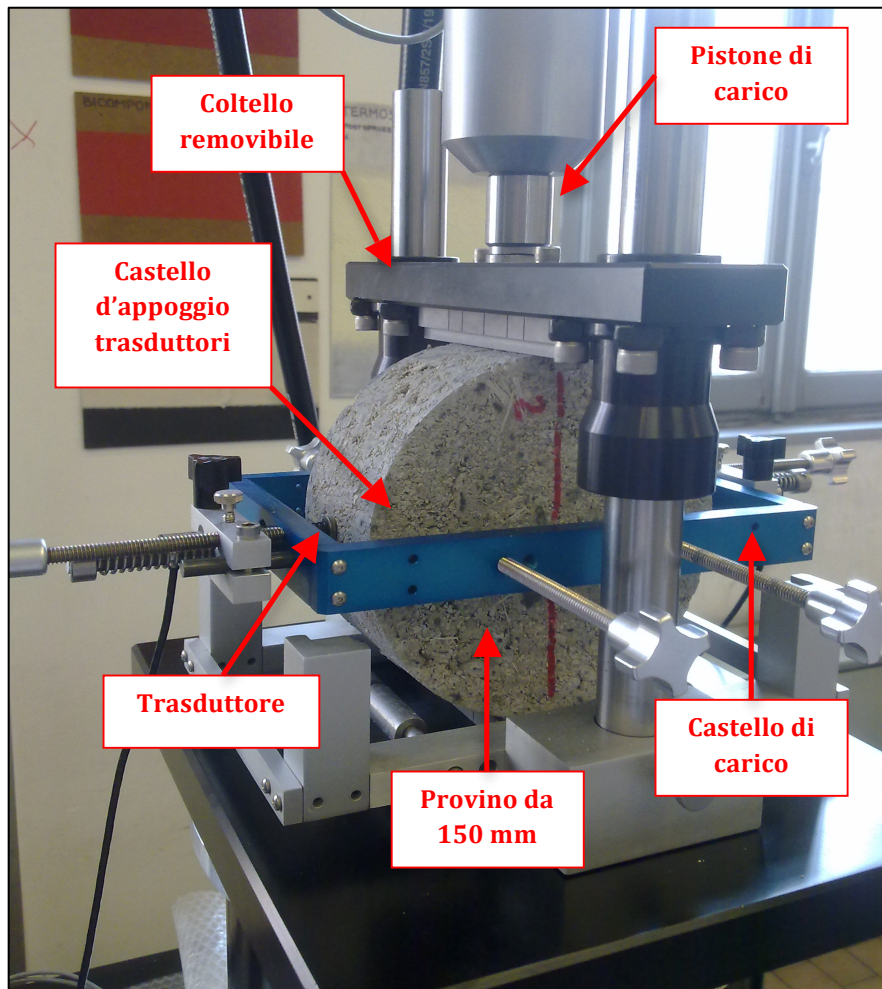


Figura 2.11- Castello di carico della macchina dinamica

Una volta posizionato il provino sull'apposito castello di carico (Figura 2.11), si utilizza il software della macchina, il quale dà la possibilità di impostare i seguenti parametri di prova:

- temperatura di prova [°C];
- diametro del provino [mm];
- spessore del provino [mm];
- modulo di Poisson ν ;
- tempo di picco [ms];
- numero di impulsi di preconditionamento;
- numero dei cicli di prova;
- tensione imposta [kN].

Il tempo di picco è quello che intercorre tra l'istante iniziale in cui il carico viene applicato al provino e l'istante in cui il carico raggiunge il punto di massimo, ovvero quando viene raggiunta la tensione di prova (Figura 2.12)

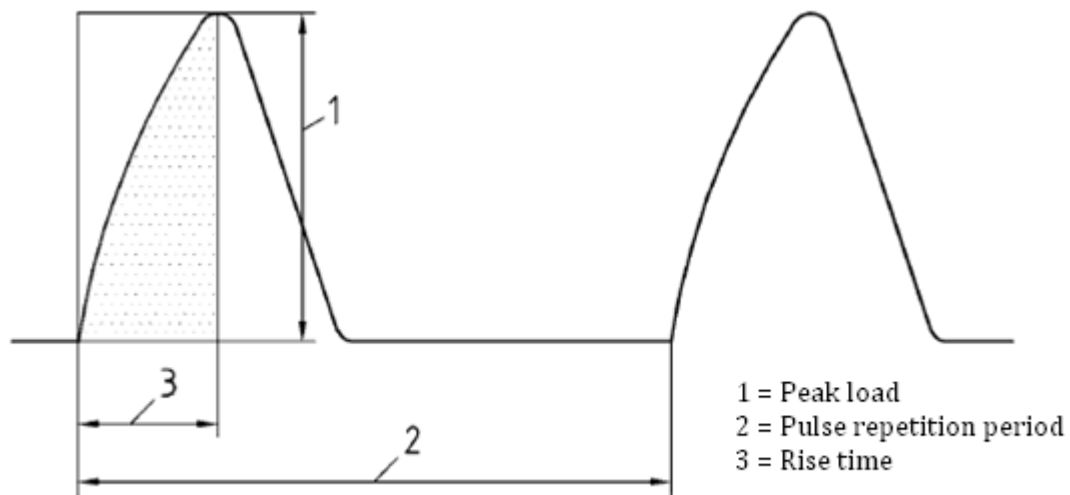


Figura 2.12 - Rappresentazione delle curve di carico

La temperatura di prova è 20°C.

I parametri utilizzati per le prove di laboratorio sul materiale in studio sono riportati in Tabella 2.7.

Tabella 2.7 – Parametri di prova per il calcolo del modulo elastico

CARATTERISTICHE TECNICHE DI PROVA	
Temperatura di prova	20 °C
Diametro del provino	150 mm
Spessore del provino	70 mm
Modulo di Poisson	0,20
Numero cicli di condizionamento	10 cicli
Numero cicli di prova	5 cicli
Tempo di picco	124 ms
	62 ms
	31 ms
Tensione imposta	100 kPa
	200 kPa
	300kPa

Inseriti i parametri di input occorre porre a contatto i trasduttori con la superficie del provino, con una compressione tale da permettere la lettura della deformazione orizzontale subite durante la prova (Figura 2.10).

La prova inizia applicando al provino un numero prefissato di impulsi per calibrarne l'ampiezza, necessaria a mantenere costante la tensione imposta.

La geometria del provino è nota, la tensione e i tempi di picco sono imposti e le deformazioni sono misurate, pertanto la deformazione massima ed il modulo di rigidezza sono automaticamente calcolati dal software ad ogni ciclo di carico.

La stessa operazione è in seguito effettuata ruotando il campione di 90°, cioè sollecitando il diametro ortogonale a quello di partenza.

Per ogni diametro si effettuano, in serie, nove rilevazioni, a tre tensioni imposte di 100, 200 e 300 kPa e per ciascuna di esse a tre tempi di picco di 124, 62 e 31 ms. Per ogni prova si sono imposti 10 colpi di pre-condizionamento e 5 colpi di prova. La media dei valori di modulo di rigidezza calcolati sui due diametri, per ciascuna coppia tensione imposta/tempi di picco, rappresenta il modulo di rigidezza del materiale per quella condizione di prova.

È importante, infine, evidenziare la metodologia di prova seguita. La serie di prove inizia sottoponendo il provino a una tensione di 100 kPa per un tempo di picco di 124 ms, si rilevano i dati e per la seconda prova si mantiene la tensione di 100 kPa ma riducendo il tempo di picco a 62 ms, mentre per la terza si impone

31 ms di tempo di picco a parità di tensione; la procedura prosegue aumentando la tensione a 200 kPa e a 300 kPa, mantenendola costante per le tre prove a tempo di picco decrescente. Ogni tre prove, il provino viene quindi stressato a un carico crescente; si è proceduto seguendo questo criterio, invece di mantenere invariato il tempo di carico e facendo variare la tensione, in quanto non si voleva stressare eccessivamente il provino già dalle prime tre prove in cui si sarebbe raggiunta la tensione di 300 kPa, provocando un stress eccessivo al materiale con una conseguente distorsione dei dati rilevati dalle prove successive.

2.3.4 Prova di resistenza a trazione indiretta (Brasiliana)

La prova, eseguita secondo la Norma UNI EN 13286-42, ha lo scopo di misurare la resistenza a trazione indiretta (RTI) di provini in misto cementato provocandone la rottura per trazione, mediante un carico di compressione verticale. Il principio su cui si basa la prova è il medesimo sul quale si basa la prova di determinazione del modulo di rigidezza attraverso la macchina dinamica (Figura 2.14). A differenza di quest'ultima la prova Brasiliana induce la rottura del provino tramite un carico verticale crescente. Il campione, sottoposto ad uno sforzo di compressione verticale, è conseguentemente sottoposto anche a sforzi di trazione in direzione ortogonale alla direttrice di applicazione del carico, come rappresentato in Figura 2.13.

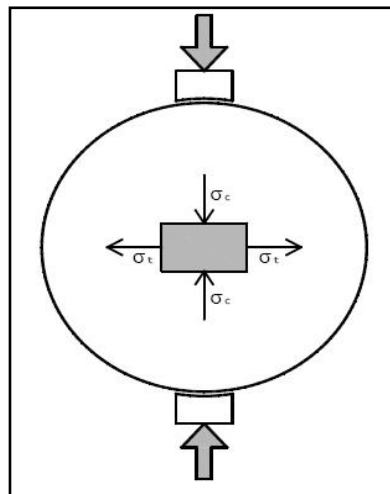


Figura 2.13 - Sforzi sviluppati nel cuore del provino

I primi dati necessari allo svolgimento della prova sono le dimensioni caratteristiche (altezza e diametro) del provino per calcolarne il volume e per verificare la planarità tra le facce. Successivamente si procede alla rottura del campione il quale è inserito all'interno del castello di prova in modo che i coltelli di contatto della pressa agiscano esattamente sul diametro, è quindi caricato diametralmente lungo la direzione dell'asse del cilindro con velocità costante di avanzamento pari a 51 mm/min fino a rottura. Il valore massimo di resistenza meccanica che porta il provino a rottura è infine utilizzato nella seguente formula per calcolare il valore di resistenza a trazione indiretta (RTI).

$$RTI = (2 * P) / (\pi * D * h)$$

Dove:

- **RTI** è la resistenza a trazione indiretta [MPa];
- **P** è il carico di rottura [N];
- **D** è il diametro del campione [mm];
- **h** è l'altezza del campione [mm].



Figura 2.14- Macchina per prova di resistenza a trazione indiretta (Brasiliiana)

2.4 Metodologia di indagine in vera grandezza

La sperimentazione in vera grandezza è stata effettuata mediante l'allestimento di un campo prove presso le aree di cantiere site in un grande aeroporto milanese. Per tale analisi sono state scelte due modalità di indagine, la prima, sia durante la fase di compattazione del materiale che nei successivi giorni di maturazione, basata sulla determinazione del modulo di deformazione dinamico mediante prova di carico con piastra dinamica a massa battente (LWDT), la seconda mediante la determinazione del Modulo di Deformazione con piastra statica al fine di studiare l'evoluzione della capacità portante in funzione del tempo di maturazione.

Di seguito saranno illustrate le metodologie di indagine e le procedure di prova.

2.4.1 Determinazione del modulo di deformazione dinamico con LWDT

Durante la prova di carico su piastra dinamica con la strumentazione a massa battente è possibile eseguire prove veloci, durante le quali la piastra di carico circolare viene posizionata su superficie piana di prova e l'unità di carico sopra di essa.

La superficie da esaminare viene battuta con colpi definiti della massa battente che cade in maniera verticale sull'elemento elastico. Tali battute di carico misurano il valore massimo del cedimento del terreno sotto la piastra di carico. Per ogni punto di prova vengono prima eseguite tre battute di precarico e infine tre battute di misurazione. Il valore medio dei cedimenti misurati attraverso le tre battute di carico serve per calcolare il modulo di deformazione dinamico E_d per ogni punto di prova.

La piastra dinamica leggera a massa battente (Figura 2.15) può essere utilizzata agevolmente da un solo operatore. L'esecuzione di una prova dura solo alcuni minuti.

L'unità di carico è composta da una massa battente di 15 chili, un'asta di guida e

lo smorzatore. La piastra di carico presenta un diametro di 300 mm così come la piastra statica.

La durata del carico durante una battuta di prova è pari a 16 ms fino a 20 ms ed è quasi paragonabile alla frequenza di vibrazione del rullo vibratore.



Figura 2.15- Piastra dinamica a massa battente

Il cosiddetto Modulo dinamico di deformazione E_{vd} è definito come parametro di portanza secondo la seguente equazione:

$$E_{vd} = \frac{1,5 * r * d}{s}$$

Dove:

r: raggio della piastra di carico = 150 mm;

d: pressione di appoggio media sotto la piastra di carico in N/mm²;

s: ampiezza del cedimento della piastra di carico in mm corrispondente al valore medio di 3 battute di misurazione.

Per l'esecuzione della prova di carico su piastra dinamica non è necessario alcun mezzo di contrasto. Inoltre la durata della prova è notevolmente più breve rispetto alla prova su piastra statica. A parità di tempo, la piastra dinamica permette di eseguire un maggior numero di prove ed è quindi possibile osservare costantemente il processo di maturazione dello strato. Inoltre con tale strumento è possibile valutare lo stato di portanza della pavimentazione esistente già prima dell'inizio dei lavori, nell'ambito di eventuali perizie preliminari.

La piastra dinamica non solo permette di valutare il processo di maturazione, ma è anche in grado di determinare la compattazione raggiunta quando la prova viene eseguita direttamente dopo il passaggio del rullo compattatore. Se per esempio, dopo successivi passaggi del rullo non vengono registrati aumenti del modulo dinamico di deformazione, si possono evitare ulteriori passaggi.

La misurazione dell'ampiezza del cedimento viene eseguita completamente in modo automatico grazie al dispositivo elettronico.

Di regola, la prova che consente la valutazione del modulo dinamico di deformazione deve essere eseguita esattamente negli stessi punti ogni ciclo di misurazioni. Tali punti vengono individuati sulla superficie della stesa per mezzo di aree delle dimensioni di circa 1 m².

Per la valutazione del processo di maturazione è necessario attendere almeno 4 ore dal termine della compattazione per poter dare inizio alla prova. Per tutti i giorni a seguire, è opportuno eseguire almeno una prova sia la mattina che il pomeriggio.

Per effettuare la prova del controllo di compattazione, le misurazioni, due per ogni area delimitata, devono essere eseguite dopo ogni passaggio del rullo compattatore.

Per ogni prova effettuata, il dispositivo restituisce sia i valori di cedimento delle tre battute di misurazione, al termine di ogni battuta, sia il valore medio dei tre cedimenti rilevati, il modulo di deformazione dinamico, determinato in base al valore medio sopracitato, e il numero di registrazione della prova che si sta eseguendo.

2.4.2 Determinazione del modulo di deformazione statico con Piastra Statica

Mediante la prova di carico su piastra circolare (CNR BU 146/92), a differenza della prova LWDT, è possibile valutare correttamente la portanza di un materiale grazie all'utilizzo delle attrezzature e delle procedure di prova di seguito descritte.

In Figura 2.16 è riportata schematicamente la strumentazione utilizzata e sono indicati gli elementi principali.

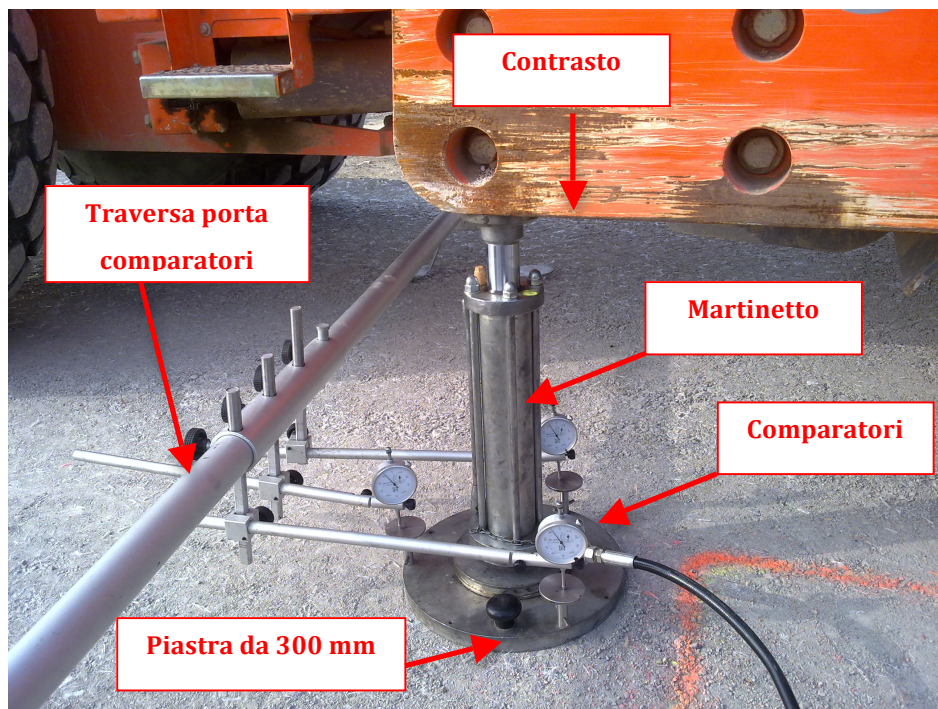


Figura 2.16- Prova di piastra statica a tre comparatori

Il valore di modulo di deformazione determinato con la prova coincide con buona approssimazione con il modulo elastico del semispazio sottostante [12], infatti, questo metodo permette di indagare in profondità lo strato in maniera non distruttiva come è possibile notare dalla Figura 2.17 dove si è visibile il bulbo di pressione, in rosso, che interessa il materiale sottostante la piastra. Inoltre, per ottenere valori di lettura corretti, la traversa porta comparatori non deve subire cedimenti, per questo i suoi punti di appoggio devono essere esterni al bacino di inflessione, quindi in corrispondenza della zona blu di Figura 2.17.

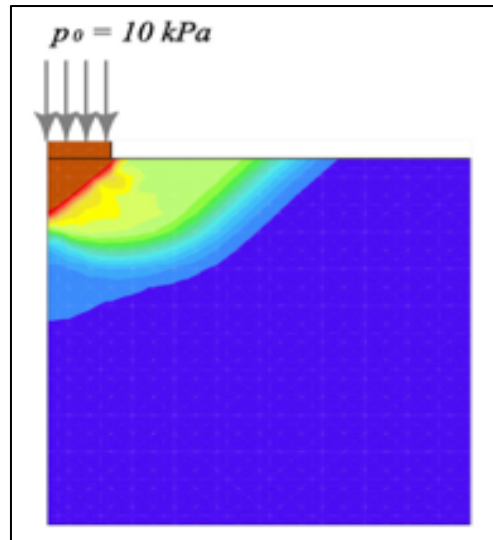


Figura 2.17- Area interessata dalle sovrappressioni [9]

La prova consiste nel caricare una piastra del diametro di 300 mm con specifici gradini di carico (0,02-0,05 ; 0,05-0,15 ; 0,15-0,25 ; 0,25-0,35 N/mm²) e misurarne i cedimenti mediante un comparatore centesimale. Vengono così calcolati i moduli di deformazione che sono una misura convenzionale della capacità portante dello strato. Il primo modulo calcolato, Md , è indicativo della portanza, il secondo modulo, Md' , consente di valutare, mediante il rapporto Md/Md' , il grado di costipamento dello strato in esame.

Le formule per il calcolo dei Moduli di deformazione sono:

$$Md = \frac{\Delta p * D}{\Delta s}$$

$$Md' = \frac{\Delta p' * D}{\Delta s'}$$

Dove:

- Δp = incremento della pressione trasmessa da una piastra circolare rigida di diametro 300 mm al primo ciclo di carico [N/mm²];
- $\Delta p'$ = incremento della pressione trasmessa da una piastra circolare rigida di diametro 300 mm al secondo ciclo di carico [N/mm²];
- Δs = corrispondente incremento di cedimento della superficie caricata durante il primo ciclo di carico [mm];
- $\Delta s'$ = corrispondente incremento di cedimento della superficie caricata durante il secondo ciclo di carico [mm].

Le curve ottenute dai dati di prova sono rappresentate in un grafico del riportato in Figura 2.18.

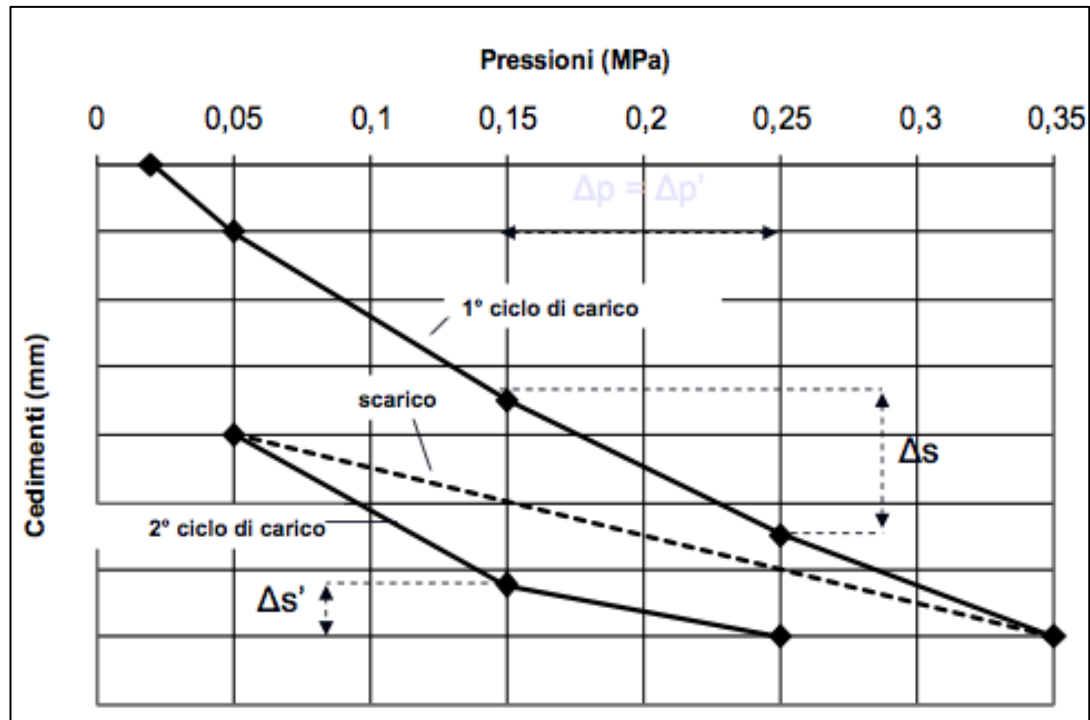


Figura 2.18- Grafico di una prova a doppio ciclo di carico

La prova di carico su piastra può essere eseguita sia con piastra a tre comparatori, sostenuti dalla traversa porta comparatori, dai quali si ricava il cedimento dalla media delle letture dei tre comparatori, o attraverso una piastra dotata di un singolo comparatore posto al centro della piastra stessa dal quale si ricavano direttamente i valori del cedimento. Per questa analisi si è optato per il primo metodo, come si può osservare in Figura 2.16, che rappresenta una foto relativa all'apparecchiatura di prova utilizzata in situ.

Capitolo 3

Indagini di laboratorio, analisi e discussione dei risultati

I risultati ottenuti dalle indagini di laboratorio, descritte nel Capitolo precedente, sono qui rappresentati in forma grafica ed in formato tabellare per una migliore interpretazione dei dati.

Verranno presentati i dati risultanti dalle prove effettuate sia sui provini confezionati con la miscela di misto cementato rinforzato con fibre polipropileniche fibrillate, sia sui provini confezionati con la stessa miscela a meno delle fibre. L'approccio metodologico, con cui è stata svolta l'indagine di laboratorio, ha quindi permesso di perseguire l'obiettivo primario della tesi, cioè verificare il materiale oggetto di studio, in relazione alle sue caratteristiche volumetriche e meccaniche, e valutare, in un secondo tempo, l'effetto sulle prestazioni conseguente all'aggiunta di fibre, grazie al confronto tra i due materiali suddetti.

La verifica del materiale si è basata, in particolare, su un'analisi dettagliata dei dati ottenuti dalle prove con macchina dinamica e dalle prove di resistenza a trazione indiretta. Sono stati evidenziati, per le prime, la variazione del modulo di rigidità in funzione, in primo luogo del tempo di maturazione e secondariamente dei parametri di prova, tensioni imposte e tempi di picco, mentre per le seconde si è valutato l'incremento della resistenza limite a trazione nel tempo e il rapporto tra questa e le tensioni imposte con la macchina dinamica.

3.1 Caratterizzazione Volumetrica

A riguardo della caratterizzazione volumetrica, la compattazione dei misti cementati con pressa a taglio girevole non è pratica usuale, benché questa attrezzatura ben si presti a realizzare campioni con tale materiale. Nella sperimentazione è stata messa a punto una metodologia di confezionamento già utilizzata in precedenti attività di ricerca su un materiale simile con ottimi risultati [2]. Tale metodologia prevede la compattazione in pressa girevole successivamente alla determinazione della Massa Volumica Umida dei corrispondenti campioni confezionati con tecnica impulsiva (Proctor). Noto tale parametro, si è operato sulla pressa girevole impostando l'altezza finale (70 mm), controllando così il volume finale del campione e, sulla base di questo, determinando la quantità di materiale da inserire nella fustella per raggiungere il medesimo grado di addensamento ottenuto con la tecnica Proctor.

La prima fase della caratterizzazione volumetrica, riguarda la compattazione mediante prova Proctor. Mediante tale prova sono stati confezionati tre provini e per ognuno di essi è stata valutata la Massa Volumica Umida. I dati ottenuti sono riportati in Tabella 3.1.

Tabella 3.1- Densità dei 3 provini dopo compattazione con prova Proctor

	Massa [g]	Volume [cm ³]	Massa Volumica Umida [g/cm ³]
PROVINO 1	7.273	3.243	2,2427
PROVINO 2	7.181	3.243	2,2143
PROVINO 3	7.032	3.243	2,1684

La densità dei provini da tenere in considerazione, per la valutazione della quantità di materiale da utilizzare per realizzare i provini con prova di pressa a taglio girevole è la media aritmetica delle densità riportate nella precedente Tabella:

Massa Volumica Umida media [g/cm ³]
2,2084

La densità così calcolata per la miscela di misto cementato sarà considerata anche per il confezionamento dei provini di misto cementato senza fibre, senza

però commettere sostanziali errori dovuti alla mancanza di fibre nella miscela, in quanto, la varianza dei dati ottenuti con la prova Proctor è superiore all'errore che si commetterebbe effettuando le stesse prove con un'identica miscela senza l'aggiunta di una percentuale infinitesima di fibre, pari allo 0,04% in peso; questo a causa sia del basso peso specifico delle fibre ($0,91 \text{ kg/dm}^3$) sia dell'esigua percentuale di aggiunta di quest'ultime nella miscela.

La seconda fase riguarda il confezionamento dei provini, mediante pressa a taglio giratorio, che saranno impiegati nelle successivamente analisi di caratterizzazione meccanica. Come descritto all'inizio del paragrafo, nota la Massa Volumica Umida dei campioni confezionati con tecnica impulsiva, è stato possibile determinare la quantità di materiale da inserire nella fustella. Il provino compattato dovrà essere un cilindro con dimensioni geometriche pari a 70 mm di altezza e 150 mm di diametro, quindi la massa da utilizzare è la seguente:

Massa Campione [g]
2.735

Noti i dati per determinare la percentuale di compattazione di ciascun provino a determinati giri è stato possibile ricavare i parametri di Autoaddensamento (C_1) e Lavorabilità (k), indicativi della capacità del materiale di addensarsi in situ con le normali tecniche di compattazione. In particolare l'Autoaddensamento, misurato in laboratorio al primo giro della pressa, esprime il grado di compattazione che il materiale raggiunge nel corso della stessa con vibrofinitrice in situ, mentre il parametro k definisce la capacità del materiale di lasciarsi compattare sotto l'azione del rullo.

In Figura 3.1 viene illustrato un esempio di curva di compattazione risultante da una prova. Il grafo è semi-logaritmico con il numero di giri in ascissa e la percentuale di massima densità "non corretta" raggiunta in ordinata.

Nell'esempio riportato in Figura, grazie alla retta interpolante i dati di prova, è stato possibile calcolare il coefficiente C_1 che in questo caso è pari a 67,7% e la lavorabilità k pari a 7,09.

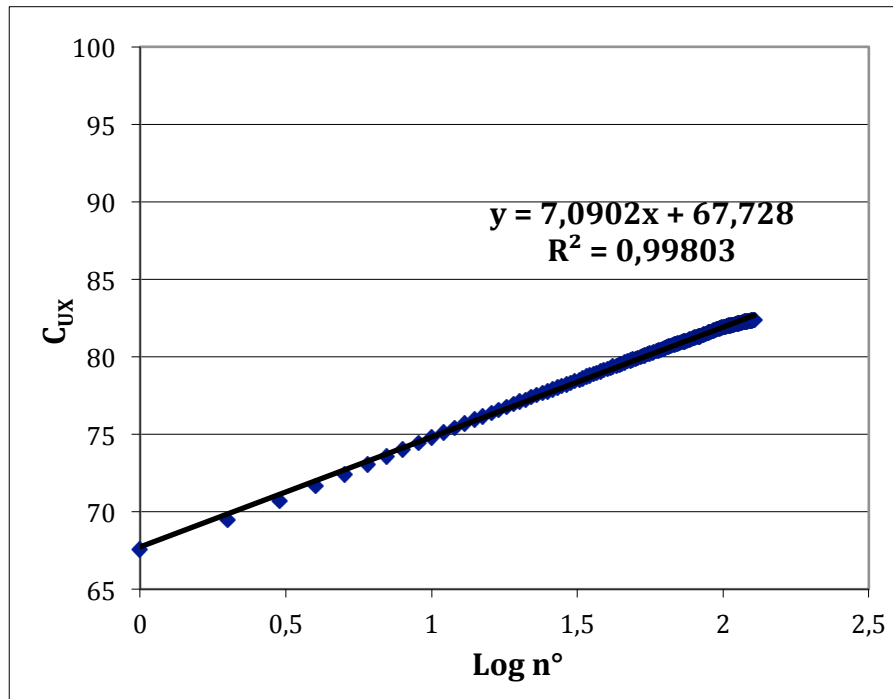


Figura 3.1 – Curva di compattazione con pressa a taglio giratorio

Gli indici di Lavorabilità (k) e di Autoaddensamento (C₁) relativi ai provini compattati con pressa a taglio giratorio sono riportati:

- in Tabella 3.2: C₁ e k del misto cementato fibro-rinforzato (MCF);
- in Tabella 3.3: C₁ e k del misto cementato senza fibre (MC).

Tabella 3.2- Compattazione con pressa a taglio giratorio – C₁ e k dei provini di MCF

	Autoaddensamento C ₁ [%]	Lavorabilità k [-]	Massa Volumica M.V. [g/cm ³]
MCF 1	67,6	7,27	2,21
MCF 2	67,6	7,36	2,21
MCF 3	67,7	7,09	2,21
MCF 4	67,1	7,54	2,21
MCF 5	68,2	6,85	2,21
MCF 6	67,7	7,73	2,21
MCF 7	67,3	7,23	2,21
MCF 8	67,3	7,05	2,21
MCF 9	69,4	6,06	2,21
MCF 10	68,4	7,05	2,21
MCF 11	68,0	7,08	2,21
MCF 12	67,6	7,44	2,21
MEDIA	67,8	7,15	2,21

Tabella 3.3- Compattazione con pressa a taglio giratorio – C1 e k dei provini di MC

	Autoaddensamento C₁ [%]	Lavorabilità k [-]	Massa Volumica M.V. [g/cm³]
MC 1	70,2	5,01	2,21
MC2	70,0	6,95	2,21
MC3	69,5	6,40	2,21
MC4	68,6	6,25	2,21
MC5	69,1	6,79	2,21
MC6	68,1	6,52	2,21
MC7	67,7	6,77	2,21
MC8	68,5	6,87	2,21
MC9	69,3	6,75	2,21
MC10	69,1	6,98	2,21
MC 11	68,5	6,97	2,21
MC 12	68,3	6,87	2,21
MEDIA	68,9	6,59	2,21

Dai risultati in tabella emerge una buona capacità di Autoaddensamento e di lavorabilità da parte di entrambi i materiali, con differenze non così evidenti. Si può quindi asserire che il materiale studiato è in grado di assicurare elevate prestazioni volumetriche all’atto della compattazione in sito.

Entrando nel merito delle misurazioni, si può notare come il parametro C₁ sia leggermente superiore per il misto cementato senza fibre, ma si deve considerare anche la variabilità dei valori ottenuti. Per questo motivo, è possibile effettuare un’ulteriore confronto tra i dati ottenuti in base al loro coefficiente di variazione, in modo tale determinare quale tra i due materiali offre una minor dispersione dei dati.

Si calcola, quindi, dapprima la varianza σ con l’equazione:

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_{ik} - \bar{x}_k)^2}{n - 1}$$

per poi determinare la deviazione standard:

$$\sigma_k = \sqrt{\sigma_k^2}$$

ed infine il coefficiente di variazione è così calcolato:

$$CV_k = \frac{\sigma_k}{\bar{x}_k}$$

Dove:

- x_{ik} = valore di C_1 o k riferito all' i -esimo provino per la miscela k ;
- \bar{x}_k = valore medio di C_1 o k per la miscela k ;
- n = numero di provini della miscela k .

I valori dei coefficienti di variazione ottenuti sono riportati nella seguente Tabella:

Tabella 3.4 – Coefficiente di variazione di C_1 e k per MCF e MC

		C_1	k
MCF	MEDIA	67,8	7,15
	CV	0,0093	0,059
MC	MEDIA	68,9	6,59
	CV	0,0109	0,084

Dai valori ottenuti è possibile dedurre che l'Autoaddensamento per la miscela di misto cementato rinforzato con fibre è in media leggermente minore rispetto a quello del misto cementato senza fibre, ma quest'ultimo ha una dispersione dei dati superiore. Inoltre, per quanto riguarda la lavorabilità, per la miscela oggetto di analisi si è ottenuto un valore superiore rispetto a quella di riferimento, con un coefficiente di variazione minore.

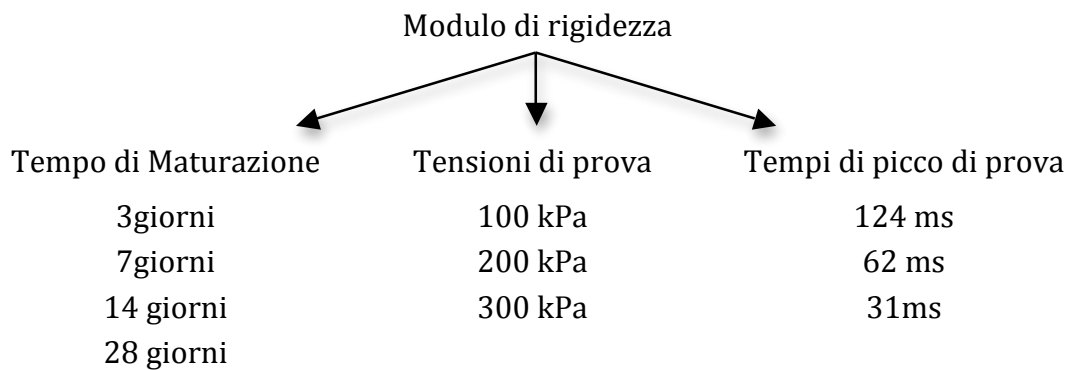
La differenza di lavorabilità è probabilmente da imputarsi al fatto che le fibre polipropileniche fibrillate, sebbene causino una lieve diminuzione delle prestazioni della miscela in termini di Autoaddensamento, giovano alla lavorabilità favorendo lo scorrimento reciproco dei singoli aggregati migliorando la compattazione.

Quindi, in riferimento alle lavorazioni in situ, sebbene l'aggiunta di fibre al materiale lo porta ad raggiungere un grado di compattazione minore nel corso della stessa con vibrofinitrice (Autoaddensamento), la sua capacità di lasciarsi compattare sotto l'azione del rullo aumenta (Lavorabilità).

Al termine della fase di compattazione, i provini sono stati collocati in una camera di maturazione da cui verranno prelevati dopo 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione per effettuare le prove atte a valutare la variazione delle caratteristiche meccaniche, quali modulo di rigidità e resistenza a trazione indiretta, in funzione del tempo e dei parametri di prova.

3.2 Caratterizzazione Meccanica

I provini compattati con pressa giratoria, soggetti alla caratterizzazione volumetrica, sono stati sottoposti a prove atte a valutare le loro prestazioni meccaniche a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione. Di seguito verranno riportati, descritti e analizzati i dati ottenuti dapprima con le prove effettuate con macchina dinamica e successivamente di resistenza a trazione indiretta. Inoltre, per la prima delle due prove è stato possibile effettuare considerazioni anche in merito alla variazione del modulo di rigidezza rilevato, in funzione delle modifiche apportate a due parametri di prova: tensione imposta e tempo di picco. Le successive valutazioni seguiranno, quindi, il seguente schema di analisi:



I dati ottenuti si prestano ad un confronto tra il materiale soggetto a verifica in questa tesi, cioè il misto cementato con aggiunta di fibre polipropileniche fibrillate, e il materiale di confronto senza fibre.

Si premette che per la descrizione delle caratteristiche meccaniche dei provini si procederà analizzando i due tipi di miscele separatamente, per poi effettuare un confronto finale dei risultati ottenuti.

3.2.1 Resistenza a Trazione Indiretta

Sebbene la prova di trazione indiretta sia stata eseguita sui provini che sono stati precedentemente testati tramite la prova con macchina dinamica, si è deciso di anteporre questa parte in modo poter svolgere delle considerazioni nel prossimo Paragrafo atte a sostenere delle decisioni in merito alle prove effettuate.

3.2.1.1 Misto Cementato con Fibre – MCF

In Tabella 3.5 sono riportati i valori di Resistenza a Trazione Indiretta (RTI) medi ottenuti ai quattro tempi di maturazione. In aggiunta, si calcolano gli aumenti in percentuale “relativi”, cioè rispetto alle misurazioni rilevate durante la precedente rilevazione, e “assoluti”, cioè in rapporto al valore di RTI ottenuto dopo 3 giorni di maturazione.

Tabella 3.5 – Valori di RTI del MCF a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione

	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
RTI [MPa]	0,328	0,475	0,652	0,749
Aumento relativo [%]	-	44,6%	37,3%	14,9%
Aumento assoluto [%]	-	44,6%	98,5%	128,2%

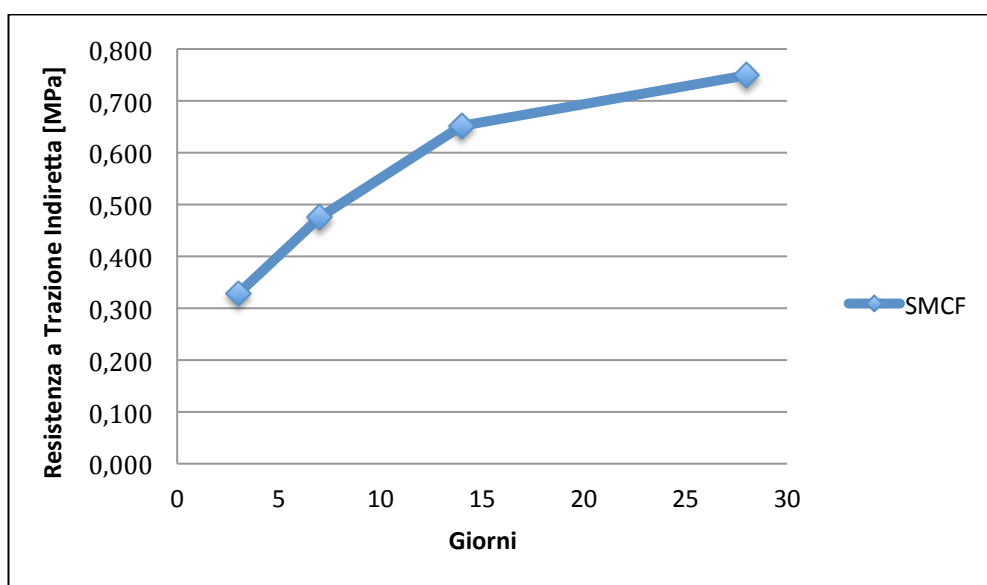


Figura 3.2- Crescita della RTI del MCF a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione

Come era da aspettarsi, la Resistenza a Trazione Indiretta aumenta all'aumentare dei giorni di maturazione, in quanto le reazioni di idratazione, portano un aumento della resistenza meccanica del materiale. In particolare, la RTI rilevata a 28 giorni è pari a 0,75 MPa, più del doppio rispetto a quella ottenuta a 3 giorni.

Per quanto riguarda gli aumenti "relativi", si ha un'importante crescita di circa il 40% ogni 7 giorni di maturazione fino ai 14 giorni. In termini assoluti, le prestazioni meccaniche del materiale raddoppiano già al quattordicesimo giorno. L'ultima prova effettuata dopo 28 giorni di maturazione ha visto un aumento "relativo" solo del 15%, quindi si può affermare che le reazioni di idratazione progrediscono sino al quattordicesimo giorno per poi rallentare fino quasi ad esaurirsi al ventottesimo giorno.

Se si considera la RTI raggiunta a 28 giorni come la resistenza massima del materiale, già dopo 7 giorni si ottiene il 60% di tale valore, per raggiungere il 90% a 14 giorni.



Figura 3.3 – Provino di MCF rotto tramite prova Brasiliana

3.2.1.2 Misto Cementato senza Fibre – MC

In Tabella 3.6 sono riportati i valori di Resistenza a Trazione Indiretta (RTI) medi ottenuti ai quattro tempi di maturazione. In aggiunta, si calcolano gli aumenti in percentuale “relativi” e “assoluti”.

Tabella 3.6-Valori di RTI del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione

	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
RTI [MPa]	0,217	0,323	0,464	0,511
Aumento relativo [%]	-	48,9%	43,3%	10,1%
Aumento assoluto [%]	-	48,9%	113,4%	135,0%

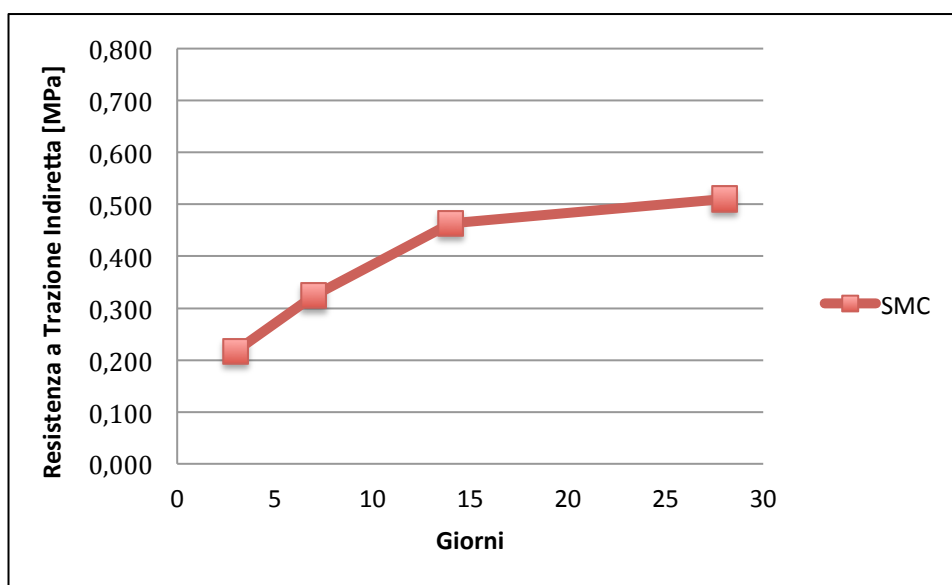


Figura 3.4- Crescita della RTI del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni di maturazione

I provini confezionati con la miscela senza aggiunta di fibre, testati con la prova Brasiliana, hanno fornito dei valori di RTI crescenti nel tempo, raggiungendo un valore di 0,51 MPa a 28 giorni di maturazione.

La crescita maggiore delle caratteristiche meccaniche è avvenuta nei primi quattordici giorni di maturazione, dopo i quali, il valore di RTI è più che raddoppiato rispetto a quello rilevato a 3 giorni di maturazione.

Se si considera la RTI raggiunta a 28 giorni come la resistenza a trazione massima del materiale, già dopo 7 giorni di maturazione si ottiene il 60% di tale valore, per raggiungere il 90% a 14 giorni.

3.2.1.3 Confronto delle resistenze a trazione indiretta tra i il MCF e il MC

Si effettua ora un confronto tra i dati ottenuti dalle due miscele. In Tabella 3.7 sono riproposti i valori precedentemente analizzati per il MCF e per il MC, con la variazione percentuale della resistenza a trazione indiretta del MCF rispetto a quella del MC.

Tabella 3.7 – Confronto tra valori di RTI del MCF e del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni

	3 gg		7 gg		14 gg		28 gg	
RTIMC [MPa]	0,217	-	0,323	-	0,464	-	0,511	-
RTIMCF [MPa]	0,328	+51%	0,475	+47%	0,652	+41%	0,749	+47%

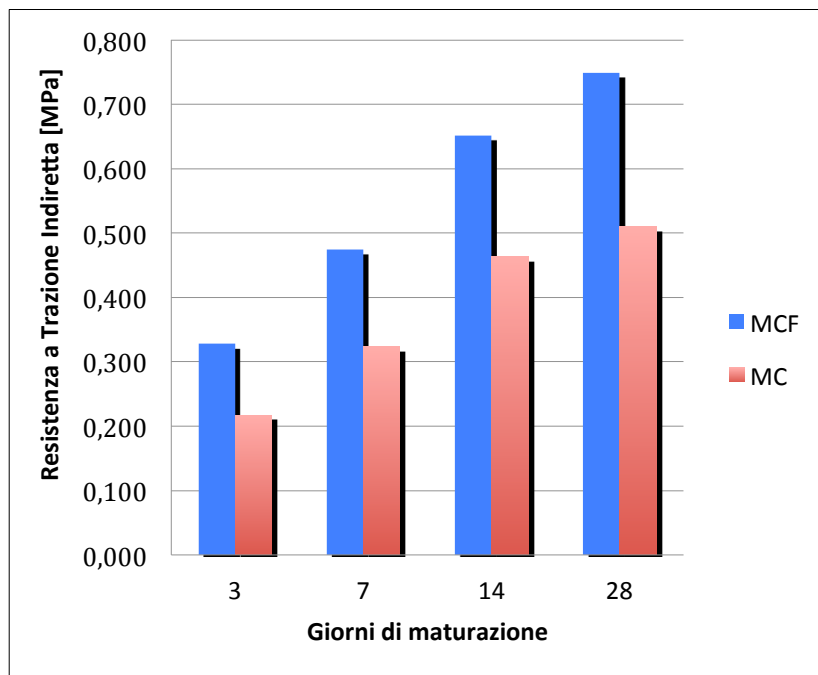


Figura 3.5 – Confronto tra valori di RTI del MCF e del MC a 3, 7, 14 e 28 giorni

I dati riportati in Tabella 3.7 sono riproposti nel grafico di Figura 3.5 in modo che la differenza della risposta dei due materiali sia maggiormente evidente. Infatti, si può notare come il rateo di crescita sia praticamente identico per entrambi con la differenza che l'aggiunta di fibre nella miscela porta ad avere un valore di RTI sempre superiore del 50% circa rispetto a quello ottenuto per la miscela di riferimento.

3.2.2 Modulo di rigidezza

I risultati ottenuti per mezzo delle prove con macchina dinamica sono stati riportati in modo da definire le relazioni intercorrenti tra i valori di modulo di rigidezza misurati dal macchinario e i parametri di prova impostati dall'operatore. La trattazione è impostata come segue:

- stabilire le relazioni intercorrenti tra i valori di modulo e la frequenza di carico e la tensione imposta per il misto cementato fibro-rinforzato;
- stabilire le relazioni intercorrenti tra i valori di modulo e la frequenza di carico e la tensione imposta per il misto cementato senza fibre;
- effettuare un confronto tra i risultati ottenuti per i due materiali;
- valutazioni critiche sulla variazione del modulo di rigidezza all'aumentare del tempo di maturazione e confronto tra le prestazioni meccaniche raggiunte dai due materiali a confronto.

Prima di intraprendere l'analisi dei dati ottenuti è doveroso precisare quanto segue:

- non sono disponibili i dati di modulo a 3 e 7 giorni di maturazione, per le prove effettuate a 300 kPa di tensione imposta. Ciò è facilmente spiegabile osservando i dati delle prove di resistenza a trazione indiretta riportati nel Paragrafo 3.2.1, dove è chiaramente visibile che, al settimo giorno dal confezionamento dei provini, entrambi i materiali hanno sviluppato delle prestazioni meccaniche non sufficientemente elevate da sopportare delle tensioni di prova di 300 kPa. A queste tensioni, il materiale raggiungerebbe la rottura o risulterebbe troppo stressato restituendo dei dati di modulo non veritieri;
- un'ulteriore osservazione è da farsi in merito alle prove eseguite a 31 ms di tempo di picco, in quanto, ad una così elevata frequenza di carico, si raggiungono i limiti operativi del macchinario il quale, per trasmettere al provino la tensione di prova voluta, imprime dei carichi a volte superiori a quelli impostati con la logica conseguenza che il modulo risultante si discosta leggermente per difetto da quello effettivo.

3.2.2.1 Misto Cementato con Fibre – MCF

Si inizierà la trattazione dei dati ottenuti dalle prove eseguite sul solo misto cementato rinforzato con fibre. Per ogni tempo di maturazione sono stati testati tre provini, e i valori medi dei moduli di rigidezza così ottenuti sono stati riportati in Tabella 3.8, in funzione di tre diverse tensioni di prova e tre tempi di picco imposti.

Tabella 3.8 – Valori di modulo di rigidezza del MCF testato con macchina dinamica

		3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]
100	124	10689	12901	17447	22366
	62	9345	10976	15069	20428
	31	8679	9169	13145	16170
200	124	8682	11858	14987	19229
	62	7363	10284	13597	16741
	31	6379	8702	12697	15192
300	124			13878	17552
	62			13050	16085
	31			11626	14747

Grazie ai dati raccolti è stato possibile stimare in che misura la tensione di prova e il tempo di picco imposti hanno influenza sui dati di modulo restituiti dalle prove. Per raggiungere questo scopo, verrà effettuato un confronto tra la variazione percentuale del modulo di rigidezza al variare di uno dei due parametri, mantenendo invariato il valore del secondo, per i quattro tempi di maturazione. Confrontando le variazioni medie così ottenute, con quelle valutate per la miscela di riferimento senza l'aggiunta di fibre, sarà possibile chiarire se le fibre portano sostanziali cambiamenti delle prestazioni meccaniche del misto cementato in funzione dei parametri di prova.

Variazione del modulo in funzione del tempo di picco

Si procede ora alla valutazione del modulo di rigidezza del materiale ponendo costante la tensione di prova e variando i tempi di picco. I dati ottenuti sono riportati in grafici in cui i tempi di maturazione sono posti in ascissa e i moduli di rigidezza in ordinata. In aggiunta si riporta la variazione percentuale del modulo in funzione di un modulo di riferimento che è quello rilevato per 124 ms di tempo di picco.

Nelle Figure e nelle Tabelle riportate di seguito sono rappresentati:

- Figura 3.6 e Tabella 3.9: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e del tempo di picco per una tensione imposta di 100 kPa;
- Figura 3.7 e Tabella 3.10: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e del tempo di picco per una tensione imposta di 200 kPa;
- Figura 3.8 e Tabella 3.11: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e del tempo di picco per una tensione imposta di 300 kPa.

Questa analisi non si basa sulla valutazione del valore del modulo di rigidezza al variare dei parametri, bensì sulla variazione percentuale che intercorre tra il modulo, preso come riferimento, e gli altri a diversi valori di tempi di carico. Se tali variazioni si mantengono pressoché costanti per ogni tensione di prova e per ciascun dei quattro giorni di maturazione, allora si potrà concludere che, sebbene il tempo di imposizione del carico provoca una diversa rilevazione del modulo in termini assoluti, la risposta del materiale è indipendente dalla frequenza di carico imposta per le prove.

Dopo aver effettuato lo stesso studio anche sui provini confezionati senza l'aggiunta di fibre, effettuando un confronto tra i dati, sarà possibile stabilire se sussistono le stesse relazioni per entrambi i materiali. In tal modo si verificherà se e come le fibre influenzano i dati in funzione dalla variazione del tempo di picco.

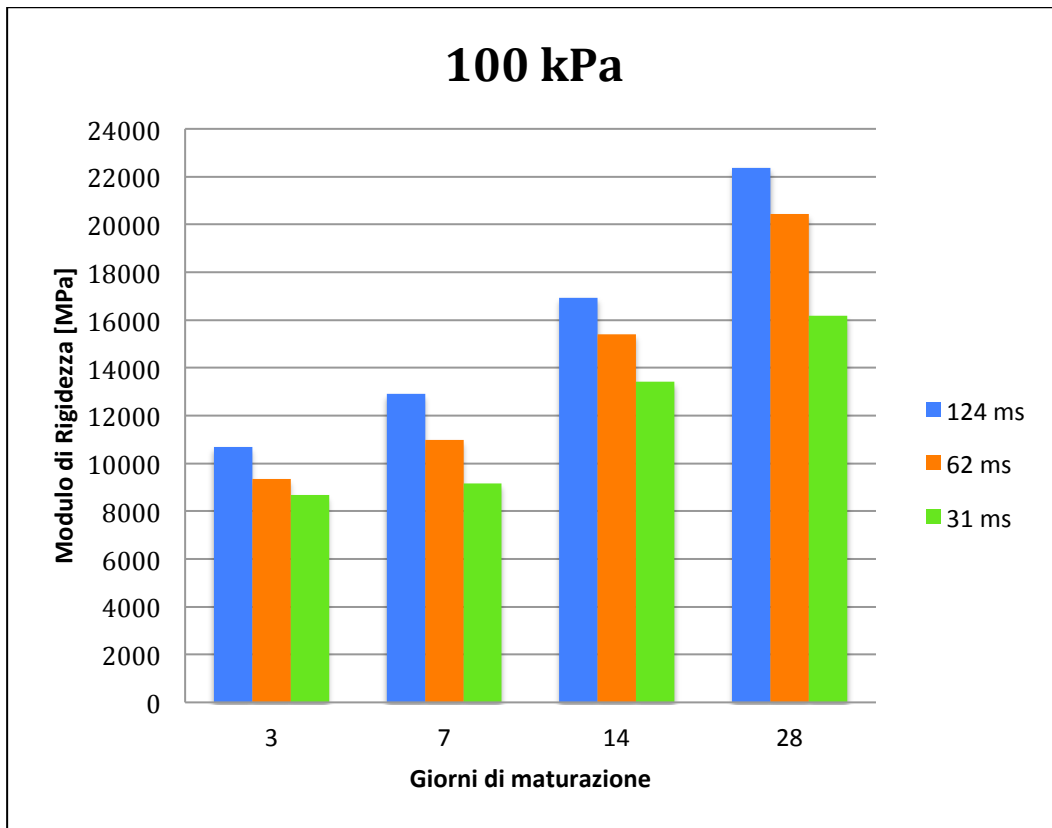


Figura 3.6- Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MCF

Tabella 3.9 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MCF

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
100	124	-	-	-	-	-
	62	-12,6%	-14,9%	-9,1%	-8,7%	-12%
	31	-18,8%	-28,9%	-20,8%	-27,7%	-25%

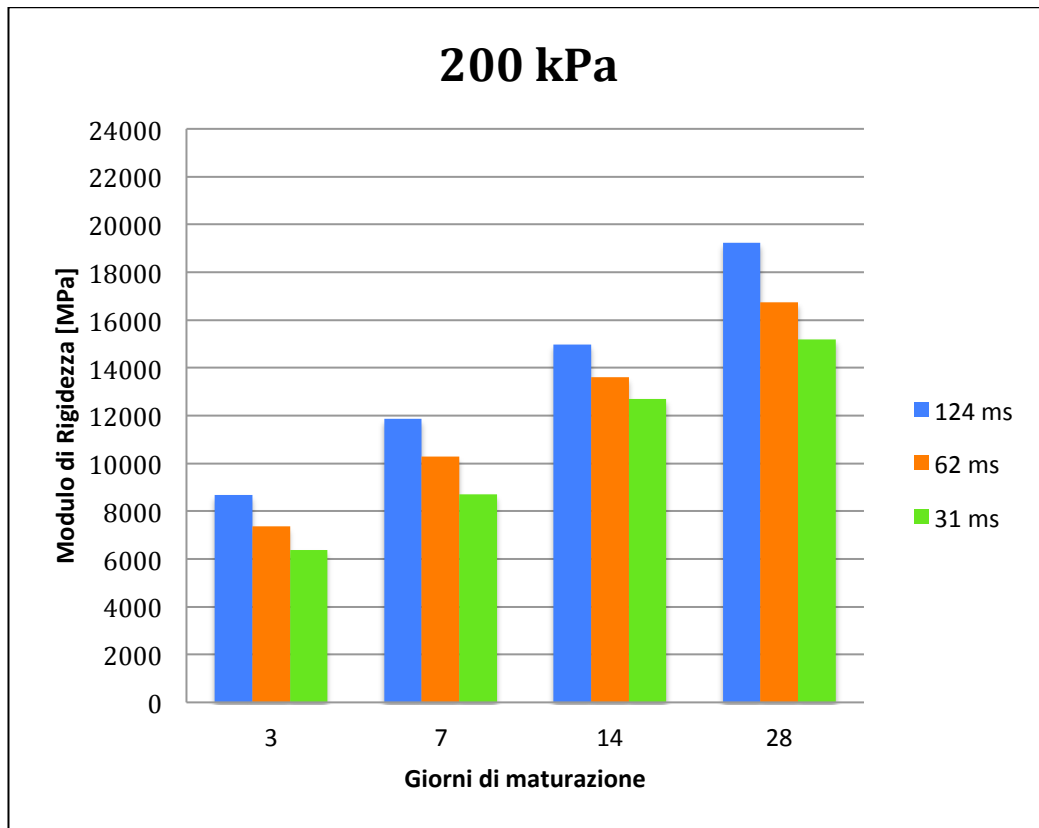


Figura 3.7- Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MCF

Tabella 3.10 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MCF

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
200	124	-	-	-	-	-
	62	-15,2%	-13,3%	-9,3%	-12,9%	-13%
	31	-26,5%	-26,6%	-15,3%	-21,0%	-22%

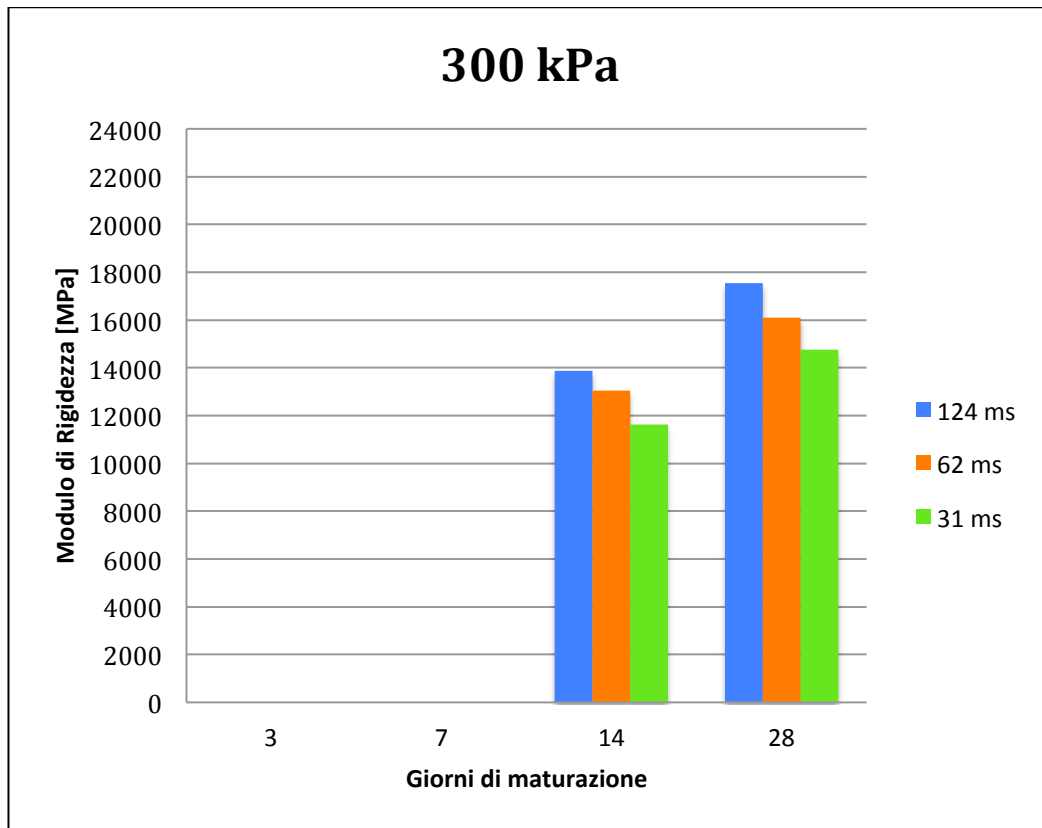


Figura 3.8- Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MCF

Tabella 3.11 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MCF

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
300	124	-	-	-	-	-
	62	NV*	NV	-6,0%	-8,4%	-7%
	31	NV	NV	-16,2%	-16,0%	-16%

(*) NV = Non Valutato

Si riportano nella seguente Tabella 3.12 i valori percentuali delle variazioni medie calcolate per agevolare le operazioni di confronto dei risultati:

Tabella 3.12 - Media delle variazioni del modulo in funzione dei tempi di picco per MCF

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	MEDIA VARIAZIONI
100	124	-
	62	-12 %
	31	-25 %
200	124	-
	62	-13 %
	31	-22 %
300	124	-
	62	-7 %
	31	-16 %

Come accennato precedentemente, non sono disponibili i dati a 3 e 7 giorni di maturazione, per le prove effettuate a 300 kPa di tensione imposta. Ciò è facilmente spiegabile osservando i dati delle prove di resistenza a trazione indiretta ottenuti a 3 e 7 giorni (Paragrafo 3.2.1.1): i valori riscontrati portano a definire una RTI a 3 giorni che è leggermente superiore ai 0,30 MPa e una RTI a 7 giorni pari a 0,47 Mpa. Si è quindi deciso di non effettuare prove ad una tensione di 300 kPa per evitare la rottura dei provini a 3 giorni di maturazione e per evitare di ottenere dei dati falsati dall'eccessivo stress di prova a 7 giorni. Per quanto detto non si hanno dati di raffronto a questa tensione nei primi giorni di maturazione.

Dopo queste osservazioni preliminari, è possibile effettuare valutazioni di tipo qualitativo in merito ai dati riportati nei grafici. Si evidenzia che in tutti i casi analizzati, per ognuna delle tre tensioni imposte, a parità di tempo di maturazione si nota una diminuzione dei moduli ottenuti all'aumentare della frequenza di carico. Una seconda osservazione che nasce dall'esame dei grafici è che, per una data frequenza di carico, all'aumentare dei giorni di maturazione si ha un aumento del modulo di rigidità indipendentemente dalla tensione che viene imposta.

Si effettuano ora delle valutazioni di tipo quantitativo in merito alle variazioni dei moduli, osservando i dati numerici tabellati.

Osservando i grafici ottenuti per 100 kPa e 200 kPa di tensione imposta, si può notare che la variazione del modulo di rigidezza passando da 124 ms a 62 ms di tempo si picco, per un dato tempo di maturazione, è mediamente pari a 12%-13%, valore che aumenta attestandosi al 20%-25% diminuendo ulteriormente il tempo di picco a 31ms.

Per le prove effettuate a 300 kPa di tensione imposta, i valori di variazione del modulo ottenuti, rilevati solamente a 14 e 28 giorni di maturazione, sono inferiori ai precedenti. Il decremento medio del modulo, passando da 124 ms a 62 ms, è del 7% e aumenta al 16% riducendo la frequenza di carico a 31 ms. Rispetto a quanto riscontrato per le prove effettuate alle tensioni di 100 kPa e 200 kPa, il primo valore è circa la metà, mentre il secondo raggiunge i 2/3. Se si effettua un'analisi più disaggregata dei dati a 100 kPa e 200 kPa, si può osservare che le variazioni di modulo a 14 e 28 giorni di maturazione hanno un andamento che è molto simile a quello ottenuto per 300 kPa di tensioni allo stesso tempo di maturazione. Si ha quindi una variazione del modulo di rigidezza che è leggermente inferiore per i provini che hanno subito una maggiore maturazione, ma in generale mantengono una certa costanza dei valori.

Si può quindi concludere che i provini confezionati con la miscela di misto cementato fibro-rinforzato, per una determina frequenza di carico sono soggetti ad un aumento del modulo di rigidezza all'aumentare della maturazione, e subiscono una riduzione del modulo di rigidezza all'aumentare del tempo di picco, ma tale riduzione è in media costante e in generale indipendente dalla tensione e leggermente condizionata dal tempo di maturazione.

Variazione del modulo in funzione della tensione imposta

Si procede ora alla valutazione del modulo di rigidezza del materiale ponendo costante il tempo di picco e variando la tensione di prova. I dati ottenuti sono riportati in grafici in cui i tempi di maturazione sono posti in ascissa e i moduli di rigidezza in ordinata. In aggiunta si riporta la variazione percentuale del modulo in funzione di un modulo di riferimento che è quello rilevato a 100 kPa di tensione imposta.

Nelle Figure riportate di seguito sono rappresentati:

- Figura 3.9 e Tabella 3.13: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e della tensione di prova per tempo di picco di 124 ms;
- Figura 3.10 e Tabella 3.14: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e della tensione di prova per tempo di picco di 62 ms;
- Figura 3.11 e Tabella 3.15: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e della tensione di prova per tempo di picco di 31 ms.

Questa analisi ricalca nel metodo quella precedente. Anche questa non si basa sulla valutazione del valore del modulo di rigidezza al variare dei parametri, bensì sulla variazione percentuale che intercorre tra il modulo, preso come riferimento, e gli altri a diversi valori di tensione imposta.

Dopo aver effettuato lo stesso studio anche sui provini confezionati senza l'aggiunta di fibre, effettuando un confronto tra i dati, sarà possibile stabilire se sussistono le stesse relazioni per entrambi i materiali. In tal modo si verificherà se e come le fibre influenzano i dati in funzione dalla variazione della tensione imposta.

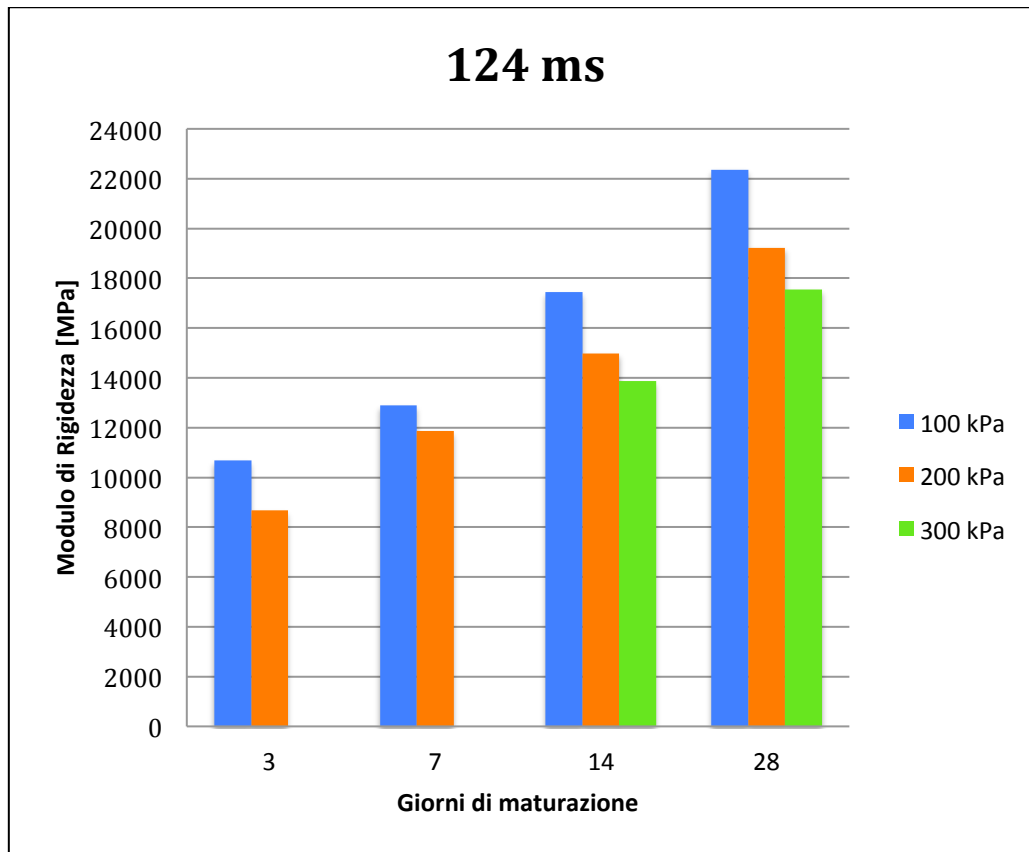


Figura 3.9 - Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MCF

Tabella 3.13 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MCF

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
124	100	-	-	-	-	-
	200	-18,8%	-8,1%	-14,1%	-14,0%	-14%
	300	NV	NV	-20,5%	-21,5%	-21%

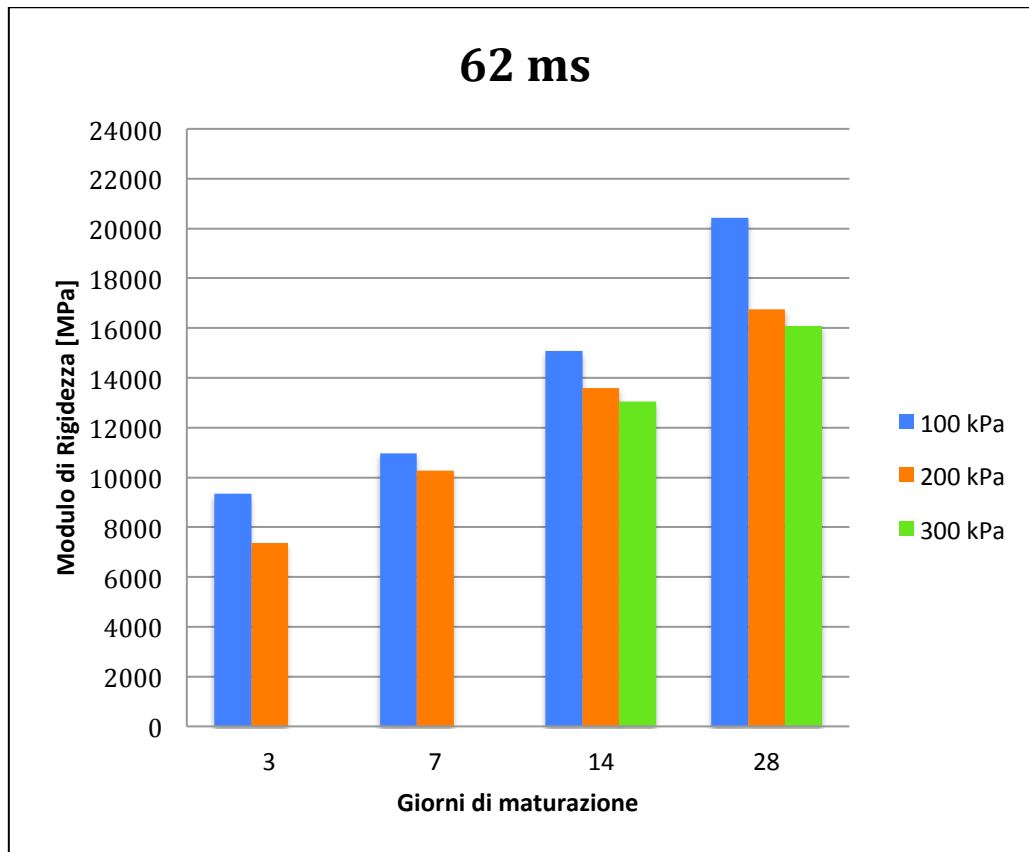


Figura 3.10- Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MCF

Tabella 3.14 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MCF

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
62	100	-	-	-	-	-
	200	-21,2%	-6,3%	-9,8%	-18,0%	-14%
	300	NV	NV	-13,4%	-21,3%	-17%

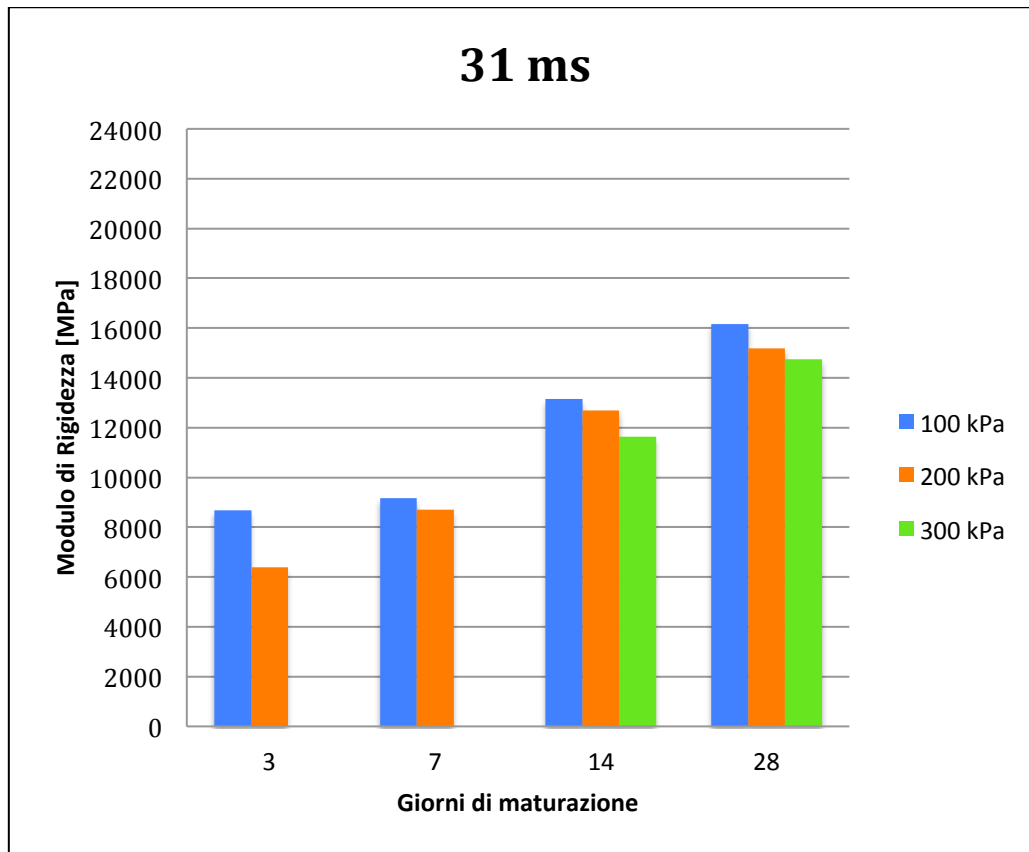


Figura 3.11 - Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 31 ms per MCF

Tabella 3.15 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 31ms per MCF

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
31	100	-	-	-	-	-
	200	-26,5%	-5,1%	-3,4%	-6,1%	-10%
	300	NV	NV	-11,5%	-8,8%	-10%

Si riporta nella seguente Tabella 3.16 i valori percentuali delle variazioni medie calcolate per agevolare le operazioni di confronto dei risultati:

Tabella 3.16 - Media delle variazioni del modulo funzione delle tensioni imposte per MCF

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	MEDIA VARIAZIONI
124	100	-
	200	-14 %
	300	-21 %
62	100	-
	200	-14 %
	300	-17 %
31	100	-
	200	-10 %
	300	-10 %

Anche in questo caso, per quanto detto precedentemente, non sono disponibili i dati a 3 e 7 giorni di maturazione, per le prove effettuate a 300 kPa di tensione imposta.

Osservando i grafici, è possibile evidenziare che in tutti i casi analizzati, per ognuna dei tre tempi di picco, a parità di tempo di maturazione si nota una diminuzione dei moduli ottenuti all'aumentare della tensione imposta. Una seconda osservazione, che nasce dall'esame dei grafici, è che, per una data tensione imposta, all'aumentare dei giorni di maturazione si ha un aumento del modulo di rigidezza indipendentemente dalla tensione che viene imposta.

Dopo queste prime osservazioni di carattere generale, è possibile effettuare valutazioni di tipo quantitativo in merito alle variazioni dei moduli.

Osservando i valori ottenuti per 124 ms e a 62 ms di tempo di picco, si può notare che la riduzione del modulo di rigidezza passando da 100 kPa a 200 kPa, per un dato tempo di maturazione, è mediamente pari al 14%, valore che aumenta attestandosi al 17%-21% per 300 kPa di tensione.

Per le prove effettuate a 31 ms di frequenza di carico, i valori di variazione del modulo ottenuti, sono inferiori ai precedenti. La variazione media del modulo, passando da 100 kPa a 200 kPa, è del -10% e rimane costante aumentando la tensione a 300 kPa. Rispetto a quanto riscontrato per le prove effettuate alle

frequenza di carico di 124 ms e 62 ms, il primo valore è in linea con questi, mentre il secondo è circa la metà.

Se si effettua un'analisi più disaggregata dei dati per tutti i tempi di picco, si può notare che a 3 giorni di maturazione, per ciascuno dei tre tempi di picco, si ha un decremento notevole del modulo di rigidezza aumentando la tensione di prova da 100 kPa a 200 kPa, pari a circa il 20%, mentre per le prove effettuate nei giorni successivi questa diminuzione è decisamente inferiore. Si ha quindi una variazione del modulo di rigidezza che è inferiore per i provini che hanno subito una maggiore maturazione; da ciò si deduce che dai 7 giorni di maturazione in poi la variazione dei valori di modulo mantiene in generale una certa costanza.

Si può quindi concludere che i provini confezionati con la miscela di misto cementato fibro-rinforzato, per una determinata tensione di prova sono soggetti ad un aumento del modulo di rigidezza all'aumentare della maturazione, e subiscono una riduzione del modulo di rigidezza all'aumentare della tensione imposta, ma tale riduzione è in media costante e indipendente sia dalla frequenza di carico che dal tempo di maturazione, a meno dei primi giorni dalla compattazione in cui il modulo è particolarmente influenzato dalla tensione di prova.

3.2.2.2 Misto Cementato senza Fibre – MC

Dopo aver effettuato un’attenta valutazione della dipendenza del modulo di rigidità rilevato dai parametri di prova per il misto cementato fibro-rinforzato, si effettua ora la stessa analisi per il materiale senza aggiunta di fibre. Per ogni tempo di maturazione sono stati testati tre provini, e i valori medi dei moduli di rigidità così ottenuti sono stati riportati in Tabella 3.17, in funzione di tre diverse tensioni di prova e tre tempi di picco imposti.

Tabella 3.17 - Valori di modulo di rigidità del MC testato con macchina dinamica

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
		Modulo di rigidità [MPa]	Modulo di rigidità [MPa]	Modulo di rigidità [MPa]	Modulo di rigidità [MPa]
100	124	9519	11100	13411	17575
	62	9110	9820	11914	16431
	31	8003	8608	11247	14045
200	124	8293	8987	12203	15071
	62	6919	7804	11546	14214
	31	5275	7035	10899	13255
300	124			11479	12995
	62			10746	12301
	31			10405	11362

Grazie ai dati raccolti è stato possibile stimare in che misura la tensione di prova e il tempo di picco imposti hanno influenza sui dati di modulo restituiti dalle prove. Per raggiungere questo scopo, verrà effettuato un confronto tra la variazione percentuale del modulo di rigidità al variare di uno dei due parametri, mantenendo invariato il valore del secondo, per i quattro tempi di maturazione.

Variazione del modulo in funzione del tempo di picco

Si procede ora alla valutazione del modulo di rigidezza del materiale ponendo costante la tensione di prova e variando i tempi di picco. I dati ottenuti sono riportati in grafici in cui i tempi di maturazione sono posti in ascissa e i moduli di rigidezza in ordinata. In aggiunta si riporta la variazione percentuale del modulo in funzione di un modulo di riferimento che è quello rilevato per 124 ms di tempo di picco.

Nelle Figure e nelle Tabelle riportate di seguito sono rappresentati:

- Figura 3.12 e Tabella 3.18: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e del tempo di picco per una tensione imposta di 100 kPa;
- Figura 3.13 e Tabella 3.19: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e del tempo di picco per una tensione imposta di 200 kPa;
- Figura 3.14 e Tabella 3.20: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e del tempo di picco per una tensione imposta di 300 kPa.

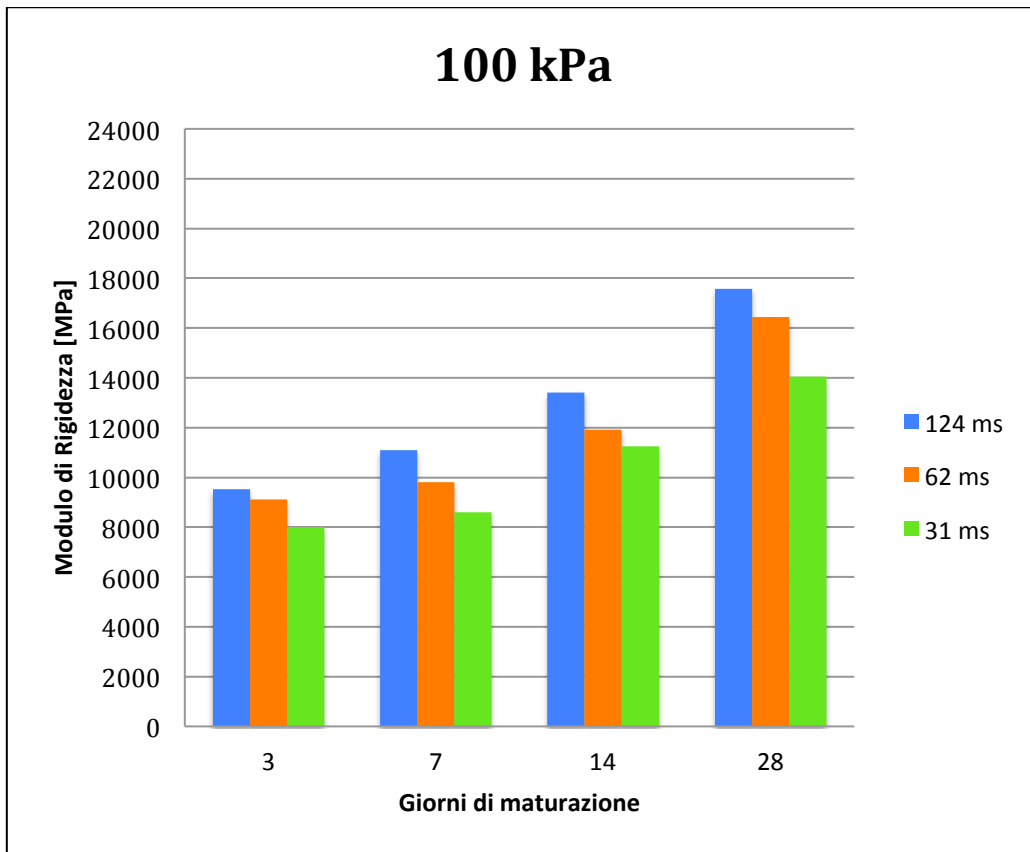


Figura 3.12- Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MC

Tabella 3.18 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 100 kPa per MC

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
100	124	-	-	-	-	-
	62	-4,3%	-11,5%	-11,2%	-6,5%	-8%
	31	-15,9%	-22,4%	-16,1%	-20,1%	-18%

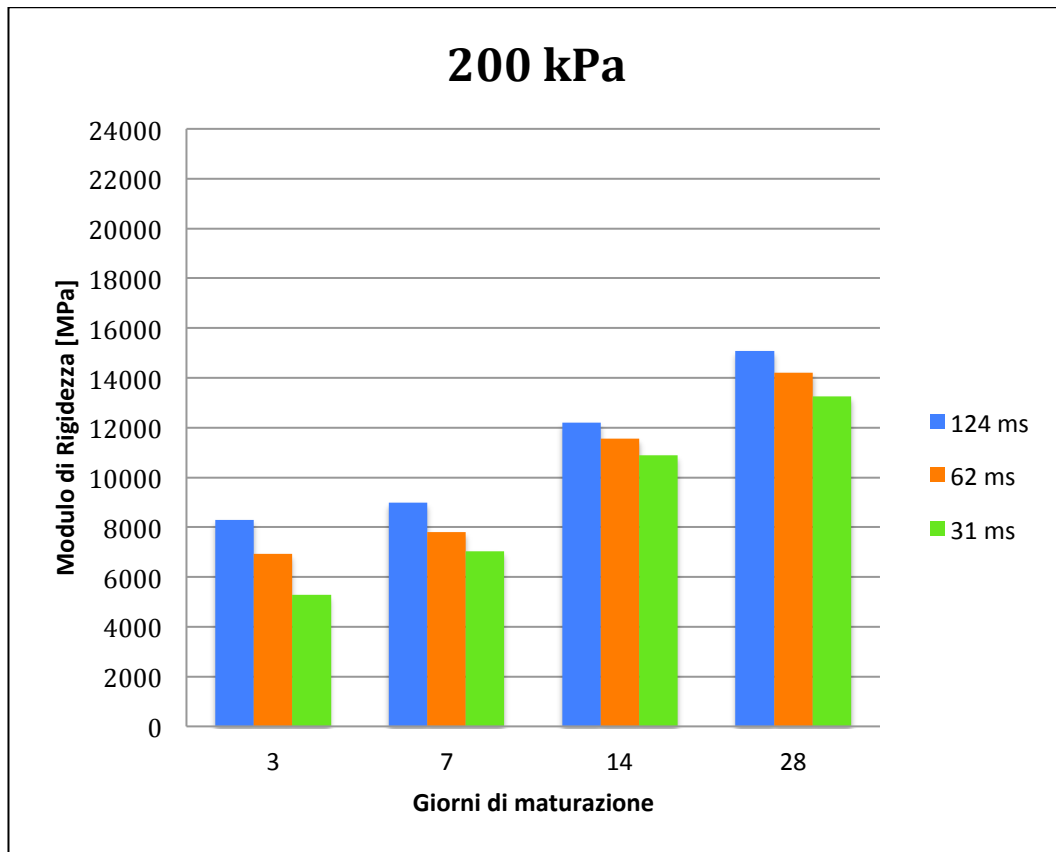


Figura 3.13- Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MC

Tabella 3.19 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 200 kPa per MC

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
200	124	-	-	-	-	-
	62	-16,6%	-13,2%	-5,4%	-5,7%	-10%
	31	-36,4%	-21,7%	-10,7%	-12,0%	-20%

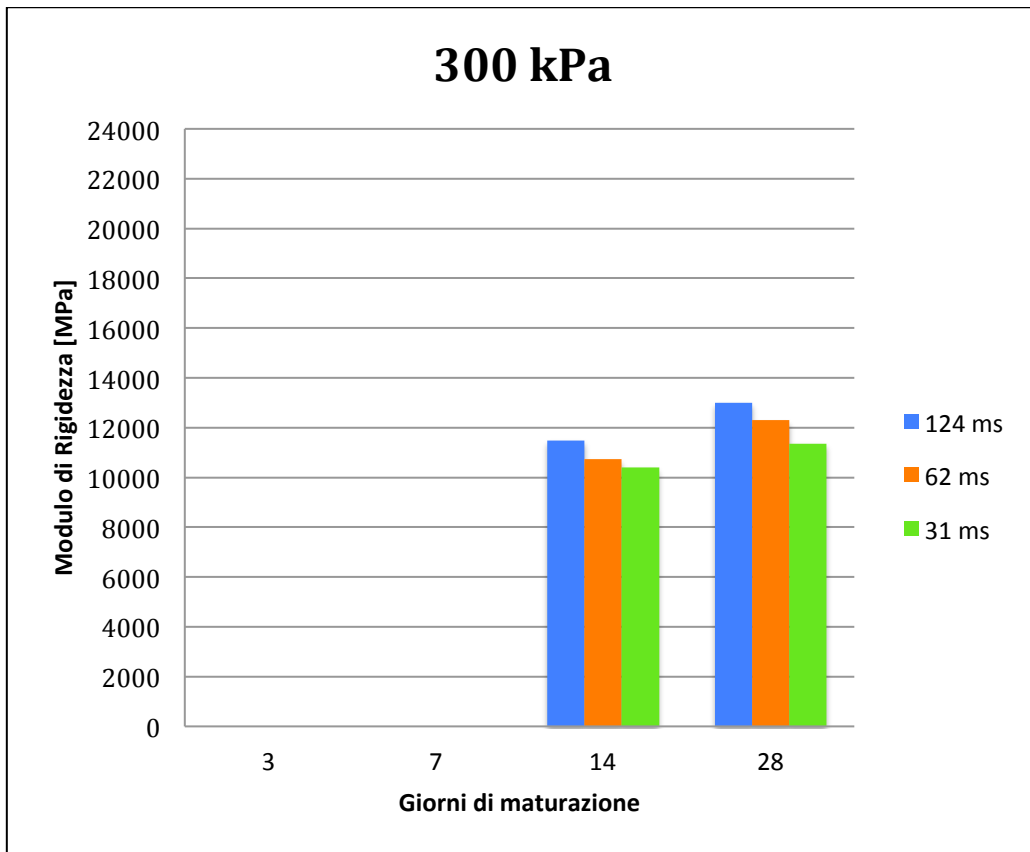


Figura 3.14- Variazione del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MC

Tabella 3.20 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco a 300 kPa per MC

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
300	124	-	-	-	-	-
	62	NV	NV	-6,4%	-5,3%	-6%
	31	NV	NV	-9,4%	-12,6%	-11%

Si riporta nella seguente Tabella 3.21 i valori percentuali delle variazioni medie calcolate per agevolare le operazioni di confronto dei risultati:

Tabella 3.21 - Media delle variazioni del modulo in funzione dei tempi di picco per MC

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	MEDIA VARIAZIONI
100	124	-
	62	-8 %
	31	-18 %
200	124	-
	62	-10 %
	31	-20 %
300	124	-
	62	-6 %
	31	-11 %

Anche per le prove con macchina dinamica realizzate su provini in misto cementato senza fibre, non sono presenti i dati a 3 e 7 giorni di maturazione, per le prove effettuate a 300 kPa di tensione imposta. Ciò si spiega osservando i dati delle prove di resistenza a trazione indiretta ottenuti a 3 e 7 giorni (Paragrafo 3.2.1.2): i valori riscontrati portano a definire un RTI a 3 giorni che è di 0,21 MPa e un RTI a 7 giorni pari a 0,32 MPa. Se su tali provini venisse applicata una tensione di 300 kPa, si stresserebbero eccessivamente, giungendo quasi sicuramente a rottura.

Osservando i grafici, è possibile evidenziare che in tutti i casi analizzati, per ognuna delle tre tensioni imposte, a parità di tempo di maturazione si nota una diminuzione dei moduli ottenuti all'aumentare della frequenza di carico. Una seconda osservazione che nasce dall'esame dei grafici è che, per una data frequenza di carico, all'aumentare dei giorni di maturazione si ha un aumento del modulo di rigidezza indipendentemente dalla tensione che viene imposta.

Dopo queste prime osservazioni di carattere generale, è possibile effettuare valutazioni di tipo quantitativo in merito alle variazioni dei moduli.

Osservando i grafici ottenuti per 100 kPa e 200 kPa di tensione imposta, si può notare che la riduzione del modulo di rigidezza passando da 124 ms a 62 ms di tempo si picco, per un dato tempo di maturazione, è mediamente pari a 8%-10%,

valore che aumenta attestandosi al 18%-20% diminuendo ulteriormente la frequenza di carico a 31ms. Si può ipotizzare che il materiale, sottoposto a frequenze di carico più elevate, sia soggetto alla formazione di microcricche che ne diminuiscono il modulo di rigidezza.

Per le prove effettuate a 300 kPa di tensione imposta, i valori di variazione del modulo ottenuti, rilevati solamente a 14 e 28 giorni di maturazione, sono inferiori ai precedenti. La diminuzione media del modulo, passando da 124 ms a 62 ms, è del 6% e aumenta all'11% riducendo la frequenza di carico a 31 ms. Rispetto a quanto riscontrato per le prove effettuate alle tensioni di 100 kPa e 200 kPa, i valori ottenuti sono circa la metà. Se si effettua un'analisi più disaggregata dei dati a 100 kPa e 200 kPa, si può osservare che le variazioni di modulo a 14 e 28 giorni di maturazione hanno un andamento che è molto simile a quello ottenuto per 300 kPa di tensioni allo stesso tempo di maturazione. Si ha quindi una variazione del modulo di rigidezza che è leggermente inferiore per i provini che hanno subito una maggiore maturazione, ma in generale mantengono una certa costanza dei valori.

Sempre in riferimento ai dati ottenuti a 300 kPa di tensione, si deve tener conto che questa tensione è superiore al 60% del valore di resistenza a trazione indiretta ottenuto a 14 e 28 giorni di maturazione, quindi un valore di prova che è comunque alto.

Si può quindi concludere che i provini confezionati con la miscela di misto cementato senza fibre, per una determina frequenza di carico sono soggetti ad una aumento del modulo di rigidezza all'aumentare della maturazione, e subiscono una riduzione del modulo di rigidezza all'aumentare del tempo di picco, ma tale riduzione è in media costante e in generale indipendente sia dalla tensione che dal tempo di maturazione.

Variazione del modulo in funzione della tensione imposta

Si procede ora alla valutazione del modulo di rigidezza del materiale ponendo costante il tempo di picco e variando la tensione di prova. I dati ottenuti sono riportati in grafici in cui i tempi di maturazione sono posti in ascissa e i moduli di rigidezza in ordinata. In aggiunta si riporta la variazione percentuale del modulo in funzione di un modulo di riferimento che è quello rilevato a 100 kPa di tensione imposta.

Nelle Figure riportate di seguito sono rappresentati:

- Figura 3.15 e Tabella 3.22: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e della tensione di prova per tempo di picco di 124 ms;
- Figura 3.16 e Tabella 3.23: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e della tensione di prova per tempo di picco di 62 ms;
- Figura 3.17 e Tabella 3.24: variazione del modulo in funzione dei giorni di maturazione e della tensione di prova per tempo di picco di 31 ms.

Questa analisi ricalca nel metodo quella precedente. Anche questa non si basa sulla valutazione del valore del modulo di rigidezza al variare dei parametri, bensì sulla variazione percentuale che intercorre tra il modulo, preso come riferimento, e gli altri a diversi valori di tensione imposta.

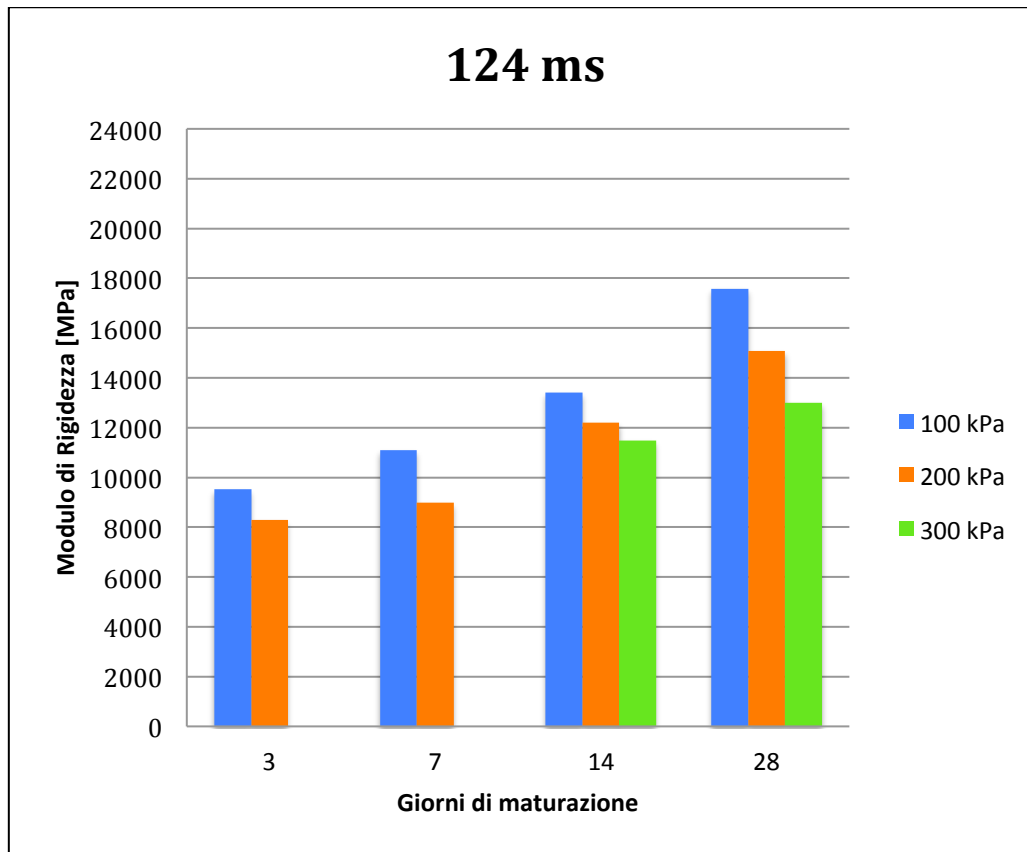


Figura 3.15- Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MC

Tabella 3.22 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 124 ms per MC

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
124	100	-	-	-	-	-
	200	-12,9%	-19,0%	-9,0%	-14,2%	-14%
	300	NV	NV	-14,4%	-26,1%	-20%

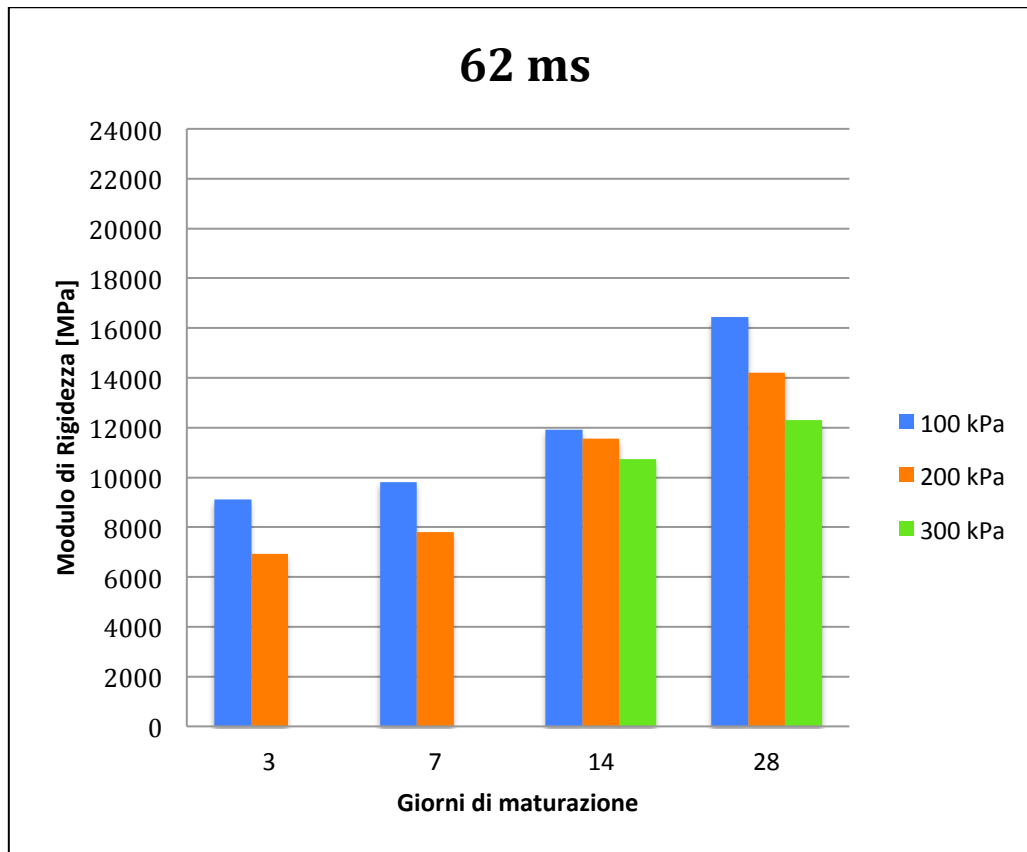


Figura 3.16 - Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MC

Tabella 3.23 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 62 ms per MC

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
62	100	-	-	-	-	-
	200	-24,1%	-20,5%	-3,1%	-13,5%	-15%
	300	NV	NV	-9,8%	-25,1%	-18%

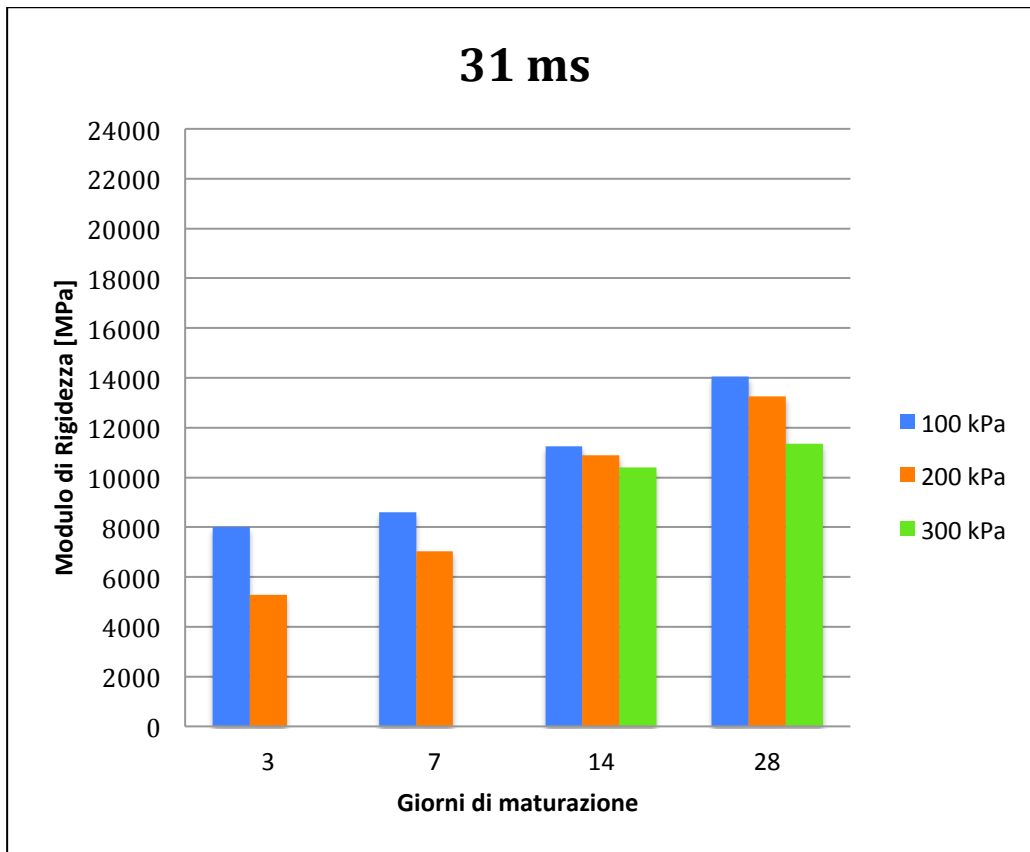


Figura 3.17- Variazione del modulo in funzione della tensione imposta a 31 ms per MC

Tabella 3.24 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta a 31 ms per MC

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
31	100	-	-	-	-	-
	200	-34,1%	-18,3%	-3,1%	-5,6%	-15%
	300	NV	NV	-7,5%	-19,1%	-14%

Si riporta nella seguente Tabella 3.25 i valori percentuali delle variazioni medie calcolate per agevolare le operazioni di confronto dei risultati:

Tabella 3.25 - Media delle variazioni del modulo in funzione delle tensioni imposte per MC

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	MEDIA VARIAZIONI
124	100	-
	200	14 %
	300	20 %
62	100	-
	200	15 %
	300	18 %
31	100	-
	200	15 %
	300	14 %

Anche in questo caso, per quanto detto precedentemente, non sono disponibili i dati a 3 e 7 giorni di maturazione, per le prove effettuate a 300 kPa di tensione imposta.

Osservando i grafici e i valori tabellati, è possibile evidenziare che in tutti i casi analizzati, per ognuna dei tre tempi di picco, a parità di tempo di maturazione si nota una diminuzione dei moduli ottenuti all'aumentare tensione imposta. Una seconda osservazione che nasce dall'esame dei grafici è che, per una data tensione imposta, all'aumentare dei giorni di maturazione si ha un aumento del modulo di rigidezza indipendentemente dalla tensione che viene imposta.

Dopo queste prime osservazioni di carattere generale, è possibile effettuare valutazioni di tipo quantitativo in merito alle variazioni dei moduli.

Osservando i grafici ottenuti per 124 ms e a 62 ms di tempo di picco, si può notare che la diminuzione del modulo di rigidezza passando da 100 kPa a 200 kPa, per un dato tempo di maturazione, è mediamente pari a 14%-15%, valore che aumenta attestandosi al 18%-20% per 300 kPa di tensione. Si può ipotizzare che il materiale, sottoposto a tensioni imposte più elevate, sia soggetto alla formazione di microcricche che ne diminuiscono il modulo di rigidezza.

Per le prove effettuate a 31 ms di frequenza di carico, i valori di variazione del modulo ottenuti, sono inferiori ai precedenti. La variazione media del modulo, passando da 100 kPa a 200 kPa, è del 15% e rimane quasi costante aumentando la tensione a 300 kPa raggiungendo il 14%. Rispetto a quanto riscontrato per le prove effettuate alle frequenze di carico di 124 ms e 62 ms, il primo valore è in linea con questi, mentre il secondo è circa la metà.

Se si effettua un'analisi più disaggregata dei dati per tutti i tempi di picco, si può notare che a 3 giorni di maturazione, in particolare a 62 ms e 31 ms di tempo di picco, si ha un decremento notevole del modulo di rigidità aumentando la tensione di prova da 100 kPa a 200 kPa, pari a circa il 25%, mentre per le prove effettuate nei giorni successivi questa diminuzione è decisamente inferiore. Si ha quindi una variazione del modulo di rigidità che è inferiore per i provini che hanno subito una maggiore maturazione; da ciò si deduce che dai 7 giorni di maturazione in poi la variazione dei valori di modulo mantiene in generale una certa costanza.

Si può quindi concludere che i provini confezionati con la miscela di misto cementato senza fibre, per una determinata tensione di prova sono soggetti ad un aumento del modulo di rigidità all'aumentare della maturazione, e subiscono una riduzione del modulo di rigidità all'aumentare della tensione imposta, ma tale riduzione è in media costante e indipendente sia dalla frequenza di carico che dal tempo di maturazione, a meno dei primi giorni dalla compattazione in cui il modulo è particolarmente influenzato dalla tensione di prova.

3.2.2.3 Confronto dei moduli di rigidezza tra i il MCF e il MC

Dopo una valutazione della dipendenza dei moduli di rigidezza dalla frequenza di carico e dalla tensione di prova è ora possibile effettuare il confronto tra i due materiali per verificarne le differenze.

Per agevolare le operazioni di confronto, si riportano nelle tabelle sottostanti, i valori riassuntivi ottenuti dalle analisi di valutazione della variazione del modulo in funzione del tempo di picco e della tensione imposta, per entrambi i materiali.

Tabella 3.26 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco per MCF

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
100	124	-	-	-	-	-
	62	-12,6%	-14,9%	-13,6%	-8,7%	-12 %
	31	-18,8%	-28,9%	-24,7%	-27,7%	-25 %
200	124	-	-	-	-	-
	62	-15,2%	-13,3%	-9,3%	-12,9%	-13 %
	31	-26,5%	-26,6%	-15,3%	-21,0%	-22 %
300	124	-	-	-	-	-
	62	NV	NV	-6,0%	-8,4%	-7 %
	31	NV	NV	-16,2%	-16,0%	-16 %

Tabella 3.27 - Variazione percentuale del modulo in funzione del tempo di picco per MC

Tensione imposta [kPa]	Tempo di picco [ms]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
100	124	-	-	-	-	-
	62	-4,3%	-11,5%	-11,2%	-6,5%	-8 %
	31	-15,9%	-22,4%	-16,1%	-20,1%	-18 %
200	124	-	-	-	-	-
	62	-16,6%	-13,2%	-5,4%	-5,7%	-10 %
	31	-36,4%	-21,7%	-10,7%	-12,0%	-20 %
300	124	-	-	-	-	-
	62	NV	NV	-6,4%	-5,3%	-6 %
	31	NV	NV	-9,4%	-12,6%	-11 %

Tabella 3.28 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta per MCF

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
124	100	-	-	-	-	-
	200	-18,8%	-8,1%	-14,1%	-14,0%	-14 %
	300	NV	NV	-20,5%	-21,5%	-21 %
62	100	-	-	-	-	-
	200	-21,2%	-6,3%	-9,8%	-18,0%	-14 %
	300	NV	NV	-13,4%	-21,3%	-17 %
31	100	-	-	-	-	-
	200	-26,5%	-5,1%	-3,4%	-6,1%	-10 %
	300	NV	NV	-11,5%	-8,8%	-10 %

Tabella 3.29 - Variazione percentuale del modulo in funzione della tensione imposta per MC

Tempo di picco [ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg	MEDIA VARIAZIONI
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	
124	100	-	-	-	-	-
	200	-12,9%	-19,0%	-9,0%	-14,2%	-14 %
	300	NV	NV	-14,4%	-26,1%	-20 %
62	100	-	-	-	-	-
	200	-24,1%	-20,5%	-3,1%	-13,5%	-15 %
	300	NV	NV	-9,8%	-25,1%	-18 %
31	100	-	-	-	-	-
	200	-34,1%	-18,3%	-3,1%	-5,6%	-15 %
	300	NV	NV	-7,5%	-19,1%	-14 %

Dal confronto dei dati di modulo ottenuti si possono effettuare le seguenti considerazioni in merito alla variazione del modulo di rigidezza rilevato in funzione dei tempi di picco imposti dall'operatore:

- per entrambi i materiali, a parità di tempo di maturazione, si ha una diminuzione del modulo di rigidezza all'aumentare della frequenza di carico e della tensione imposta;
- per entrambi i materiali, ad una data frequenza di carico, si ha un aumento del modulo di rigidezza all'aumentare del tempo di maturazione;
- per entrambi i materiali, ad una data tensione di prova, si ha un aumento del modulo di rigidezza all'aumentare del tempo di maturazione;
- entrambi i materiali risentono della variazione della frequenza di sollecitazione a parità di carico, mostrando indirettamente una sensibilità alla storia di sollecitazione;
- entrambi i materiali risentono della variazione della tensione di prova a parità frequenza di sollecitazione, mostrando indirettamente una sensibilità alla storia di sollecitazione;
- si ha una sostanziale uniformità della variazione percentuale del modulo di deformazione per entrambi i materiali in funzione della frequenza di carico. Per le tre tensioni, passando da un tempo di picco di 124 ms a 62 ms si ha una diminuzione del modulo tra il 6% e il 13%, leggermente superiore per il MCF, differenza che aumenta riducendo ulteriormente il tempo di picco a 31 ms, dove si ha per il MCF una riduzione media variabile tra il 16% e il 25%, mentre per il MC il modulo rilevato è mediamente intorno all'80-90% di quello di riferimento a 124 ms di tempo di picco. Si può quindi concludere che, per entrambi i materiali, l'aumento della frequenza di prova causa una diminuzione del modulo di rigidezza rilevato dal macchinario, a parità di carico, ma tale variazione risulta in media costante facendo variare la frequenza a diverse tensioni di carico;
- lo stesso ragionamento può essere svolto per le prove in cui è stata fatta variare la tensione di prova. Anche in questo caso si può notare una sostanziale uniformità della variazione percentuale del modulo di deformazione per entrambi i materiali in funzione della tensione imposta.

Passando da una tensione di 100 kPa a 200 kPa si ha una diminuzione del modulo che si attesta nell'ordine del 10%-15%, che aumenta a fino ad un massimo del 21% incrementando la tensione a 300 kPa. Si può quindi concludere che, per entrambi i materiali, l'aumento della tensione di prova causa una diminuzione del modulo di rigidità rilevato dal macchinario, a parità di carico, ma tale variazione risulta in media costante facendo variare il carico a diverse frequenze di prova;

- la variazione percentuale del modulo di rigidità risulta in genere superiore, per le prove effettuate a 3 giorni di maturazione rispetto a quella rilevata per tempi di maturazione maggiori. Questa osservazione è valida sia per le prove effettuate variando la frequenza sia per quelle in cui il parametro variabile è la tensione. Si può ipotizzare che il materiale che non ha ancora sviluppato adeguate caratteristiche meccaniche, se sottoposto a carichi più impulsivi (31 ms) o a tensioni molto vicine alla resistenza a trazione indiretta (200 kPa), è soggetto alla formazione di microcricche che ne diminuiscono il modulo di rigidità;
- si può notare, per entrambi i materiali, che a 14 e 28 giorni di maturazione, la variazione dei moduli di rigidità è in generale meno suscettibile alla modifica sia della frequenza che del carico di prova. Nel Paragrafo 3.2.1, si è stimato che entrambi i materiali raggiungono il 90% della loro resistenza a trazione massima già al quattordicesimo giorno di maturazione, quindi si può dedurre che, quando il materiale raggiunge quasi il massimo delle sue caratteristiche meccaniche ed ha quindi una rigidità elevata, il modulo è meno sensibile alla variazione dei parametri di prova;
- i dati ottenuti in questa analisi dimostrano un'effettiva corrispondenza dei dati rilevati per entrambi i materiali, si può quindi concludere che le l'aggiunta di fibre lascia inalterata la dipendenza del modulo di rigidità dai parametri di prova.

3.2.2.4 Variazione del modulo in funzione del tempo di maturazione e confronto tra il MCF e il MC

Dopo aver valutato la dipendenza dei moduli di rigidezza dai parametri di prova valutando non i valori di modulo ottenuti, bensì la loro variazione, in questo Paragrafo verrà studiato l'andamento delle prestazioni del materiale, e quindi i valori di modulo acquisiti dalle prove, all'aumentare della maturazione.

Per ogni tempo di maturazione sono stati testati tre provini, e i valori medi dei moduli di rigidezza così ottenuti, in funzione di tre diversi tre tempi di picco e tensioni di prova, sono stati riportati in Tabella 3.30 e in Tabella 3.31, rispettivamente per il MCF e per il MC.

Successivamente i dati sono stati tradotti in formato grafico. Sono stati riportati:

- in Figura 3.18: dati relativi alle prove effettuate per un tempo di picco di 124 ms, per le tre tensioni di prova (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa) e per entrambi i materiali;
- in Figura 3.19: dati relativi alle prove effettuate per un tempo di picco di 62 ms, per le tre tensioni di prova (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa) e per entrambi i materiali;
- in Figura 3.20: dati relativi alle prove effettuate per un tempo di picco di 31 ms, per le tre tensioni di prova (100 kPa, 200 kPa, 300 kPa) e per entrambi i materiali.

Inoltre, per meglio descrivere il cambiamento ottenuto dall'aggiunta delle fibre, si riporta in tabelle associate a ciascuna delle suddette figure, la variazione percentuale del modulo di rigidezza del MCF rispetto a quello corrispettivo del MC, considerando quest'ultimo come valore di riferimento.

Tabella 3.30 – Valori di modulo di rigidezza del MCF testato con macchina dinamica

Tempo di picco[ms)	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
		Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]
124	100	10689	12901	17447	22366
	200	8682	11858	14987	19229
	300	NV	NV	13878	17552
62	100	9345	10976	15069	20428
	200	7363	10284	13597	16741
	300	NV	NV	13050	16085
31	100	8679	9169	13145	16170
	200	6379	8702	12697	15192
	300	NV	NV	11626	14747

Tabella 3.31 - Valori di modulo di rigidezza del MC testato con macchina dinamica

Tempo di picco[ms)	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
		Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]	Modulo di rigidezza [MPa]
124	100	9519	11100	13411	17575
	200	8293	8987	12203	15071
	300	NV	NV	11479	12995
62	100	9110	9820	11914	16431
	200	6919	7804	11546	14214
	300	NV	NV	10746	12301
31	100	8003	8608	11247	14045
	200	5275	7035	10899	13255
	300	NV	NV	10405	11362

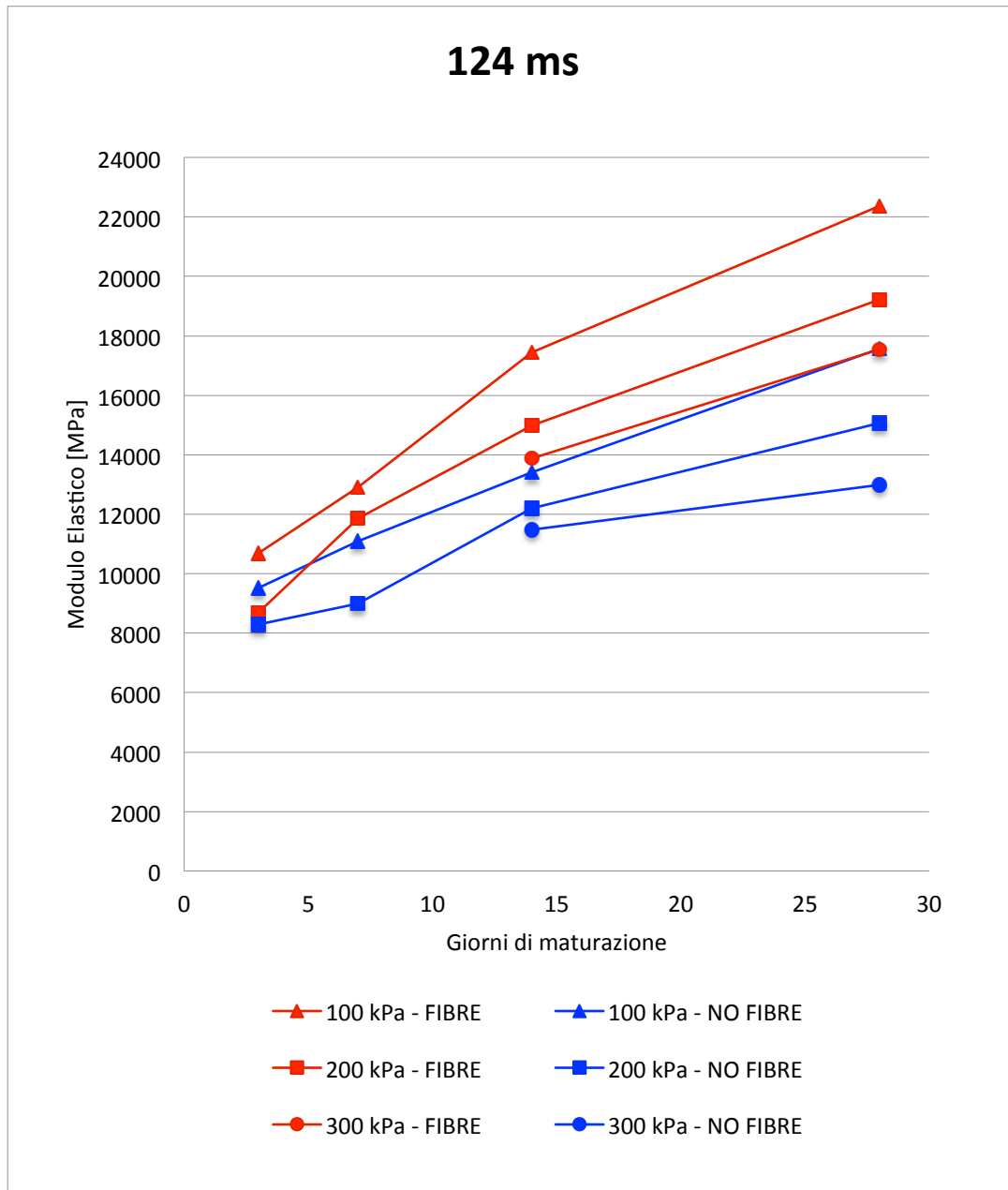


Figura 3.18 - Andamento modulo di rigidezza del MCF e del MC a 124 ms, in funzione della maturazione

Tabella 3.32-Variazione del modulo di rigidezza del MCF rispetto al MC a 124 ms

Tempo di picco[ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza
124	100	+12,3%	+16,2%	+30,1%	+27,3%
	200	+4,7%	+31,9%	+22,8%	+27,6%
	300	NV	NV	+20,9%	+35,1%

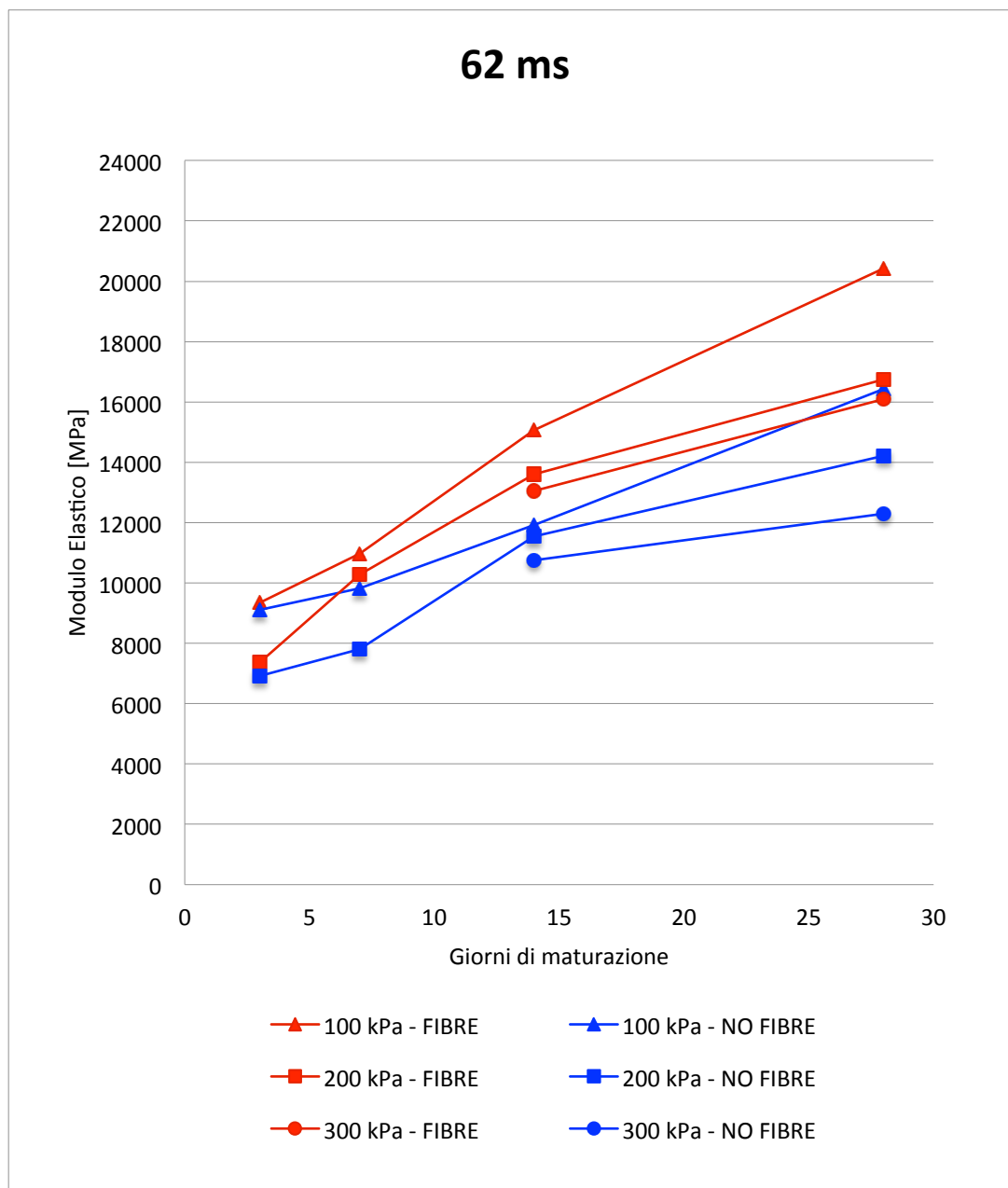


Figura 3.19 –Andamento modulo di rigidezza del MCF e del MC a 62 ms, in funzione della maturazione

Tabella 3.33–Variazione del modulo di rigidezza del MCF rispetto al MC a 62 ms

Tempo di picco[ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza
62	100	+2,6%	+11,8%	+26,5%	+24,3%
	200	+6,4%	+31,8%	+17,8%	+17,8%
	300	NV	NV	+21,4%	+30,8%

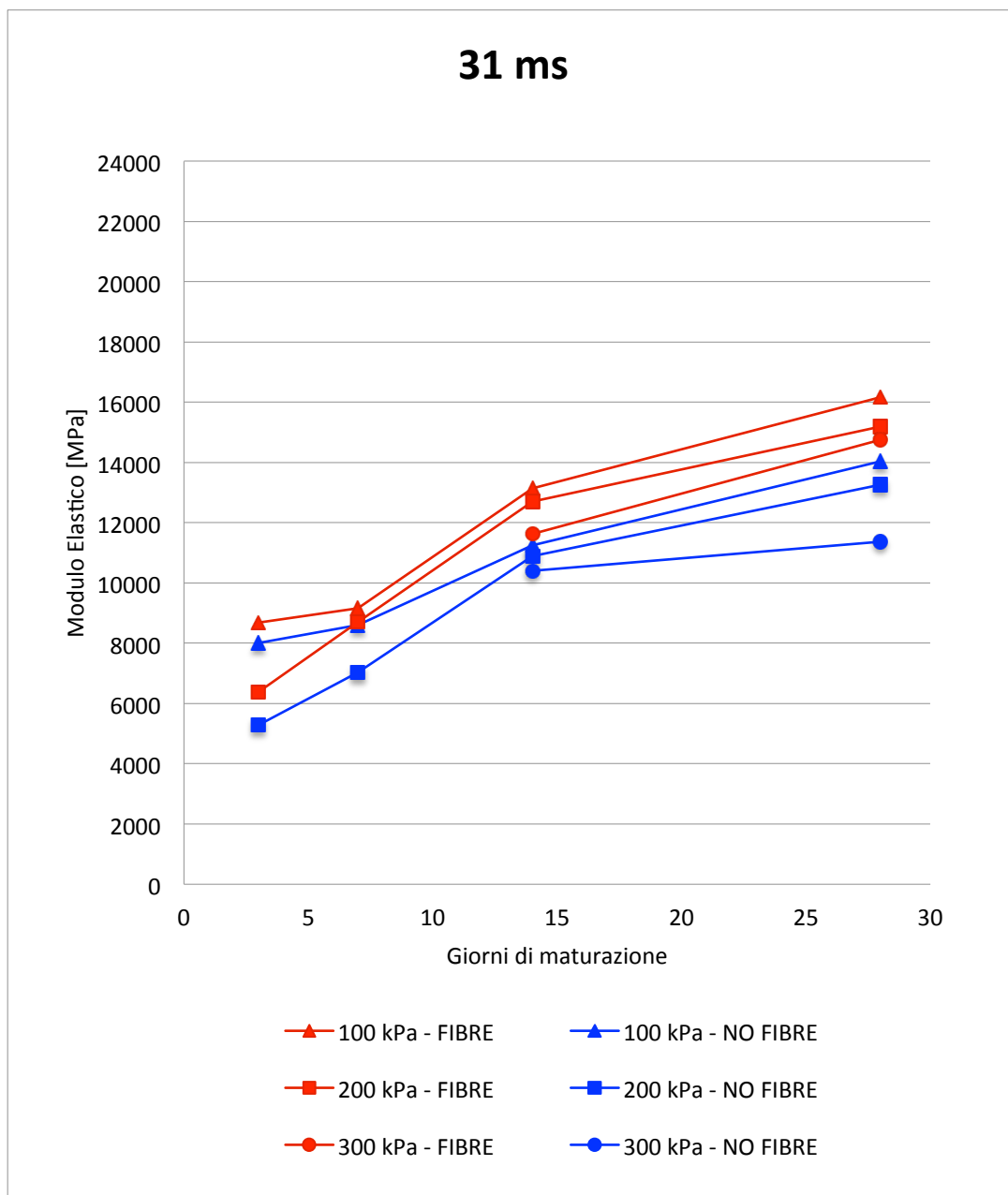


Figura 3.20 - Andamento modulo di rigidezza del MCF e del MC a 31 ms, in funzione della maturazione

Tabella 3.34–Variazione del modulo di rigidezza del MCF rispetto al MC a 31 ms

Tempo di picco[ms]	Tensione imposta [kPa]	3 gg	7 gg	14 gg	28 gg
		Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza	Variazione Modulo di rigidezza
31	100	+8,4%	+6,5%	+16,9%	+15,1%
	200	+20,9%	+23,7%	+16,5%	+14,6%
	300	NV	NV	+11,7%	+29,8%

Dall'analisi dei dati ottenuti e dai grafici, è possibile trarre le seguenti conclusioni in merito all'aggiunta di fibre nella miscela:

- Per ciascuno dei due materiali, come precedentemente esposto nel Paragrafo 3.2.2, si nota una regolare diminuzione del modulo di rigidezza rilevato all'aumentare del carico di prova a parità di frequenza e di maturazione. Tale riduzione diviene meno marcata all'aumentare della frequenza di prova.
- Le curve nei tre grafici hanno un andamento monotono crescente, il che sta ad indicare una crescita continua del modulo di rigidezza all'aumentare del tempo di maturazione.
- Le curve hanno un andamento di crescita simile per entrambi i materiali, a parità di carico e di frequenza di prova, in generale più accentuato nei primi giorni e meno marcato al termine della maturazione;
- È indubbio che l'aggiunta di fibre porta ad avere un aumento delle prestazioni, per ciascun giorno di maturazione in cui sono state effettuate le prove con macchina dinamica. Tali vantaggi sono meno rilevanti dopo pochi giorni dal confezionamento dei provini, dove si ottiene un miglioramento medio dell'8%, e assume sempre maggior evidenza all'aumentare della maturazione fino ad avere delle prestazioni addirittura del 30% superiori per le prove effettuate a 28 giorni.

Capitolo 4

La sperimentazione in vera grandezza

Dopo aver affrontato e descritto nel capitolo precedente tutte le prove di laboratorio, con le quali si è andati ad identificare e qualificare il materiale, in questo capitolo verranno esposte tutte le lavorazioni che sono state compiute nel campo prove allestito presso delle aree di cantiere site all'interno del sedime aeroportuale di un grande aeroporto milanese.

Inizialmente si andranno a descrivere le procedure e i macchinari adottati per la corretta miscelazione e la stesa del materiale oggetto delle precedenti analisi.

La parte successiva è dedicata all'analisi del grado di compattazione, in particolare è stato valutato il modulo di deformazione del cementato al momento della stesa e precisamente a ogni passaggio del rullo compattatore, da 0 a 5 passaggi, studiandone la variazione.

Una terza parte sarà volta allo studio della variazione della portanza nel tempo, tramite misurazioni di moduli dinamici e statici nelle giornate successive alla stesa. Lo studio del modulo di deformazione è stato eseguito con particolari strumentazioni, il Light Weight Drop Tester (LWDT) durante la stesa e nei tre giorni successivi e la prova di carico con piastra statica dopo 1, 2, 3 e 4 giorni di maturazione, poiché più adatta a determinare il modulo di deformazione di un materiale divenuto più rigido grazie alla maturazione.

Infine, verranno riproposti i dati ottenuti dalle indagini con un'osservazione critica dei risultati, in particolare per quel che riguarda l'incremento della resistenza del materiale nel tempo in modo da permettere un confronto tra i valori ottenuti per il misto cementato fibro-rinforzato così analizzato e per un materiale, di identica composizione, ma confezionato in laboratorio, quindi in un ambiente ideale in cui sono definite umidità dell'aria e temperatura e dove la maturazione avviene in camere apposite e controllate.

4.1 Allestimento del campo prove

Per poter comprendere appieno le capacità del misto cementato rinforzato con fibre è stata necessaria un'analisi in vera grandezza tramite l'allestimento di un campo prove. Il materiale utilizzato è stato confezionato con la stessa miscela di aggregati, acqua, cemento e fibre testata in laboratorio e relazionata nel Capitolo 3, in modo da poter ottenere dei valori di raffronto, quantificando così la differenza di prestazioni ottenute in situ e in laboratorio. Il campo prove, riportato nelle Figura 4.1 e Figura 4.2, ha dimensioni di 4 metri di larghezza, 50 metri di lunghezza e 18 cm di spessore compresso e poggia su un sottofondo di terreno in misto granulare stabilizzato a cemento.



Figura 4.1 - Campo prove

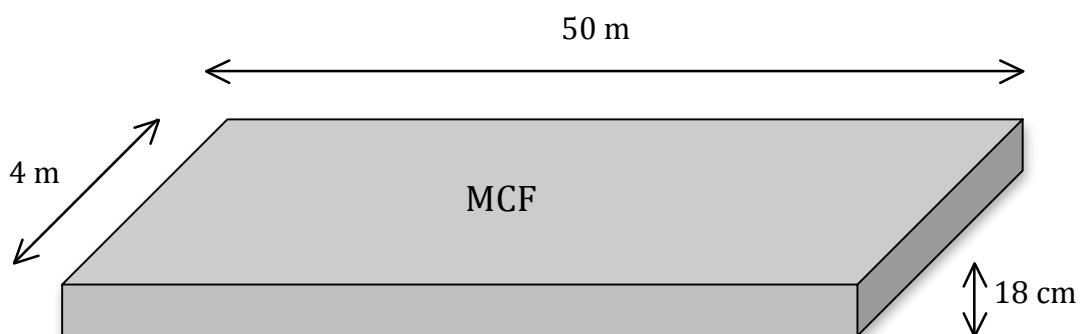


Figura 4.2 - Schema organizzazione del campo prove

4.2 Confezionamento e stesa

In questo capitolo verranno descritte le procedure di confezionamento in impianto e di stesa degli strati di misto cementato, identiche per entrambi i materiali.

Per la prima parte delle lavorazioni e cioè il confezionamento del materiale è stato utilizzato un impianto di miscelazione mobile allestito nelle immediate vicinanze del cantiere, così da ridurre i tempi di trasporto tra il sito di produzione e la zona delle lavorazioni, con evidenti vantaggi ambientali, tecnici ed economici. Gli aggregati, stoccati nella stessa area, vengono caricati nel miscelatore tramite la benna di un escavatore, dopo averne valutato l'umidità relativa tramite l'essiccazione di un campione prelevato dai cumuli da cui verrà attinto il materiale.

L'impianto di miscelazione è composto da una parte principale che è il vero e proprio miscelatore, da un silo direttamente collegato, per il dosaggio del cemento (pari al 4%), da un distributore di acqua per raggiungere il corretto contenuto (pari al 9%), e da un sistema di carico composto da un nastro trasportatore che permette di caricare il materiale direttamente sul mezzo di trasporto o, in mancanza di questo, di scaricarlo direttamente a terra per poi essere caricato sul camion tramite una pala caricatrice. Tutte le varie parti sono facilmente visibili nelle Figura 4.3 e Figura 4.4.

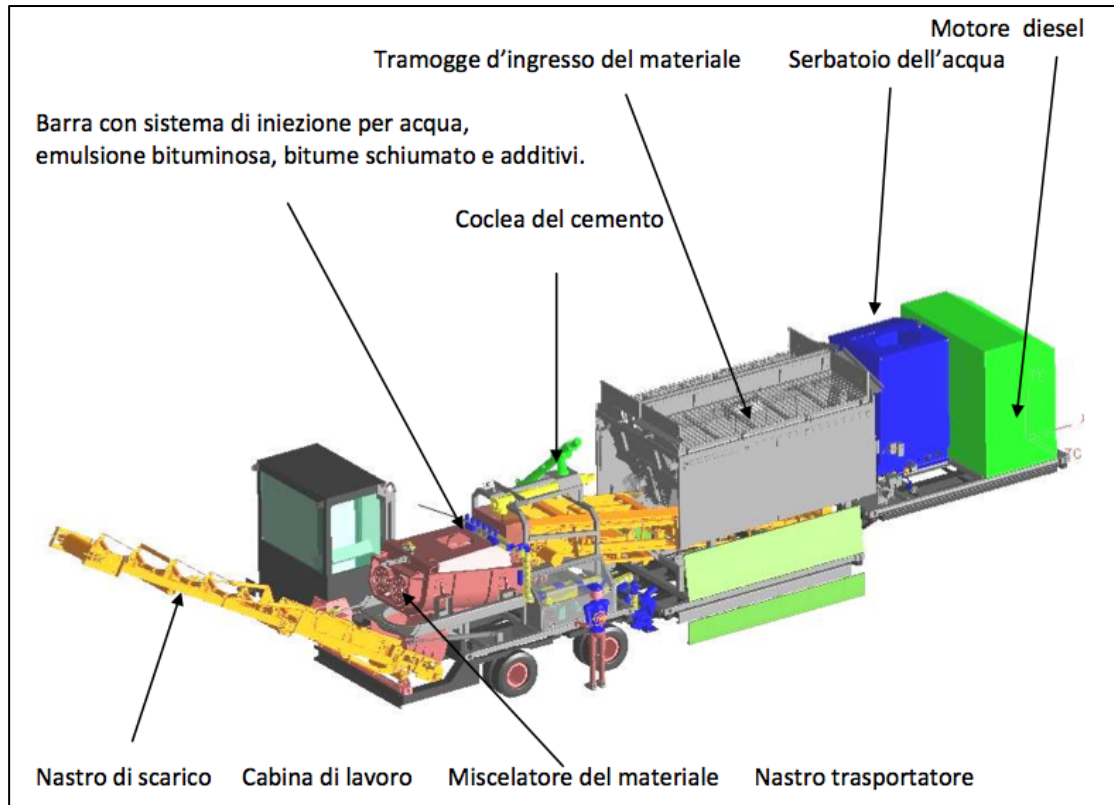


Figura 4.3 - Impianto di miscelazione [14]



Figura 4.4 - Misto cementato all'uscita del miscelatore

Per mezzo di una pala caricatrice gommata, gli aggregati vengono prelevati dai cumuli e immessi nei dosatori (Figura 4.5), i quali sono dotati di vagli metallici allo scopo di eliminare eventuali frazioni grossolane non conformi alla granulometria di progetto (Figura 4.6). Tali pezzature sono presenti in quanto l'inerte utilizzato è il risultato della frantumazione di materiali di reimpiego, quali lastre aeroportuali in cemento armato e di scarti edilizi, utilizzabili previo adeguato trattamento.

Inoltre, particolare cura è stata utilizzata nel definire la metodologia di inserimento delle fibre nella camera di miscelazione al fine di ottenere la necessaria omogeneità: si è scelto di dotare l'impianto di una linea di adduzione delle fibre costituito da un sistema combinato ad aria compressa e di pesatura in continuo. Poiché la percentuale di fibre il quale aggiunge una quantità di fibre pari a 1 kg ogni metro cubo di materiale presente nel miscelatore.



Figura 4.5- Carico degli aggregati nel miscelatore



Figura 4.6 – Griglia dell'impianto di miscelazione

Una volta definita la procedura di confezionamento, è possibile rivolgere l'attenzione alle procedure di stesa e compattazione, rispettivamente realizzate con una vibrofinitrice mobile cingolata e con un rullo compattatore di tipo acciaio gomma da 15 tonnellate.

Per quanto riguarda la vibrofinitrice, questa ha lavorato con una velocità di avanzamento pari a 5 metri al minuto. L'inizio della strisciata viene effettuato qualche decimetro prima dell'inizio effettivo del campo prove per permettere agli operatori di calibrare il macchinario. Una volta a regime la finitrice posiziona una striscia di materiale in maniera uniforme per tutta la lunghezza necessaria e il suo spessore viene continuamente valutato dagli operatori a terra (Figura 4.7 e Figura 4.8). Il macchinario viene caricato frontalmente dai camion con il materiale confezionato precedentemente, prestando attenzione che il carico sia eseguito in maniera continua in modo da non rallentare la produzione, ma soprattutto per evitare una disomogeneità della stesa dovuta alla mancanza di materiale all'interno della finitrice. Inoltre, lo spessore del materiale steso dalla finitrice è di circa 22 cm, superiore rispetto a quello finale, in quanto si deve considerare che la compattazione successiva con rullo causerà una riduzione dello spessore di circa il 20%.



Figura 4.7- Carico della finitrice e stesa del materiale



Figura 4.8- Misurazione dello spessore dello strato

La fase seguente alla stesa, cioè la compattazione del materiale, verrà analizzata nel dettaglio nel prossimo paragrafo in relazione alle prove che verranno eseguite per ciascun passaggio del rullo e nei giorni successivi alla stesa.

4.3 Analisi della compattazione

Al termine delle operazioni di realizzazione dello strato, ha avuto inizio una campagna sperimentale di monitoraggio del campo prova allo scopo di studiare l'evoluzione della capacità portante in funzione della compattazione del materiale e del tempo di maturazione. Le prove sono state eseguite ogni due passaggi del rullo compattatore e per quattro giorni successivi alla stesa, ogni 24 ore. Per tale analisi sono state scelte due modalità di indagine, la prima basata sulla determinazione del modulo dinamico di deformazione mediante prova di carico dinamico su piastra (LWDT,) la seconda mediante la determinazione del modulo di deformazione con la prova di carico su piastra statica. Quest'ultima è stata utilizzata unicamente per determinare la variazione di portanza del materiale in funzione dei giorni di maturazione.

4.3.1 Portanza in fase di compattazione

La compattazione dello strato di misto cementato fibro-rinforzato è stata svolta con un rullo del tipo acciaio-gomma del peso di 15 tonnellate rappresentato in Figura 4.9.



Figura 4.9- Rullo compattatore acciaio-gomma

La compattazione ed il monitoraggio della capacità portante del materiale sono stati preceduti dall'individuazione di 4 aree di misura, su ciascuna delle quali sono state effettuate due prove di valutazione della portanza dello strato per ognuno dei due strumenti utilizzati. Ognuna di esse ha un'area circa pari a 1 mq, ed è stata identificata sulla superficie della stesa per mezzo di uno spray apposito (Figura 4.10 e Figura 4.11). Tali zone sono strategicamente individuate in modo da ricoprire tutta la superficie della stesa e localizzate opportunamente distanti dai margini per non incorrere in errori di misura.

Inizialmente, l'analisi della compattazione è stata valutata effettuando delle prove di portanza per mezzo dell'apparecchiatura LWDT, grazie alle quali si sono ottenuti dei valori di capacità portante dello strato in studio mediante la determinazione del modulo dinamico di deformazione E_{vd} . Durante la fase di compattazione, le misurazioni sono state realizzate valutando l'aumento delle prestazioni strutturali ad ogni passaggio del rullo compattatore, intesa come 2 passate, avanti e indietro. Nei giorni successivi alla stesa, si sono effettuate prove congiunte con LWDT e piastra statica in quanto, all'aumentare della maturazione e quindi della rigidità del materiale, dalla prima prova non si ottengono più risultati attendibili a causa del raggiungimento del limite di lettura dello strumento.

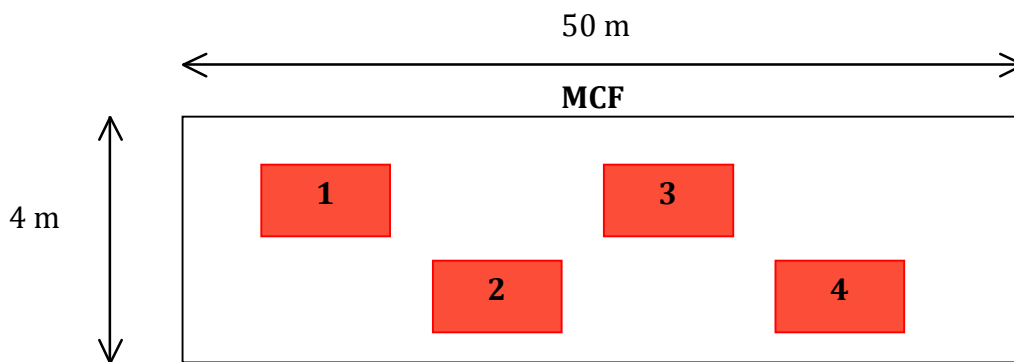


Figura 4.10- Definizione delle aree di analisi



Figura 4.11- Delimitazione di un'area di prova

Di seguito sono riportati in Tabella 4.1 i dati corrispondenti alla variazione di modulo E_{vd} in relazione al numero di passate del rullo. Il valore 0 equivale al risultato misurato alla fine della stesa per mezzo della finitrice, senza nessuna passata del rullo. Ciascun valore riportato per un determinato passaggio del rullo, è il risultato ottenuto dalla media dei valori acquisiti dalle prove effettuate sulle quattro aree precedentemente definite. Si può notare che, partendo da valori molto bassi, l'incremento più consistente, come facilmente presumibile, si ha tra la misurazione a 0 passaggi e i primi 2 passaggi del rullo compattatore, ed è pari al 90%. Successivamente gli incrementi divengono meno marcati, assestandosi attorno a valori variabili tra il 13% e il 15% per raggiungere una stabilizzazione nell'ultimo passaggio, con un incremento marginale del modulo di deformazione rilevato pari a circa il 3%. Dopo due sole passate del rullo compattatore, il materiale ha quasi un raddoppiamento della propria capacità portante. Quindi, la portanza dello strato aumenta ad ogni passaggio del rullo, e, dopo una crescita consistente iniziale, si mantiene pressoché costante fino all'ottava passata, in corrispondenza del quale la portanza del materiale è triplicata rispetto a quella rilevata immediatamente dopo la stesa tramite vibrofinitrice, ed è pari a circa il 50% rispetto a quella rilevata dopo le prime due

passate del rullo compattatore. La compattazione può dirsi quindi completa già all’ottava passata del rullo.

Tabella 4.1 – Valori di E_{vd} del MCF in relazione al numero di passaggi del rullo

Passaggi rullo	0	2	4	6	8	10
E_{vd} minimo [MPa]	8,00	12,7	14,4	21,80	25,60	29,40
E_{vd} massimo [MPa]	19,90	39,5	45,3	51,10	47,60	54,10
E_{vd} medio [MPa]	14,08	27,58	31,78	35,94	40,97	42,12
Incremento [%]	-	+96,0	+15,2	+13,1	+14,0	+2,8

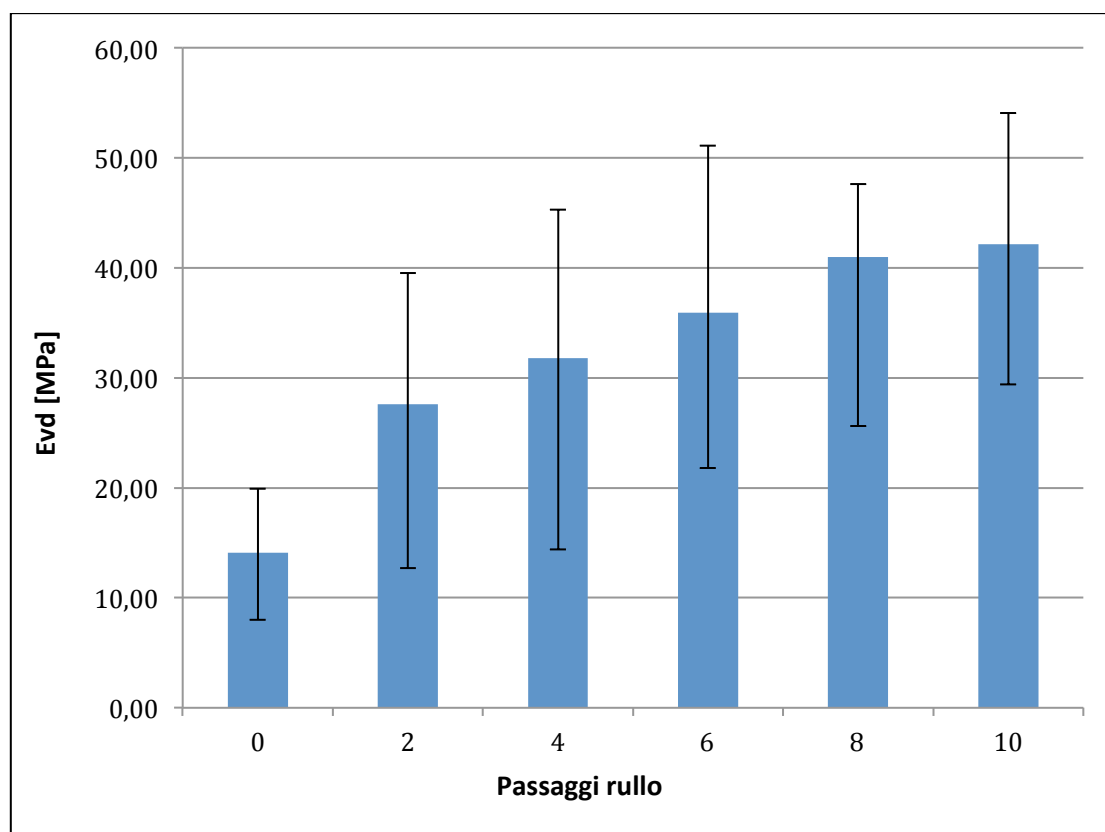


Figura 4.12- Variazione di E_{vd} del MC in relazione al numero di passaggi del rullo

I valori tabellati sono stati riportati in un grafico Modulo di deformazione dinamico – Passaggi del rullo (Figura 4.12) per poter meglio comprendere l’aumento di portanza del materiale, che si presenta sempre crescente. Qui si può notare con più chiarezza l’aumento importante di modulo E_{vd} conseguente alle prime due passate del rullo e il successivo andamento quasi lineare della curva, che si assesta ad un valore finale di 42 MPa al termine della compattazione.

4.3.2 Portanza durante la maturazione

La seconda parte delle misurazioni con strumentazione LWDT è stata eseguita partendo dai valori di modulo a tempo 0, corrispondenti ai valori di fine compattazione, ed analizzandone la variazione a distanza di 24, 48 e 72 ore. Poiché già dopo 42 ore di maturazione i valori di modulo misurati dalla piastra dinamica si avvicinano al valore massimo di lettura dello strumento, si è deciso di completare le misurazioni effettuando simultaneamente prove con piastra statica in corrispondenza degli stessi punti di misura, con l'aggiunta di rilevamenti anche a 96 ore di maturazione. Le medie dei dati ottenuti con la prova LWDT nei 3 giorni successivi alla stesa sono state riportate nella Tabella 4.2.

Tabella 4.2 - Valori di E_{vd} del MCF a 1 - 2 - 3 giorni di maturazione

Tempo di maturazione	0	1 giorno	2 giorni	3 giorni
E_{vd} minimo [MPa]	29,40	35,00	38,40	65,00
E_{vd} massimo [MPa]	54,10	161,5	181,5	196,20
E_{vd} medio [MPa]	42,12	112,70	124,63	126,09
Incremento [%]	-	+167,6	+10,6	+1,2

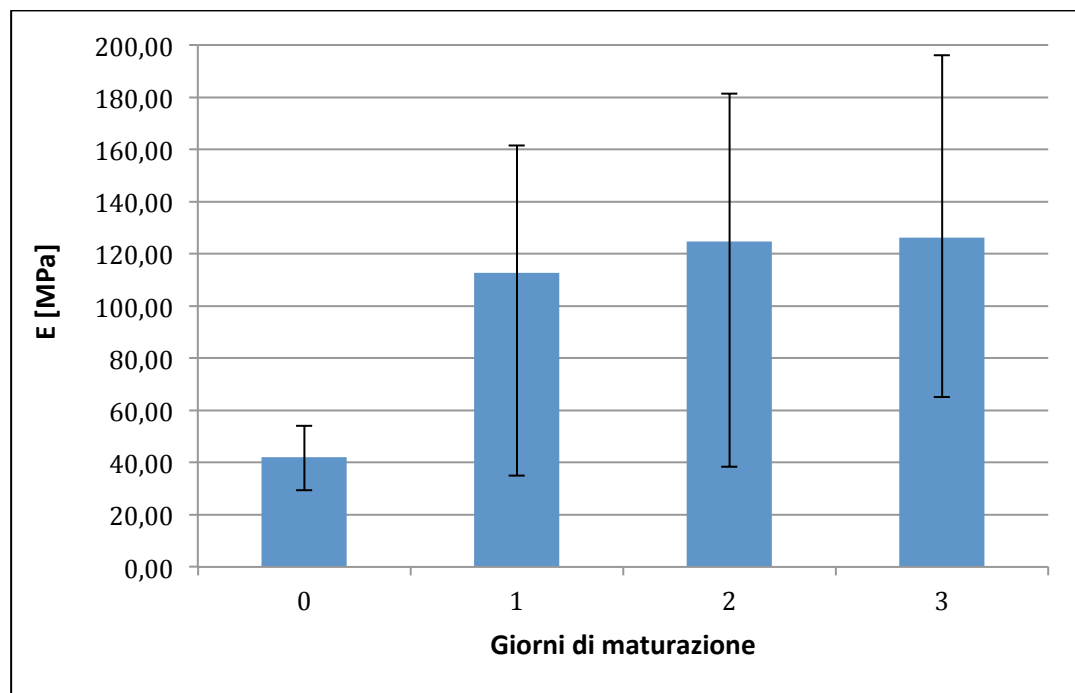


Figura 4.13 - Variazione di E_{vd} del MCF in relazione al tempo di maturazione

Con riferimenti ai risultati di tabella si nota come la maturazione del cemento permetta un deciso incremento delle caratteristiche di portanza dello strato già dopo 24 ore dalla posa in opera. Infatti il modulo di deformazione dinamico ha avuto un incremento importante, pari a circa il 150% rispetto al valore iniziale a tempo 0, mentre nei giorni successivi il modulo rilevato ha una crescita continua ma meno marcata e si assesta a valori prossimi ai 130 MPa.

I risultati riassunti in Tabella 4.2 vengono riprodotti nella Figura 4.13, dove la crescita di portanza dopo il primo giorno di maturazione e il successivo assestamento dei valori sono meglio visibili.

Come precedentemente accennato, nei 4 giorni successivi alla stesa, con l'ausilio delle prove di carico su piastra sono stati rilevati anche i moduli di deformazione M_d , ottenuti al primo ciclo di carico, e di M_d' , ottenuto nel secondo ciclo di carico. I risultati acquisiti dopo 2 giorni di maturazione sono più attendibili di quelli precedentemente rilevati con LWDT in quanto la maturazione del materiale aumenta la sua rigidità oltre i limiti leggibili da tale strumento.

Vengono di seguito riportati in Tabella 4.3 i valori dei moduli di deformazione M_d e M_d' misurati a 1, 2, 3 e 4 giorni dalla posa del materiale con i rispettivi indici di compressibilità (I_c) che caratterizzano il grado di costipamento dello strato in esame.

Tabella 4.3 - Valori di Md, Md' e Ic del MCF a 24 - 48 - 72 -96 ore di maturazione

Tempo di maturazione	1 giorno	2 giorni	3 giorni	4 giorni
Md [MPa]	74,00	161,50	218,63	286,38
Md' [MPa]	246,67	435,13	559,17	583,00
Ic = Md/Md'	0,30	0,37	0,39	0,49

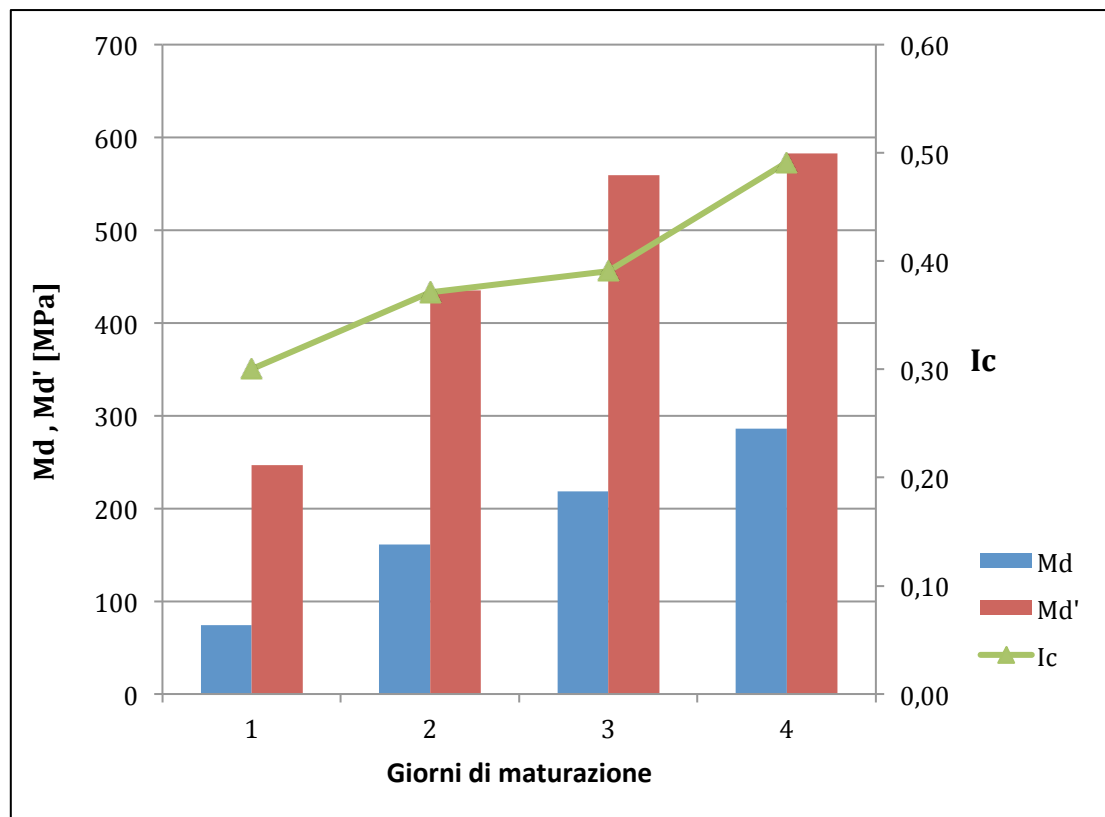


Figura 4.14- Variazione di Md, Md' e Ic del MC in relazione al tempo di maturazione

Come era logico aspettarsi, il valore di entrambi i moduli di deformazione è sempre crescente all'aumentare del tempo di maturazione, ma si può meglio notare dal grafico di Figura 4.14 che, mentre Md ha un rateo di crescita pressoché lineare sino a 96 ore di maturazione, Md' subisce una lieve flessione tra il terzo e il quarto giorno del rilievo. Il valore del modulo di deformazione rilevato a 4 giorni assume un valore decisamente elevato ed è pari a 285 MPa. L'indice di compressibilità, essendo il rapporto tra i due valori suddetti, assume un andamento sempre crescente fino a raggiungere un valore di circa 0,5 a 4 giorni dalla stesa, il che indica un buon grado di costipamento dello strato.

È ora opportuno impostare un grafico in cui vengono messi a confronto i valori di moduli dinamici di deformazione (E_{vd}) ottenuti con le prove LWDT, con i moduli statici di deformazione (Md) ricavati dalle prove di carico su piastra.

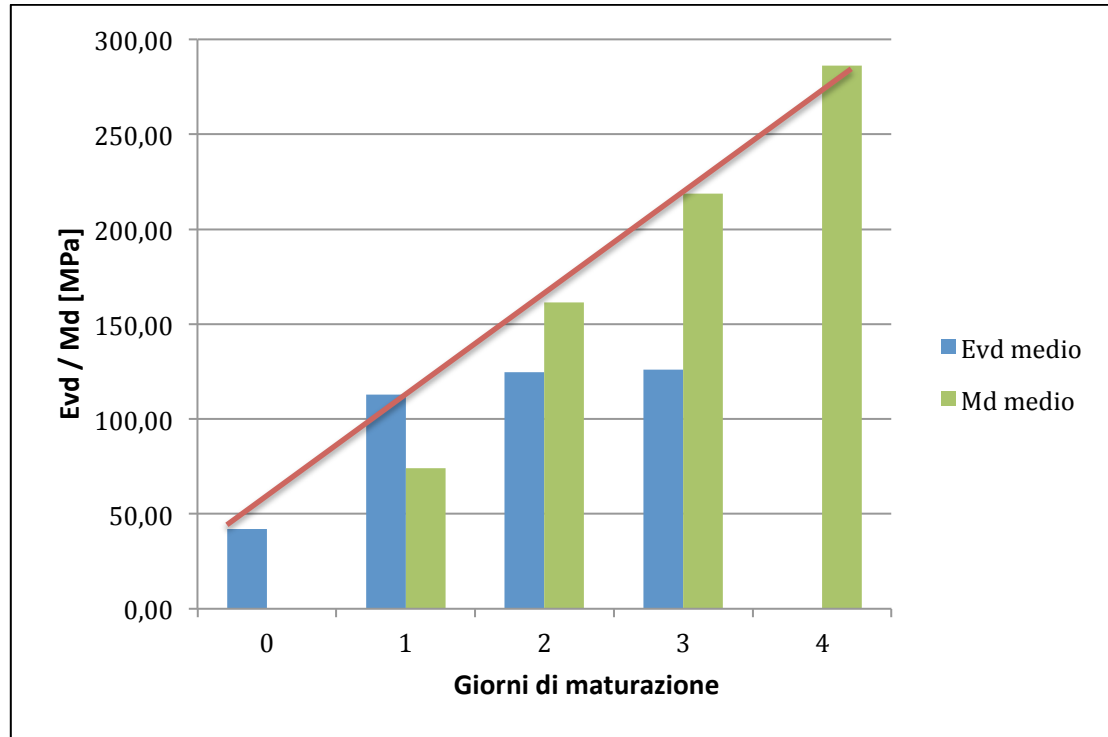


Figura 4.15 - Confronto tra E_{vd} e Md in funzione del tempo di maturazione

Come si può notare dalla Figura 4.15, i valori di modulo del materiale determinati dai due strumenti sono differenti per tutti i rilievi. A 1 giorno dalla stesa si hanno dei valori di E_{vd} superiori agli Md di piastra, ma già dal secondo giorno di maturazione, e per i giorni successivi, si ha una situazione opposta in cui il modulo di deformazione Md risulta sempre più elevato del corrispondente E_{vd} . Questa discrepanza dei risultati ottenuti non è dovuta ad un difetto della strumentazione piuttosto che da errori di prova, ma dal fatto che con l’LWDT non è possibile determinare un modulo di deformazione corretto a causa dell’eccessiva rigidità del materiale. Ipotizzando, quindi, di considerare attendibili i primi 2 valori di E_{vd} , ottenuti dallo strumento LWDT il giorno stesso della stesa e il giorno successivo, e i valori Md ottenuti dalle prove di carico su piastra dal secondo a quarto giorno di maturazione, si può notare un andamento lineare sempre crescente dei valori di modulo (Figura 4.15).

Capitolo 5

Conclusioni

In tale trattazione si è andati a valutare, da un punto di vista sperimentale, le prestazioni e la possibilità dell'utilizzo di fibre polipropileniche fibrillate all'interno di uno strato di fondazione in misto cementato per pavimentazioni aeroportuali. Proprio a causa di questo suo utilizzo, i valori interessanti, sui quali poter basare un commento, risultano i valori inerenti le caratteristiche meccaniche di resistenza a trazione e di portanza.

Tra tutte le informazioni possibili ricavate dalle prove effettuate, quelle più importanti, inerenti il comportamento meccanico della miscela realizzata, hanno fornito alcuni spunti su cui riflettere.

I risultati della ricerca, conseguenti a sperimentazioni svoltisi sia in laboratorio che in situ, hanno mostrato come le prestazioni dei misti cementati, costituiti per il 100% da materiali di riciclo, possono essere fortemente migliorate tramite l'impiego di fibre polipropileniche fibrillate.

Partendo da una miscela con un mix design definito a priori, sono state aggiunte fibre polipropileniche fibrillare in ragione di 1 kg/m^3 di materiale e tramite prove atte a valutarne il modulo di rigidità e la resistenza a trazione, è stato possibile descrivere le prestazioni meccaniche del materiale in studio.

Le prove di laboratorio eseguite sia sul materiale senza fibre che su quello rinforzato con l'aggiunta di fibre ha permesso, inoltre, di svolgere un confronto critico tra le prestazioni raggiunte dai due materiali, a parità di condizioni di prova e di tempo di maturazione. Dall'attività sperimentale di laboratorio è emerso che sono molteplici le funzioni attribuibili alla fibra come rinforzo del misto cementato, sia dal punto di vista volumetrico che sotto l'aspetto delle prestazioni meccaniche raggiunte sin dai primi giorni di maturazione. Innanzitutto, la sperimentazione di laboratorio ha evidenziato un leggero

miglioramento delle caratteristiche di lavorabilità della miscela nella fase di compattazione dei provini, in particolare, il coefficiente di lavorabilità k calcolato, subisce un incremento medio superiore all'8%.

I provini di MCF sottoposti alle prove di valutazione del modulo di rigidezza hanno mostrato un divario con i MC che nasce sin dai primi giorni successivi al confezionamento, sebbene in maniera meno rilevante, e va accentuandosi secondo un andamento pressoché costante all'aumentare della maturazione, fino a raggiungere delle prestazioni addirittura del 30% superiori per le prove effettuate dopo 28 giorni di maturazione. Inoltre, attraverso confronti realizzati tra i valori di modulo ottenuti, impostando differenti parametri di prova, si è potuto constatare che, all'aumentare sia della tensione che della frequenza di sollecitazione, a parità di tempo di maturazione, i valori di modulo di rigidezza restituiti dal macchinario risultano decrescenti. Si è potuto quindi concludere che il materiale, nei primi giorni di maturazione, risente delle frequenze di sollecitazione, a parità di carico, mostrando indirettamente una sensibilità alla storia di sollecitazione. Alla stessa conclusione si è giunti variando il carico e mantenendo costanti le frequenze di prova.

Gli stessi provini, sottoposti a prove atte a valutarne la resistenza a trazione indiretta, hanno dimostrato i miglioramenti prestazionali più rilevante dovuti all'aggiunta di fibre. In questa fase, i dati mostrano un rateo di crescita della resistenza a trazione praticamente identico per entrambi i materiali all'aumentare della maturazione, ma l'aggiunta di fibre nella miscela porta ad avere un valore di RTI per il fibro-rinforzato sempre superiore del 50% circa rispetto a quello ottenuto in assenza di queste, raggiungendo il 60% delle prestazioni meccaniche massime già a 7 giorni di maturazione e addirittura il 90% dopo 14 giorni.

Per quanto riguarda la sperimentazione in vera grandezza, l'analisi si è svolta su di un campo prove allestito all'interno di un importante aeroporto milanese. In questa fase è stato possibile definire le modalità operative delle fasi di miscelazione, stesa e compattazione e valutare l'evoluzione della capacità portante del solo misto cementato fibro-rinforzato in funzione della compattazione e del tempo di maturazione. Durante la fase di compattazione con rullo vibrante acciaio-gomma da 15 t si è stimato un raddoppiamento della

portanza già dopo due passaggi del rullo, raggiungendo un modulo di rigidità stabile pari a 42 MPa dopo l'ottavo passaggio. I rilievi effettuati ogni 24 ore, nei 4 giorni successivi alla stesa hanno mostrato un progressivo irrigidimento dello strato con l'aumentare del tempo di maturazione raggiungendo un modulo di deformazione di circa 300 MPa l'ultimo giorno di monitoraggio.

In conclusione, le fibre polipropilene fibrillate portano miglioramenti consistenti in aggiunta ad un misto cementato costituito completamente da aggregati di riciclo, in termini di prestazioni meccaniche, sia per quanto riguarda la sperimentazione in laboratorio che in sito, già dopo i primi giorni di maturazione.

Infine, la diffusione della tecnologia passa attraverso la standardizzazione del metodo di prova e il miglioramento delle attuali tecniche di dispersione e miscelazione delle fibre all'interno del misto cementato, accorgimenti che potrebbero portare ad un affinamento ulteriore delle caratteristiche del materiale. Inoltre, le future attività di ricerca possono basarsi sull'analisi del materiale analizzato sottoposto a prove di fatica, in modo da valutarne le prestazioni in termini di riduzione del modulo elastico e di raggiungimento a rottura, determinando il numero di cicli a collasso per fatica, anche al variare del dosaggio di fibre in rinforzo al materiale.

Riferimenti Bibliografici

- [1] L. Bertolini, P. Pedferri – “Tecnologia dei materiali – Leganti e calcestruzzo”, Città Studi Edizioni, 2006.
- [2] E.Toraldo, E. Mariani, L. Sordi – “L’impiego di misti cementati rinforzati con fibre per pavimentazioni aeroportuali”, *Strade & Autostrade*, 6-2010.
- [3] K.J.Gaspard – “ Laboratory mechanistic evaluation of soil cement mixtures with fibrillated-polypropylene-fibers”, 82thTransportationResearch Board Annual Meeting, January 12 – 16, Washington D.C., 2003.
- [4] M.J.Khattak, M. Alrashidi – “Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures”, *International Journal of Pavement Engineering*. Vol. 7, No. 1, March 2006, pp. 53-62, 2006.
- [5] N.C. Consoli, M.A.ArcariBassani, L. Festugato – “Effect of fiber-reinforcement on the strength of cemented soils”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol 28, 2010, pp. 344-351, 2010.
- [6] Scheda tecnica Fibermesh 300, fibra di polipropilene fibrillata a fascetti - Ruredil S.p.A., Prima edizione 05.2009.
- [7] Nova R. – “Fondamenti di meccanica delle terre”, McGraw-Hill, 2002.
- [8] Ferrari P., Giannini F., “Corpo stradale e pavimentazioni” – *Ingegneria stradale Vol. II - ISEDI*, Milano, II ris. 1989.
- [9] Di Francesco R., “Lesioni degli edifici”, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 2008
- [10] F. Laino, M. Crispino, E.Toraldo, “Indagine sperimentale sull’utilizzo di aggregati di riciclo per strati di base in ambito aeroportuale” ,Politecnico di Milano, 2007.
- [11] J.F.Shackelford, A. D’Amore, “Scienza e ingegneria dei materiali”, PEARSON, 2008.
- [12] M. Crispino, “Portanza dei sottofondi”, Dispense del corso di Tecnica delle Pavimentazioni, Politecnico di Milano sez. DIAR, 2008.
- [13] A. Picco, S. Valdameri, M. Crispino, E.Toraldo, “Pavimentazioni aeroportuali innovative: impiego di fibre poliolefiniche nei misti cementati per fondazione”, Politecnico di Milano, 2008.

- [14] M Vacatello, M. Crispino, E.Toraldo, “Il nuovo raccordo sud dell’aeroporto di Milano Malpensa: progetto, costruzione e collaudo”, Politecnico di Milano, 2009.
- [15] M. Coni, “Prestazioni meccaniche dei misti cementati fibrorinforzati”, XVI Convegno Internazionale S.I.I.V., 20-22 Settembre 2006, Arcavacata di Rende (CS), Italia, 2006.
- [16] V. Vytlačilová, “ The fibre reinforced concrete with using recycled aggregates”, International journal of system application, engineering & development, Issue 3, Volume 5, 2011.
- [17] B. Schnutgen, L. Vandewalle, “Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete”, Background and Experience, in proceeding of RILEM TC 162-TDF Workshop, Bochum, 2003
- [18] R.F. Zollo, “Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development”, Cement Concrete Composite, p.1357-64, 34, 2004.
- [19] J. Krátky, K. Trtik, J. Vodička, “Fibre reinforced concrete structures”, Prague, 1999.
- [20] S. Caprioli, M. Biagioni, L. Bertolini, M. Carsana, “Caratterizzazione dell’attività pozzolanica delle ceneri volanti prodotte dalla centrale termoelettrica di Vado Ligure”, Politecnico di Milano, pp. 9-11, 2008.
- [21] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, “Capitolato speciale d’appalto tipo per lavori stradali – Formazione di strati di fondazione in misto cementato – ART. 3” .
- [22] E.Toraldo, “Gli Aeroporti”, Dispense del Corso di costruzione di strade, ferrovie ed aeroporti, Politecnico di Milano sez. DIAR, 2009.
- [23] D’andrea A., (1999). Il riciclaggio di rifiuti inerti in edilizia: caratteristiche e campi d’impiego. National meeting June 4, 1999. Napoli.
- [24] H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, “Design and Control of Concrete Mixture”, 14th ed., pp. 121-127, PCA, 2003.
- [25] J.F. Trottier, M. Mahoney, “Innovative Synthetic Fibers”, Shotcrete, 2004.
- [26] G. Plizzari, “High performance concrete: from material properties to structural applications”, Brescia, 19-20 Novembre 2007.
- [27] Altoubat, Salah A., and Lange, David A., “Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age,” ACI Materials Journal, American

- Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, July-August 2001, pp. 323-331, 2001.
- [28] Hardik R. Shah, Akhter B. Hossain, Guy Mazzotta, Jason Weiss, “Time-dependent fracture in restrained concrete: the influence of notches and fibers”, Published in Proceedings of “Advances in Cement and Concrete IX: Volume Change, Cracking and Durability”, August 2003, Copper Mountain, Colorado, 2003.
- [29] Suprenant, Bruce A., and Malisch, Ward R., “The fiber factor,” Concrete Construction, Addison, Illinois, October 1999, pp 43-46, 1999.
- [30] FITESA, “A influência das fibras de polipropileno na exsudação do concreto”, Boletim Técnico N° 03 – 2002.
- [31] American Concrete Institute, “State-of-the-Art Report on Soil Cement, ACI 230.1R-90, ACI Committee 230, July-August 1990.
- [32] Kuhlman, R., “Cracking in Soil Cement – Cause, Effect, Control”, Concrete International, August 1994.
- [33] Norling, L. T., “Minimizing Reflective Cracks in Soil Cement Pavements: a status report of Laboratory Studies and Field Practices,” Highway Research Record 442, 1973.
- [34] Ashraf, M., and George, K.P., “Optimum Cracking for Improved Performance of Cement-Treated Bases,” 78th Annual Meeting, Transportation Research Board, Jan. 10 – 14, 1999.
- [35] Sobhan, K., Jesick, M.R., Dedominicis, E., McFadden, J.P., Cooper, K.A, and Toe, J.R., “A Soil-Cement-Fly Ash Pavement Base Course Reinforced with Recycled Plastic Fibers”, Annual meeting, Transportation Research Board, Jan. 10-14, 1999.
- [36] Mohammad, L., Raghavandra, A., Huang, B., “Laboratory performance evaluation of cement-stabilized soil base mixtures”, Transportation Research Board Record 1721, Geomaterials2000.
- [37] P. Di Mascio, L. Domenichini, A. Ranzio, “Infrastrutture Aeroportuali”, Edizionei Ingegneria 2000, 2009.
- [38] Maher, M.H., and Ho, Y.C., “Behavior of Fiber-Reinforced Cemented Sand under Static and Cyclic Loads,” Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 16, No. 3, September 1993, 1993.

- [39] L. Bertolini, “Materiali da costruzione–Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro” Vol II, Città Studi Edizione, 2006.