



**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile LM-23

Sessione di Laurea Dicembre 2024

Esecuzione prove statiche su miscele di calcestruzzo
“green” per la determinazione sperimentale del modulo
elastico

Relatore:

Prof. Ing. Bernardino Chiaia

Candidata:

Sara Giallanza

Anno Accademico: 2023 – 2024

SOMMARIO

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza riguardo ai problemi ambientali ha portato l'industria delle costruzioni a riconsiderare l'utilizzo di materiali tradizionali come il calcestruzzo. Il calcestruzzo rappresenta uno dei materiali più utilizzati al mondo, tuttavia, la sua produzione contribuisce significativamente alle emissioni di anidride carbonica; pertanto, in accordo con gli obiettivi del "2030 Agenda for Sustainable Development" le ricerche sono state concentrate sulla riduzione delle emissioni mediante il riutilizzo di prodotti di scarto, dando così origine al concetto di "calcestruzzo Green". L'obiettivo di questo studio è l'analisi delle proprietà del calcestruzzo in condizioni di reale cantiere e, a tal proposito, è stato scelto come oggetto di studio il cantiere delle Città delle Scienze e dell'Ambiente di Grugliasco, sede della realizzazione del Nuovo Polo Scientifico sito nel comune di Grugliasco (TO). Il cantiere si compone di diversi fabbricati e, quello su cui si concentrano le indagini è il cosiddetto Edificio Didattica e Ricerca (DR). L'analisi parte dalla differenziazione delle tipologie di calcestruzzo tradizionale e quelle Green, in funzione del rispetto dei "Criteri Ambientali Minimi", obbligo di legge a partire dal 2022; nello specifico si indagano le proprietà delle miscele in termini di resistenza alla compressione, modulo elastico, lavorabilità e durabilità. L'esecuzione delle prove di carico in situ sulle miscele rappresenta un aspetto fondamentale per garantire la conformità agli standard di settore e alle specifiche tecniche; dall'analisi dei risultati delle prove è evidente che i calcestruzzi Green, se opportunamente preparati, garantiscono delle proprietà meccaniche superiori

rispetto alle miscele tradizionali, per cui ricerche future potrebbero essere mirate al raggiungimento di prestazioni elevate con bassissimo impatto ambientale.

ABSTRACT

In recent decades, growing awareness about environmental problems has led the construction industry to reconsider the use of traditional materials such as concrete. Concrete represents one of the most widely used materials in the world, however, its production contributes significantly to carbon dioxide emissions; therefore, in accordance with the goals of the “2030 Agenda for Sustainable Development,” research has been focused on reducing emissions by reusing waste products, thus giving rise to the concept of “Green concrete.” The objective of this study is the analysis of the properties of concrete under real construction site conditions, and in this regard, the construction site of the Cities of Science and Environment in Grugliasco, the site of the construction of the New Science Campus located in the municipality of Grugliasco (TO), was chosen as the object of study. The construction site consists of several buildings and, the one on which the investigations focus is the so-called Teaching and Research (DR) Building. The analysis starts from the differentiation of traditional and Green types of concrete, depending on compliance with the “Minimum Environmental Criteria,” a legal requirement starting in 2022; specifically, the properties of the mixtures are investigated in terms of compressive strength, elastic modulus, workability and durability. Performing in situ load tests on the mixtures is a key aspect to ensure compliance with industry standards and technical specifications; from the analysis of test results, it is clear that Green concretes, if properly prepared, provide superior mechanical properties compared to traditional mixtures, so future research could be aimed at achieving high performance with very low environmental impact.

INDICE

1	INTRODUZIONE	2
1.1	<i>Confronto prestazioni strutturali in condizione di reale cantiere: analisi eco – meccanica.....</i>	3
1.2	<i>Attività di validazione delle proprietà attraverso prove sperimentali e contestualizzazione cantiere</i>	4
2	FONDAMENTI TEORICI.....	6
2.1	<i>Composizione e proprietà del calcestruzzo tradizionale</i>	6
2.2	<i>Composizione e proprietà del calcestruzzo “green”</i>	8
2.2.1	<i>Criteri Ambientali Minimi (CAM).....</i>	10
2.3	<i>Resistenza a compressione e modulo elastico del calcestruzzo.....</i>	11
2.3.1	<i>Modulo di elasticità del calcestruzzo (Modulo di Young)</i>	12
2.3.2	<i>Caratterizzazione del calcestruzzo: controlli di accettazione e prove di carico</i> <i>14</i>	
3	CONTESTUALIZZAZIONE CANTIERE	19
3.1	<i>Edificio Didattica e Ricerca “DR”.....</i>	26
3.1.1	<i>Specifiche calcestruzzi utilizzati.....</i>	31
4	METODOLOGIA PROVE SUL CALCESTRUZZO	34
4.1	<i>Procedura di esecuzione delle prove e validazione dei risultati.....</i>	34
4.1.1	<i>Controlli di accettazione in cantiere.....</i>	34
4.1.2	<i>Prove di carico.....</i>	38
4.2	<i>Prove di supporto.....</i>	45
5	ANALISI DEI RISULTATI	52
5.1	<i>Interpretazione dei risultati.....</i>	58
5.2	<i>Studi complementari.....</i>	59
6	CONCLUSIONI	60
7	BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	61

1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, la crescente consapevolezza riguardo ai problemi ambientali e alla necessità di pratiche sostenibili ha portato l'industria delle costruzioni a riconsiderare l'uso di materiali tradizionali come il calcestruzzo. Il calcestruzzo è uno dei materiali da costruzione più utilizzati al mondo, grazie alla sua durabilità, versatilità e costo relativamente basso. Tuttavia, la sua produzione è altamente energivora e contribuisce significativamente alle emissioni di anidride carbonica (CO₂); *nelle strutture realizzate con calcestruzzo ordinario, il 90% dell'energia necessaria per la costruzione, mentre solo il restante 10% è relativo al confezionamento del calcestruzzo, al trasporto e al suo utilizzo in sito [1].*

Pertanto, gli obiettivi del *2030 Agenda for Sustainable Development* [2] hanno incentivato le ricerche sulla riduzione delle emissioni mediante la diminuzione del consumo di materie prime e il riutilizzo di prodotti di scarto per diminuire la richiesta di quest'ultime [3], dando vita così al concetto di "calcestruzzo green".

Il calcestruzzo green, o calcestruzzo sostenibile, mira a ridurre l'impatto ambientale associato alla produzione e all'uso del calcestruzzo tradizionale. Questo obiettivo può essere raggiunto attraverso varie strategie, tra cui l'uso di materiali riciclati, *definiti materiali cementizi supplementari (SCMs) [4]* la riduzione del contenuto di cemento clinker, l'adozione di leganti alternativi a basso impatto di carbonio e l'inclusione di additivi naturali o industriali che migliorano le proprietà meccaniche e la durabilità del materiale.

La riduzione dell'impatto ambientale è raggiungibile anche mediante la cosiddetta "performance strategy", la quale consiste nella diminuzione del materiale strutturale attraverso l'utilizzo di materiali più performanti [5]. Si tratta del calcestruzzo altissime prestazioni, definito anche UHPC, caratterizzato dalla presenza della Silica Fume: i Fumi di Silice (SF) aumentano la densità del calcestruzzo, grazie alla loro finezza ed estrema reattività, rendendolo più resistente ed impermeabile. [6]

1.1 Confronto prestazioni strutturali in condizione di reale cantiere: analisi eco – meccanica

La valutazione delle prestazioni strutturali del calcestruzzo, sia tradizionale che green, in condizioni di reale cantiere è fondamentale per determinare la sua idoneità per diverse applicazioni edilizie. Queste prestazioni sono influenzate da vari fattori, tra cui la composizione della miscela, il processo di produzione, le condizioni ambientali e le tecniche di posa in opera.

In tali condizioni, l'analisi eco – meccanica rappresenta uno strumento utile per la scelta del conglomerato da utilizzare. Alla base dell'analisi vi è il cosiddetto "Eco – Mechanical Index", il quale tiene in conto sia gli aspetti meccanici che quelli ambientali:

$$EMI = \frac{MI}{EI}$$

Dove: EI = Indice ambientale; MI = Indice meccanico. [7]

Per tenere in considerazione tutti gli aspetti sopra citati, nella scelta della miscela adeguata, è possibile fare riferimento al diagramma adimensionale presente in Fig. 1 [7].

In tale diagramma, EI_{sup} rappresenta il limite superiore dell’impatto ecologico, mentre MI_{inf} rappresenta il limite inferiore delle prestazioni meccaniche.

È evidente che la scelta del calcestruzzo deve ricadere all’interno della Zona 3, in cui sia le prestazioni meccaniche che quelle ambientali sono migliori rispetto a un calcestruzzo ordinario, identificato sul diagramma come “Calcestruzzo di riferimento”.

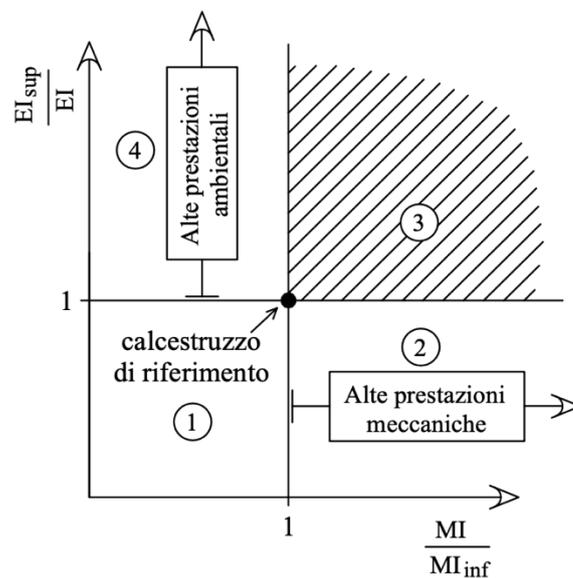


Figura 1. Diagramma adimensionale per la determinazione delle prestazioni eco – meccaniche del calcestruzzo [7].

1.2 Attività di validazione delle proprietà attraverso prove sperimentali e contestualizzazione cantiere

Lo scopo della seguente ricerca è l’analisi e lo studio delle proprietà del calcestruzzo green in condizioni di reale cantiere, attraverso un’attività di validazione delle miscele utilizzate nell’ambito dei lavori per la realizzazione del nuovo Polo Scientifico Universitario, sito nella città di Grugliasco (TO).

Nel caso specifico, verrà effettuata un'analisi della documentazione della relativa alla prequalifica dei calcestruzzi utilizzati, quindi si valuterà come la composizione influenza il modulo elastico, calcolato sperimentalmente attraverso le prove di carico sulle opere.

2 FONDAMENTI TEORICI

2.1 *Composizione e proprietà del calcestruzzo tradizionale*

Il calcestruzzo tradizionale è una miscela di materiali diversi, i quali devono essere opportunamente dosati per ottenere un materiale con determinate caratteristiche a seconda della destinazione d'uso. Nello specifico gli “ingredienti” principali sono:

- **Cemento:** esso rappresenta il legante della miscela, il quale, legandosi con l'acqua, forma una pasta che solidifica al contatto con l'aria. La tipologia più utilizzata è il Cemento Portland, il cui componente più impattante a livello ambientale è il clinker, nonostante esso rappresenti solo il 10% del volume totale del prodotto finale; esistono, comunque, anche tipologie di cemento speciali. [8]
- **Acqua:** questa risulta essere fondamentale nel processo chimico di idratazione del cemento. La quantità influisce direttamente sulle proprietà del materiale finale, ovvero sulla resistenza meccanica e sulla lavorabilità [8].
- **Aggregati:** questi costituiscono circa l'80% del volume e non entrano all'interno della reazione chimica, infatti, questi non contribuiscono al processo di indurimento e si mantengono neutri all'interno di un'ambiente alcalino. Il loro obiettivo principale è l'aumento delle proprietà fisiche del calcestruzzo. [8]

Vi è comunque la possibilità di introdurre aggiunte minerali, definite anche “additivi”, i quali sono sostanze capaci di modificare determinate caratteristiche della miscela. Esse possono essere aggiunte al calcestruzzo solo se non influenzano il processo di indurimento del cemento, la resistenza e la durevolezza.

La composizione del calcestruzzo varia in funzione della resistenza richiesta, dalle condizioni ambientali e dalla specifica destinazione; il corretto bilanciamento dei componenti ne determina le proprietà finali, ossia:

- Resistenza meccanica: rappresenta uno dei parametri più importanti della caratterizzazione e viene definita come *“la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori inferiori”* [9].

La misura viene effettuata su campioni di calcestruzzo a 28 giorni di maturazione ed è determinata mediante prove standardizzate su campioni cubici o cilindrici [10] e rientra nei controlli di accettazione previsti dalla normativa italiana NTC 2018: la prova consiste nel sottoporre il campione ad un carico crescente fino al raggiungimento della rottura. Dal valore del carico massimo raggiunto prima della rottura si calcola la resistenza a compressione.

A livello matematico questa è calcolata come il carico massimo, inteso come forza applicata, rapportato all’area della sezione trasversale del campione e, in funzione di ciò, viene definita la “resistenza a compressione caratteristica” il valore che non viene superato dal 95% dei campioni testati [11].

- **Lavorabilità:** questa proprietà viene definita come la facilità con cui il calcestruzzo può essere miscelato, trasportato e compattato senza segregazione o perdita di omogeneità. La lavorabilità dipende dalla quantità di acqua presente nella miscela e da eventuale presenza di additivi, quali i plasticizzanti con il compito di migliorare la fluidità.

La misura del parametro avviene mediante diverse prove effettuate sul materiale fresco; la prova di slump o di abbassamento del conto è il metodo più comune per misurare la consistenza: essa consiste nel riempire un cono a tronco di piramide, rimuoverlo e misurare la distanza di abbassamento del calcestruzzo dopo la rimozione. [11].

- **Durabilità:** essa è definita come la conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche affinché i livelli di sicurezza vengano mantenuti durante tutta la vita dell'opera [12]. La durabilità risulta influenzata dall'ambiente di esposizione, dalle tecniche di costruzione e dal rapporto acqua-cemento della miscela.

2.2 Composizione e proprietà del calcestruzzo “green”

La definizione di calcestruzzo sostenibile è funzione del *Global Warming Potential dei Green House Gases* (GWP-GHG): infatti, un materiale è definito “green” se è prodotto con un ridotto GWP-GHG.

Il GWP-GHG è una misura relativa di quanto calore intrappola una specifica massa di gas serra nell'atmosfera, rapportata al calore intrappolato dalla stessa massa di CO_2 in un intervallo di tempo di circa 100 anni.

I valori GWP-GHG per le miscele di calcestruzzo possono essere calcolati e riportati in un rapporto di valutazione del ciclo di vita (LCA), verificato da un organismo terzo indipendente. È questo il caso delle Environmental Product Declaration (EPD), da redigere in accordo con gli standard internazionali (ISO 14025 and EN 15804). Tuttavia, i calcestruzzi strutturali non sono sostenibili solo nel caso in cui raggiungono e superano parametri prestazionali, come il limite al GWP-GHG, ma sono sostenibili anche quando soddisfano approcci prescrittivi: ciò accade, ad esempio, nei *Green Public Procurement* Europei, i quali impongono la presenza di un contenuto minimo di materiali riciclati nelle miscele da utilizzare per le costruzioni pubbliche [13].

La realizzazione della miscela a basso impatto ambientale può essere ottenuta seguendo due approcci diversi.

Il primo, definito *substitution strategy*, prevede l'impiego di materiali di scarto industriale, i cosiddetti *supplementary cementitious materials* (SCM) per ridurre il contenuto di clinker all'interno dell'impasto del calcestruzzo: il materiale più comune, ad oggi, è la cenere volante silicea, ovvero un sottoprodotto della combustione del carbone nelle centrali elettriche; insieme a questa, le scorie di altoforno, le ceneri volanti dalla combustione di biomasse e l'utilizzo di rifiuti sono sempre più considerati dall'industria dei materiali da costruzione [14].

Il secondo approccio viene, invece, definito *performance strategy*. Esso è basato sull'utilizzo di calcestruzzi altamente performanti (UHPC, Ultra-High Performance Concrete): la composizione di questa tipologia di materiale è molto simile a quella di una miscela tradizionale, con la differenza che in questo caso

si ha l'aggiunta di fibre e additivi super fluidificanti. [15]. La principale differenza rispetto al calcestruzzo ordinario sta nel basso quantitativo di acqua presente all'interno dell'impasto: si ottiene un materiale con densità, durabilità e resistenza a compressione molto elevata, il che permette una riduzione degli spessori in opera e una riduzione del contenuto d'acqua senza impattare sulla posa in opera [16].

Le proprietà principali della miscela, in questo caso, sono:

- Resistenza meccanica: si hanno valori di resistenza simili a quelle di un calcestruzzo ordinario in funzione delle combinazioni di materiali utilizzati; potrebbe verificarsi che, con l'utilizzo di ceneri volanti, la resistenza sia dapprima inferiore e poi tenda a migliorare;
- Durabilità: valori uguali o superiori rispetto alla miscela ordinaria a causa dell'elevata densità della matrice;
- Prestazioni energetiche: l'uso di leganti alternativi richiede minori temperature di cottura rispetto al cemento Portland.

2.2.1 Criteri Ambientali Minimi (CAM)

Il concetto di calcestruzzo “green” è strettamente legato alla materia legislativa in termini di sostenibilità. Il D.M. 256/2022 del 23 giugno 2022 – “*Criteri ambientali minimi per l'affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l'affidamento dei lavori per interventi edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi*”, stabilisce le prestazioni ambientali minime che i prodotti acquistati dalla Pubblica Amministrazione devono rispettare.

Tali criteri sono parte integrante del Green Public Procurement (GPP) [17], il quale mira a favorire la sostenibilità nelle gare di appalto.

In Italia, i Criteri Ambientali Minimi sono uno strumento per promuovere l'utilizzo di soluzioni costruttive a basso impatto ambientale, indirizzando la pubblica amministrazione e i settori privati verso scelte più sostenibili. La sezione del decreto dedicata al calcestruzzo stabilisce che le miscele, di cui al §2.5.2. del D.M. 256/2022, *“hanno un contenuto di materie riciclate, ovvero recuperate, ovvero di sottoprodotti, di almeno il 5% sul peso del prodotto, inteso come somma delle tre frazioni. Tale percentuale è calcolata come rapporto tra il peso secco delle materie riciclate, recuperate e dei sottoprodotti e il peso del calcestruzzo al netto dell'acqua (acqua efficace e acqua di assorbimento)”* [18].

2.3 Resistenza a compressione e modulo elastico del calcestruzzo

Le proprietà meccaniche del calcestruzzo, introdotte al §2.1 del seguente capitolo, si sviluppano a seguito del fenomeno di indurimento o maturazione della miscela, convenzionalmente stabilito a 28 giorni. A seguito della stagionatura, il materiale viene sottoposto alla prova di compressione mono-assiale su provini di forma cubica o cilindrica, la quale viene condotta imponendo degli spostamenti crescenti e misurando le forze corrispondenti: il risultato è la determinazione del legame tensione-deformazione, da cui si ricava il valore della resistenza a compressione. [19]

Un calcestruzzo è classificato in funzione della sua resistenza a compressione e, nello specifico, si distinguono:

- Resistenza caratteristica, f_{ck} : essa è definita come la resistenza per la quale si ha il 5% di probabilità di trovare valori di resistenza inferiori. In funzione della geometria del provino si individuano la resistenza cilindrica e quella cubica, legate dalla seguente relazione [9]:

$$f_{ck} = 0,83R_{ck}$$

L'attuale normativa qualifica un calcestruzzo mediante la sigla Cf_{ck}/R_{ck} [MPa].

- Resistenza media a compressione, f_{cm} : questa risulta essere funzione delle condizioni ambientali e della maturazione del calcestruzzo ed è calcolabile come [9]:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

2.3.1 Modulo di elasticità del calcestruzzo (Modulo di Young)

Il modulo elastico del calcestruzzo, o modulo di Young, descrive la capacità del materiale di resistere a deformazioni elastiche sotto carico.

A livello matematico esso è calcolato come il rapporto tra il valore di tensione (forza su unità di area) applicata al materiale e la deformazione elastica che ne risulta [20]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Il modulo elastico può essere calcolato secondo due diversi metodi: tramite prove dirette o in maniera indiretta.

Nel primo caso, la metodologia che consente la caratterizzazione è la prova di compressione mono-assiale, già descritta in precedenza, la quale ha come risultato la definizione del diagramma tensione deformazione:

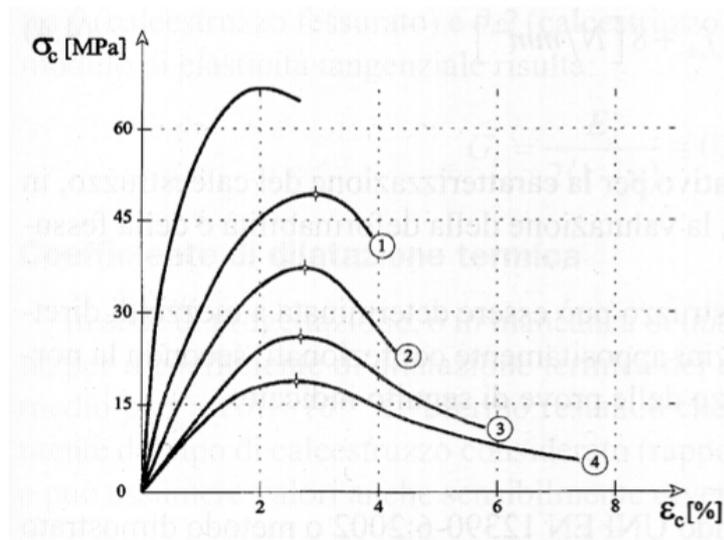


Figura 2. Legame tensione-deformazione per diverse tipologie di calcestruzzo [20]

Il modulo elastico è definito come la tangente alla curva nel tratto lineare e, per il calcestruzzo, si valuta sia il modulo elastico tangente all'origine, E_0 , sia il modulo elastico secante E_c in corrispondenza dell'applicazione di un carico pari al 40% del carico di rottura [20].

Il metodo indiretto prevede il calcolo del modulo elastico istantaneo [9], il quale viene determinato come il rapporto tra la tensione nulla e $0,40f_{cm}$, sulla base di apposite prove da eseguire ai sensi della norma UNI EN 12390-13. In fase progettuale viene assunto:

$$E_{cm} = 22.000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \left[\frac{N}{mm^2}\right]$$

Il modulo elastico risulta essere, quindi, direttamente dipendente dalla resistenza a compressione del materiale e pertanto risulta essere anche funzione di:

- **Composizione:** la quantità di cemento, la qualità e il tipo di aggregati influenzano fortemente la rigidità del materiale; nello specifico, nel caso dei calcestruzzi “green” la presenza di materiali meno compatti, come aggregati riciclati, o l’utilizzo di leganti alternativi tende a far aumentare la porosità globale del calcestruzzo e quindi ridurre la densità. Questo porta ad avere delle caratteristiche di resistenza apparentemente inferiori rispetto a quelle di una miscela tradizionale, ma considerando gli effetti a lungo termini le prestazioni risultano essere simili [21].
- **Età:** il modulo elastico cresce con l’indurimento del calcestruzzo poiché durante il processo di maturazione si ha la formazione di cristalli che porta ad un incremento delle proprietà meccanica. Da qui nasce la tempistica di riferimento di 28 giorni per la determinazione delle proprietà meccaniche.

2.3.2 Caratterizzazione del calcestruzzo: controlli di accettazione e prove di carico

Nelle strutture in calcestruzzo armato, la classe di resistenza del materiale è definita in fase progettuale; durante la realizzazione dell’opera il calcestruzzo è sottoposto a un regime di controllo di qualità, con lo scopo di garantire il rispetto delle prescrizioni definite in fase iniziale.

L’esecuzione dei controlli accettazione rientra nel controllo da eseguire sul materiale durante l’esecuzione dell’opera e consente la determinazione della

resistenza del calcestruzzo, la quale entra nella relazione per la determinazione del modulo elastico. Per il calcestruzzo sono previste due tipologie di controllo a seconda del volume di materiale impiegato.

Nel caso di opere che richiedono l'impiego massimo di $300 m^3$ di miscela è obbligatorio il controllo di accettazione di tipo statistico, tipo A (§11.2.5.1 NTC 2018): ogni controllo è costituito da tre prelievi almeno ogni $100 m^3$ o per ogni giorno di getto. Nel caso di opere strutturali che richiedano l'impiego di più di $1500 m^3$ di miscela omogenea è obbligatorio il controllo di tipo B (§11.2.5.2 NTC 2018), il quale prevede:

- Prelievo di n. 2 cubetti di calcestruzzo $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$;
- Almeno 15 prelievi (30 cubetti);
- Almeno 15 prelievi su $1500 m^3$ di getto;
- 1 prelievo al giorno.

Il controllo di accettazione è ritenuto accettabile se, per il numero di prelievi previsti per entrambi le tipologie, sono verificate le disuguaglianze previste da normativa, di cui si riporta di seguito la tabella riepilogativa.

Tab. 11.2.I

Controllo di tipo A	Controllo di tipo B
$R_{c,min} \geq R_{ck} - 3,5$	
$R_{cm28} \geq R_{ck} + 3,5$ (N° prelievi: 3)	$R_{cm28} \geq R_{ck} + 1,48 s$ (N° prelievi ≥ 15)

Ove: R_{cm28} = resistenza media dei prelievi (N/mm²); $R_{c,min}$ = minore valore di resistenza dei prelievi (N/mm²);
s = scarto quadratico medio

Figura 3. Disuguaglianze da verificare per i controlli di accettazione [9]

Altro parametro che rientra nella definizione del modulo di Young è la deformazione. Questo parametro viene principalmente calcolato in maniera sperimentale, rientrando tra i risultati delle prove di carico sulle strutture ai fini del collaudo statico.

L'obiettivo delle prove di carico sulle strutture è la verifica della corrispondenza tra il comportamento degli elementi strutturali previsto in fase di progettazione e il corrispondente comportamento sperimentale sotto l'azione dei carichi di esercizio, noti i parametri geometrici e meccanici.

Esistono molteplici tipologie di carico, in funzione dell'elemento strutturale [22]:

- Prove di carico su elementi strutturali in elevazione, quali solai, travi, rampe e sbalzi;
- Prove di carico su elementi strutturali di fondazioni.

E in funzione della modalità di applicazione del carico:

- Prova con carico concentrato;
- Prova con carico distribuito.

Nel cantiere oggetto di studio sono state effettuate entrambe le modalità di carico, ma verrà indagata solo quella utilizzata sulla struttura oggetto della seguente tesi.

La prova viene eseguita mediante l'applicazione di un carico statico concentrato, secondo cicli determinati di carico – scarico, attraverso l'utilizzo di martinetti idraulici opportunamente contrastati da puntelli al solaio superiore, al fine di

generare su una striscia di struttura lo stesso momento flettente massimo dovuto al carico concentrato o distribuito in esercizio.

I martinetti idraulici sono caricati in modo graduale con fasi di incremento del carico e di mantenimento a carico costante; successivamente al raggiungimento del carico di prova si effettua lo scarico in modo continuo fino al ritorno a zero. La forza da applicare al singolo martinetto è determinata considerando il carico distribuito da applicare all'elemento strutturale e comparato con l'applicazione concentrata di una forza in due punti di spinta, mediante l'equivalenza del momento massimo.

L'obiettivo della prova è il calcolo delle frecce, le quali andranno confrontate con quelle teoriche, al fine di valutare l'aspetto deformativo previsto dalla normativa. In particolare, la NTC 2018 dispone che:

“L'esito della prova va valutato sulla base dei seguenti elementi:

- *Le deformazioni si accrescano all'incirca proporzionalmente ai carichi;*
- *Nel corso della prova non si siano prodotte fratture, fessurazioni, deformazioni o dissesti che compromettono la sicurezza o la conservazione dell'opera;*
- *La deformazione residua dopo la prima applicazione del carico massimo non superi una quota parte di quella totale commisurata ai prevedibili assestamenti iniziali di tipo anelastico della struttura oggetto della prova. Nel caso invece che tale limite venga superato, prove di carico*

successive devono indicare che la struttura tenda ad un comportamento elastico;

- *La deformazione elastica risulti non maggiore di quella calcolata [23]”.*

3 CONTESTUALIZZAZIONE CANTIERE

Il soggetto ospitante è stato l'Università di Torino, in quanto Direzione Lavori del cantiere della "Città della Scienza e dell'Ambiente", la quale ha bandito la gara avente oggetto la realizzazione del Polo Scientifico, aggiudicata dal raggruppamento Grugliasco S.c.a.r.l. (società consortile a responsabilità limitata) composto da Itinera S.p.A., Costruzioni Generali Gilardi S.p.A. ed Euroimpianti S.p.A. Il nuovo progetto, che costituisce uno dei più importanti investimenti di edilizia universitaria in Italia, avrà sede su un'area verde di oltre 228.600 mq nel territorio del Comune di Grugliasco; esso diventerà la sede delle attività didattiche e di ricerca dei Dipartimenti di Chimica, Scienze della Vita e Biologia dei Sistemi, che si affiancheranno a quelli di Scienze Agrarie, Forestali e Alimentari e Scienze Veterinarie già presenti. [24]



Figura 4. Inquadramento area di intervento

Il progetto, frutto del Protocollo di Intesa tra Università degli Studi di Torino, Regione Piemonte, Città Metropolitana, Camera di Commercio, Politecnico di Torino e Comune di Grugliasco, è finalizzato alla realizzazione di spazi per la didattica, per la ricerca, incubatori di imprese, oltre alla presenza di una vasta area verde, usufruibile dall'intera comunità studentesca.

L'area di intervento è suddivisa in:

- Edificio Didattica e Ricerca: denominato anche “Edificio DR” è un edificio a pettine, suddiviso in maniche, con piano seminterrato, piano terra, primo e secondo piano, i quali andranno ad accogliere diversi dipartimenti. La manica 2.1 è la più larga ed è destinata all'accoglienza delle aule dei laboratori didattici; accoglie anche sale studio, sale riunioni e spogliatoi per gli studenti. All'estremità est è presente il laboratorio gas riducenti, strutturato con tre locali distinti e collegato al corpo 2.1 attraverso un percorso coperto e aerato. Le altre maniche hanno dimensione più piccola e saranno atte ad ospitare laboratori di ricerca e studi dei dottori, ricercatori e tecnici. [24]



Figura 5. Panoramica Edificio DR

- Edificio Didattica e Amministrazione: denominato “Edificio DA”, esso è articolato in 2 corpi di fabbrica; il corpo 1.2 è alto 3 piani ed è dedicato alla Ristorazione e agli Uffici Amministrativi; il corpo 2.2 è alto 4 piani ed è il corpo più grande, destinato alla Didattica, infatti, sono presenti 2 sale convegni e tutte le aule. Qui sarà anche presente l’ingresso principale alla Didattica. [24]



Figura 6. Panoramica Edificio DA

- Centro sportivo: comprende la palestra, gli spogliatoi, una pista di atletica coperta, 2 campi da calcio a 5 e 3 campi di beach volley; a completamento è previsto anche uno spogliatoio, il quale è un corpo di fabbrica rettangolare ad un piano. Il corpo principale prevede un piano seminterrato in c.a. e un unico piano fuori terra realizzato in acciaio poggiante su un solaio realizzato con lastre prefabbricate tipo “Predalles”. [24]



Figura 7. Centro sportivo

- Centrale tecnologica: essa è costituita da un piano interrato, il quale conterrà la centrale antincendio, la centrale idrica e quella frigorifera, e da un piano terra, il quale conterrà la cabina elettrica di trasformazione e il locale per l'allaccio al teleriscaldamento cittadino. [24]



Figura 8. Centrale tecnologica

- Passerella: questa prevede un completamento del ponte già esistente sulla stazione ferroviaria e la presenza di rampe pedonali e pista ciclabile, realizzate in acciaio su struttura portante in calcestruzzo armato, con il compito di collegamento del campus universitario con la città di Grugliasco e i servizi annessi. [24]



Figura 9. Passerella pedonale

Tutti gli edifici, ad esclusione del centro sportivo e della passerella, sono realizzati in calcestruzzo armato gettato in opera. È stato previsto l'utilizzo di elementi di solaio prefabbricati utilizzati per piccole porzioni.

Segue documentazione fotografica dei singoli edifici durante le fasi lavorative in cantiere.



Figura 10. Vista panoramica dell'intera area di cantiere



Figura 11. Panoramica dell'Edificio DA



Figura 12. Inquadramento area del centro sportivo



Figura 13. Inquadramento area passerella pedonale

3.1 Edificio Didattica e Ricerca “DR”

L'intervento, nella sua completezza, rappresenta materia di interesse nel seguente studio in quanto il progetto esecutivo e la successiva realizzazione rientrano all'interno dei requisiti e degli obblighi previsti dal D.M. 256/2023 di cui già discusso in precedenza.

Nello specifico, l'oggetto dell'analisi della seguente tesi è rappresentato dall'Edificio Didattica e Ricerca, denominato anche DR.

Il corpo DR risulta essere diviso in due “edifici”: *Edificio 1*, composto dal blocco 2.1, ed *Edificio 2*, composto dai restanti blocchi denominati 3.1,3.2 e 3.3 giuntati a tutta altezza con il precedente.

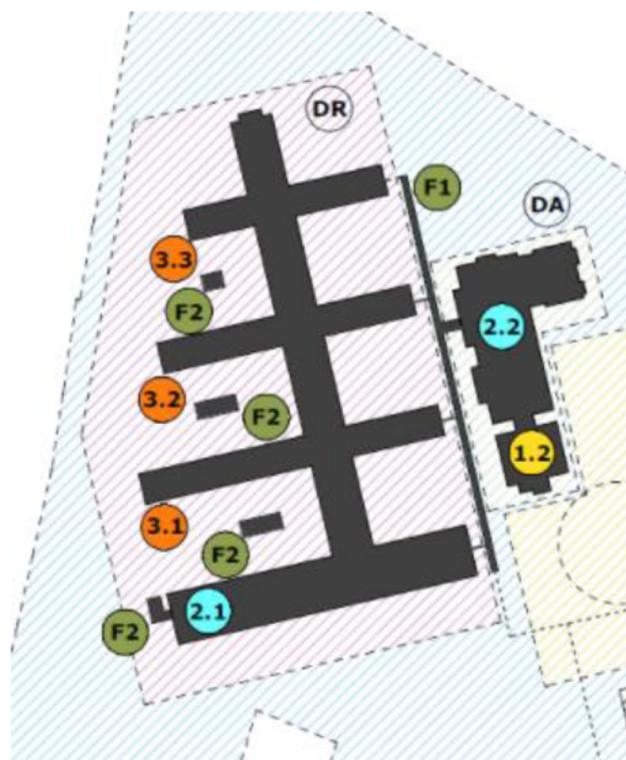


Figura 14. Denominazione corpi dei vari edifici

Ogni blocco è formato da tre strutture in c.a. indipendenti di forma rettangolare, collegate in fondazione e giuntate per la parte in elevazione, con caratteristiche pressoché identiche.

Tutti i fabbricati presentano un livello interrato e tre piani fuori terra, ciascuno di altezza 4 metri, per un'elevazione totale di 12 m dal piano terra.

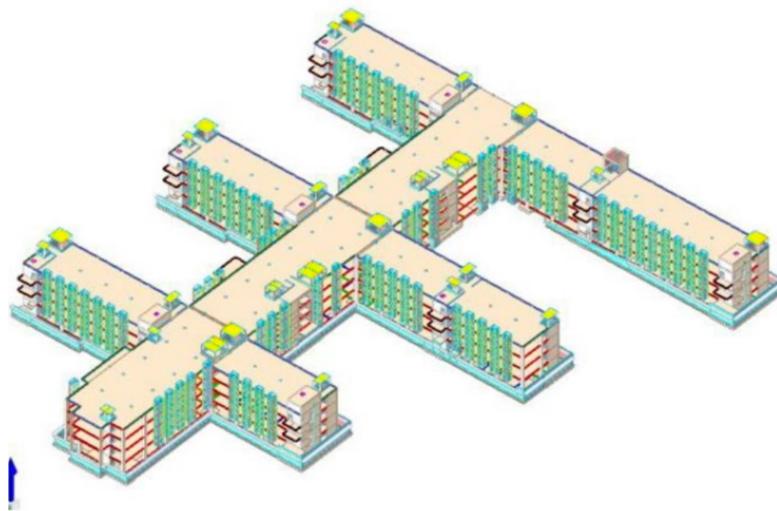


Figura 15. Vista prospettica del modello strutturale – Edificio DR

La struttura resistente dell'edificio è in cemento armato di tipo mista a telaio e pareti, formati da un sistema a telaio realizzato nelle due direzioni ortogonali, e da nuclei in c.a. costituenti i vani ascensore, le scale e i cavedi per gli impianti.

Le fondazioni sono realizzate tramite plinti e platee di dimensioni variabile in funzione del pilastro considerato e altezza, anch'essa variabile, di 110 *cm* per le platee e 120 *cm* per i plinti.

Gli orizzontamenti sono costituiti da solai con solette piene in c.a. con funzionamento a piastra, di spessore 26 o 30 *cm*, ad esclusione del solaio del

semiinterrato che presenta uno spessore di 20 cm, direttamente poggiati sui pilastri senza l'ausilio di travi alte. Le coperture sono realizzate con solai inclinati secondo la pendenza adeguata al corretto smaltimento delle acque meteoriche.

Per quanto riguarda gli elementi verticali, i pilastri presentano sezione quadrata 70 × 70 cm a livello interrato per poi passare a 60 × 60 cm per i restanti piani.

Lungo tutto il perimetro degli edifici si sviluppa il muro dell'intercapedine le cui fondazioni sono direttamente collegati con le strutture di fondazione del fabbricato.

Tutti gli elementi costituenti la struttura portante in elevazione vengono realizzati in c.a. gettato in opera con calcestruzzi con classe di resistenza C35/45, mentre le fondazioni e il paramento del muro dell'intercapedine è realizzato con calcestruzzo C30/37.

Segue documentazione fotografica dell'edificio oggetto dell'analisi effettuata in cantiere.



Figura 16. Edificio DR – Vista dall’alto



Figura 17. Edificio DR – Vista Sud



Figura 18. Edificio DR – Vista Nord



Figura 19. Edificio DR – Dettaglio elementi strutturali

3.1.1 Specifiche calcestruzzi utilizzati

Nel fabbricato in oggetto sono state utilizzate due miscele di calcestruzzi provenienti da due fornitori diversi.

Il fornitore di materiale utilizzato per la quasi totalità della struttura è Unical S.p.A., facente parte del gruppo multinazionale “Buzzi Unicem” prodotto negli impianti di Orbassano (TO) A03 e Berlia (TO) A05. Si tratta di miscele realizzate su misura, atte a soddisfare requisiti prestazionali ben precisi; ogni calcestruzzo è identificato univocamente da un codice, a cui segue un nome e una descrizione che vengono riportati nel documento di trasporto.

CODICE	NOME	DESCRIZIONE
ZA000456	SU MISURA	ZA000456-C12/15 S3 D22,4 X0 CAM5
ZA000457	SU MISURA	ZA000457-C12/15 S4 D22,4 X0 CAM5
ZA000458	SU MISURA	ZA000458-C30/37 a/c max 0,60 S3 D22,4 XC2 CAM5
ZA000459	SU MISURA	ZA000459-C30/37 a/c max 0,60 S4 D22,4 XC2 CAM5
ZA000460	SU MISURA	ZA000460-C30/37 a/c max 0,60 S5 D22,4 XC2 CAM5

Figura 20. Estratto delle miscele scelte per il cantiere in oggetto

Oltre alle caratteristiche meccaniche e alle informazioni specifiche sulla miscela, nella descrizione è presente la sigla “CAM5”, la quale indica il quantitativo di componenti con contenuto di riciclato, inteso come percentuale di materiale di scarto impiegato come materia prima secondaria nella

produzione di un metro cubo del prodotto selezionato: il contenuto medio è superiore per le forniture in oggetto è pari al 5,8%.

PRODOTTO UNICAL	QUANTITÀ INDICATIVA (m ³)	COMPONENTI CON CONTENUTO DI RICICLATO	% RICICLATO ≥
ZA000456- C12/15 S3 D22,4 X0 CAM5	1	Cemento; Aggregato	6,1
ZA000457- C12/15 S4 D22,4 X0 CAM5	1	Cemento; Aggregato	6,1
ZA000458- C30/37 a/c max 0,60 S3 D22,4 XC2 CAM5	1	Cemento	5,4
ZA000459- C30/37 a/c max 0,60 S4 D22,4 XC2 CAM5	1	Cemento	5,4
ZA000460- C30/37 a/c max 0,60 S5 D22,4 XC2 CAM5	1	Cemento	5,4
ZA000461- C35/45 a/c max 0,60 S4 D22,4 XC1 CAM5	1	Cemento	6,1
ZA000462- C35/45 a/c max 0,60 S5 D22,4 XC1 CAM5	1	Cemento	6,1
ZA000463- C35/45 a/c max 0,5 S4 D22,4 XC4-XF1 CAM5	1	Cemento	6,1
ZA000464- C35/45 a/c max 0,5 S5 D22,4 XC4-XF1 CAM5	1	Cemento	6,1
ZA000484-C32/40 a/c max 0,6 S3 D22,4 XC1-XC2 CAM5	1	Cemento	5,7

CONTENUTO INDICATIVO DI MATERIALE RICICLATO DELLA FORNITURA (%) ≥ 5,8

Figura 21. Estratto della scheda CAM della fornitura di Unical S.p.A.

Secondo fornitore di calcestruzzo è Calcestruzzi Germaire S.r.l., prodotto nell'impianto di Venaria Reale. Ogni miscela è realizzata su misura e identificata attraverso una sigla riassuntiva delle proprietà fisiche e meccaniche; anche in questo caso è possibile valutare il quantitativo di materiale riciclato utilizzato nel mix design del calcestruzzo, consultando l'asserzione ambientale.

Contenuto di materiale riciclato ** (Par. 7.8 UNI EN ISO 14021:2016)				
Nome Prodotto	Massa secca del prodotto (Kg/m ³)	Pre-consumo (%)	Post-consumo (%)	Totale
BETON CAM C20/25 S3-S4 Dmax 22,4 mm XC1	2191	≥ 5%	0,0	≥ 5%
BETON CAM C25/30 S4 Dmax 22,4 mm XC1-XC2	2191	≥ 5%	0,0	≥ 5%
BETON CAM C28/35 S4 Dmax 22,4 mm XC1-XC2-XC3	2181	≥ 5%	0,0	≥ 5%
BETON CAM C30/37 S3 Dmax 22.4 mm XC1-XC2-XC3	2191	≥ 5%	0,0	≥ 5%
BETON CAM C30/37 S4 Dmax 22,4 mm XC1-XC2-XC3	2189	≥ 5%	0,0	≥ 5%
BETON CAM C30/37 S5 Dmax 22.4 mm XC1-XC2-XC3	2191	≥ 5%	0,0	≥ 5%
BETON CAM C32/40 S4 Dmax 22,4 mm XC1-XC2-XC3-XC4- XF1	2199	≥ 5%	0,0	≥ 5%
BETON CAM C35/45 S4 Dmax 22.4 mm	2194	≥ 5%	0,0	≥ 5%

Figura 22. Estratto della scheda CAM della fornitura di Germaire Calcestruzzi S.r.l.

Il contenuto di materiale riciclato comprende materiale derivante da insediamenti domestici o da installazioni commerciali che non può essere riutilizzato per lo scopo previsto. Dalla figura è possibile osservare che, anche in questo caso, è superiore al 5% e quindi i limiti previsti dai Criteri Ambientali Minimi sono soddisfatti.

4 METODOLOGIA PROVE SUL CALCESTRUZZO

4.1 *Procedura di esecuzione delle prove e validazione dei risultati*

Per l'Edificio oggetto di studio, ma anche per tutti gli edifici costituenti il complesso universitario, in corso d'opera sono stati eseguiti i controlli previsti dalla normativa vigente, in particolare il cap.11 della NTC 2018 e relativa circolare n. 7/2019 C.S.LL.PP., articolati secondo le seguenti fasi:

1. Controlli documentali preventivi: la procedura prevede l'approvazione della documentazione da parte del soggetto verificatore, il quale in questo caso è stato "CONTECO – RINA CHECK", che termina con la sottomissione della "Scheda di approvazione materiali" alla DL.
2. Controlli di accettazione in cantiere: prelievo dei provini e controllo di accettazione.
3. Verifica della posa in opera e delle prescrizioni di progetto: al termine della posa delle armature, la corretta esecuzione dovrà essere garantita dal Direttore Tecnico di cantiere dell'impresa che apporrà la sua firma di garanzia su un modulo appositamente predisposto.

Le specifiche sulla fase 1. e 3. non saranno riportate poiché di poco interesse con l'obiettivo del seguente studio.

4.1.1 Controlli di accettazione in cantiere

La fase dei controlli di accettazione in cantiere riguarda il prelievo dei provini e la valutazione della resistenza a compressione del calcestruzzo, le cui modalità di prova sono state ampiamente discusse nei capitoli precedenti.

Il prelievo dei provini, per il controllo di accettazione verrà eseguito alla presenza del D.L. o del direttore operativo delle strutture, che provvederanno alla redazione di apposito verbale di prelievo e ne disporranno l'identificazione dei provini mediante sigle, etichettature indelebili, ecc.; la certificazione effettuata dal laboratorio prove materiali deve riportare riferimento a tale verbale [25].

Un prelievo consiste nel prelevare dagli impasti il calcestruzzo necessario per la confezione di un gruppo di due provini (cubetti).

Al fine dell'accettazione dei materiali dovranno essere effettuati prelievi dei provini di calcestruzzo, secondo le modalità previste: per la seguente opera strutturale, la quale richiede l'impiego di più di $1500 m^3$ di miscela omogenea è obbligatorio il controllo di accettazione di tipo B (§11.2.5.2 NTC), da effettuare con frequenza non minore di un controllo ogni $1500 m^3$, secondo le seguenti modalità:

- 15 prelievi su $100 m^3$ di getto;
- 1 prelievo al giorno.

I provini dovranno essere sformati entro tre giorni e non prima di 16 ore. Devono essere protetti da urti, vibrazioni e disidratazione. I medesimi vanno conservati alla temperatura di circa $20^{\circ} C$ in recipienti colmi d'acqua o in camere di maturazione [25].

I prelievi, dopo avvenuta maturazione di 28 gg., dovranno essere portati a rottura da parte di un laboratorio di prove certificato.

Il Controllo di Tipo B è ritenuto accettabile se, per un numero di prelievi non minore di 15, sono verificate le disuguaglianze previste da normative, le quali sono state illustrate nel capitolo 2 della seguente tesi.

I requisiti prestazionali più stringenti, adottati per i controlli di Tipo B, sono finalizzati garantire la costanza prestazionale della miscela. In tal senso viene anche precisato che non possono essere accettati calcestruzzi con coefficiente di variazione (s/R_m) superiore a 0,3, dove s è lo scarto quadratico medio e R_m è la resistenza media dei prelievi (N/mm^2). Inoltre, la norma prevede che con coefficiente di variazione superiore a 0,15 occorrono controlli più accurati, integrati con prove complementari di cui al § 11.2.7 [9].

Si riporta di seguito un estratto dell'attività di prelievo e controllo sulla miscela effettuato in cantiere.

CONTROLLO DI PRODUZIONE DI FABBRICA DEL CALCESTRUZZO - MINUTA DI PROVA

1 DATI DEL DOCUMENTO DI TRASPORTO					
Produttore	<input checked="" type="checkbox"/> Unical <input type="checkbox"/> Cts Germaire		N. del prelievo:		P699
Committente (se Cismondi S.r.l.)	Grugliasco Scari		Ora fine carico in impianto		
Impianto di provenienza	<input checked="" type="checkbox"/> Orbassano <input type="checkbox"/> Berlia <input type="checkbox"/> Venaria		Ora inizio scarico		15:43
Luogo del prelievo	Nuovo Polo Universitario di Grugliasco (TO)		Ora fine scarico		16:30
Elemento strutturale	DR. 21.5. B1031		Temp. ambiente (°C)		8
Volume cls ATB (m³)	10	Targa autobetoniera	CK 133 DT	Condizioni meteo	
DDT N.	7115	DDT data	28-11-22	<input type="checkbox"/> Sereno <input type="checkbox"/> Variabile	
Modalità di getto	<input checked="" type="checkbox"/> Pompa <input type="checkbox"/> Benna		Temp. calcestruzzo (°C)	<input checked="" type="checkbox"/> Coperto <input type="checkbox"/> Pioggia	
	<input type="checkbox"/> Canala <input type="checkbox"/> _____		Impresa	Pressione manometro (bar)	
1.1 MISCELA CALCESTRUZZO FORNITA					
Classe di resistenza	C20/25 <input type="checkbox"/>	C28/35 <input type="checkbox"/>	C32/40 <input type="checkbox"/>	C40/50 <input type="checkbox"/>	Altro, specificare:
	C25/30 <input type="checkbox"/>	C30/37 <input type="checkbox"/>	C35/45 <input checked="" type="checkbox"/>	C45/55 <input type="checkbox"/>	-
Classe di consistenza	S1 <input type="checkbox"/>	S3 <input type="checkbox"/>	S5 <input checked="" type="checkbox"/>		
	S2 <input type="checkbox"/>	S4 <input type="checkbox"/>	SCC <input type="checkbox"/>		
Classe di esposizione	X0 <input type="checkbox"/>				
	XC1 <input checked="" type="checkbox"/>	XC2 <input type="checkbox"/>	XC3 <input type="checkbox"/>	XC4 <input type="checkbox"/>	
	XD1 <input type="checkbox"/>	XD2 <input type="checkbox"/>	XD3 <input type="checkbox"/>		
	XS1 <input type="checkbox"/>	XS2 <input type="checkbox"/>	XS3 <input type="checkbox"/>		
	XF1 <input type="checkbox"/>	XF2 <input type="checkbox"/>	XF3 <input type="checkbox"/>	XF4 <input type="checkbox"/>	D max (mm)
	XA1 <input type="checkbox"/>	XA2 <input type="checkbox"/>	XA3 <input type="checkbox"/>	22	
2 PROVE SU CALCESTRUZZO FRESCO					
Aspetto a vista del calcestruzzo		Coeso <input checked="" type="checkbox"/>	Segregato <input type="checkbox"/>	Acqua aggiunta (l) -	
2.1 CONSISTENZA - UNI EN 12350-2, UNI EN 206					
Abbassamento (mm)	Classe di consistenza	Barrare la classe corrispondente	Abbassamento al cono (mm)		
10-40	S1	<input type="checkbox"/>			
50-90	S2	<input type="checkbox"/>			
100-150	S3	<input type="checkbox"/>			
160-210	S4	<input type="checkbox"/>			
>210	S5	<input checked="" type="checkbox"/>	250		
Tipo di abbassamento					
Regolare <input type="checkbox"/>		Taglio <input type="checkbox"/>		Collasso autolivellante <input checked="" type="checkbox"/>	

Figura 23. Minuta di prova sul controllo di produzione di fabbrica



Figura 24. Stoccaggio e identificazione dei provini

4.1.2 Prove di carico

Le prove di carico rientrano nell'ambito delle attività propedeutiche al collaudo statico delle opere strutturali. Infatti, rientra tra i compiti del collaudatore quello di esaminare l'impostazione generale della progettazione nei suoi aspetti strutturali e geotecnici con riferimento agli schemi di calcolo ed alle azioni considerate, nonché alle caratteristiche costruttive delle strutture.

In riferimento all'edificio DR, la campagna di prove di carico è stata concentrata sui solai dei singoli piani costituenti il fabbricato: considerata la standardizzazione e ripetitività modulare delle strutture, che durante la loro esecuzione non hanno ravvisato particolari criticità tali da richiedere verifiche di dettaglio, le prove hanno indagato le porzioni di solaio in funzione delle loro caratteristiche geometriche e delle azioni variabili che gravano su di esse.

Le azioni necessarie sono state ottenute con impiego di carichi concentrati equivalenti, con modalità che è possibile realizzare in cantiere, ai fini della simulazione dei carichi di progetto e, quindi, in configurazioni geometriche ed entità tali da determinare le sollecitazioni massimo nelle diverse direzioni significative.

Per il raggiungimento delle predette sollecitazioni di progetto, corrispondenti alla combinazione rara degli SLE, sono state previste due modalità di prova, in funzione della posizione dell'orizzontamento in esame:

- Martinetti oleodinamici: utilizzati laddove sono presenti superiormente elementi di contrasto (solaio del piano superiore); questi sono caricati in modo graduale con fasi di incremento del carico, mantenimento e scarico fino al ritorno alla condizione iniziale;
- Blocchi di calcestruzzo: di massa 22 kN, utilizzati in copertura, posizionati come da relazione con l'ausilio della gru di cantiere; durante ciascuna fase di prove le masse sono state mantenute in posizione per il tempo necessario alla stabilizzazione delle misure.

Si riportano di seguito i parametri preliminari lo svolgimento della prova.

Codice prova	Spessore solaio (cm)	Modalità di applicazione del carico	Forza singolo martinetto / Massa blocco (kN)	N. martinetti / N. blocchi (-)
Prova_01	30	Martinetti idraulici	144.6	8
Prova_02	26	Martinetti idraulici	138.8	8
Prova_03	30	Martinetti idraulici	134.6	8
Prova_04	26	Martinetti idraulici	138.8	8
Prova_05	30	Blocchi di calcestruzzo	22.0	28
Prova_06	30	Blocchi di calcestruzzo	22.0	26

Figura 25. Caratteristiche dei solai, modalità e carichi di prova

Secondo quanto richiesto dal Collaudatore sono state previste 6 prove totali, di cui:

- N. 4 prove sui solai interpiano mediante martinetti idraulici;
- N. 2 prove sulle coperture con blocchi in calcestruzzo da 1 mc dal peso di 2200 kg.

In termini generali, considerati tre campi di solaio adiacenti, denominati A, B e C, sono state previste due configurazioni, per ciascuna della quale sono stati eseguiti due cicli, con step di carico e mantenimento del carico di prova fino alla stabilizzazione degli abbassamenti, che sono stati misurati in continuo:

- Configurazione 1: Carico campo centrale;
- Configurazione 2: Carico campi A, B, C.

Per ciascuna configurazione di prova sono stati eseguiti due cicli, con step di carico e mantenimento fino alla stabilizzazione degli abbassamenti, che sono stati misurati in continuo mediante sistema di lettura automatico posto all'intradosso.

Nel caso di applicazione del carico con blocchi di calcestruzzo di massa nota, in accordo con la Direzione Lavori, è stato ridotto il numero di step di carico intermedi.

Di seguito si riportano gli schemi di carico delle prove, contenenti le posizioni dei punti di applicazione dei carichi.

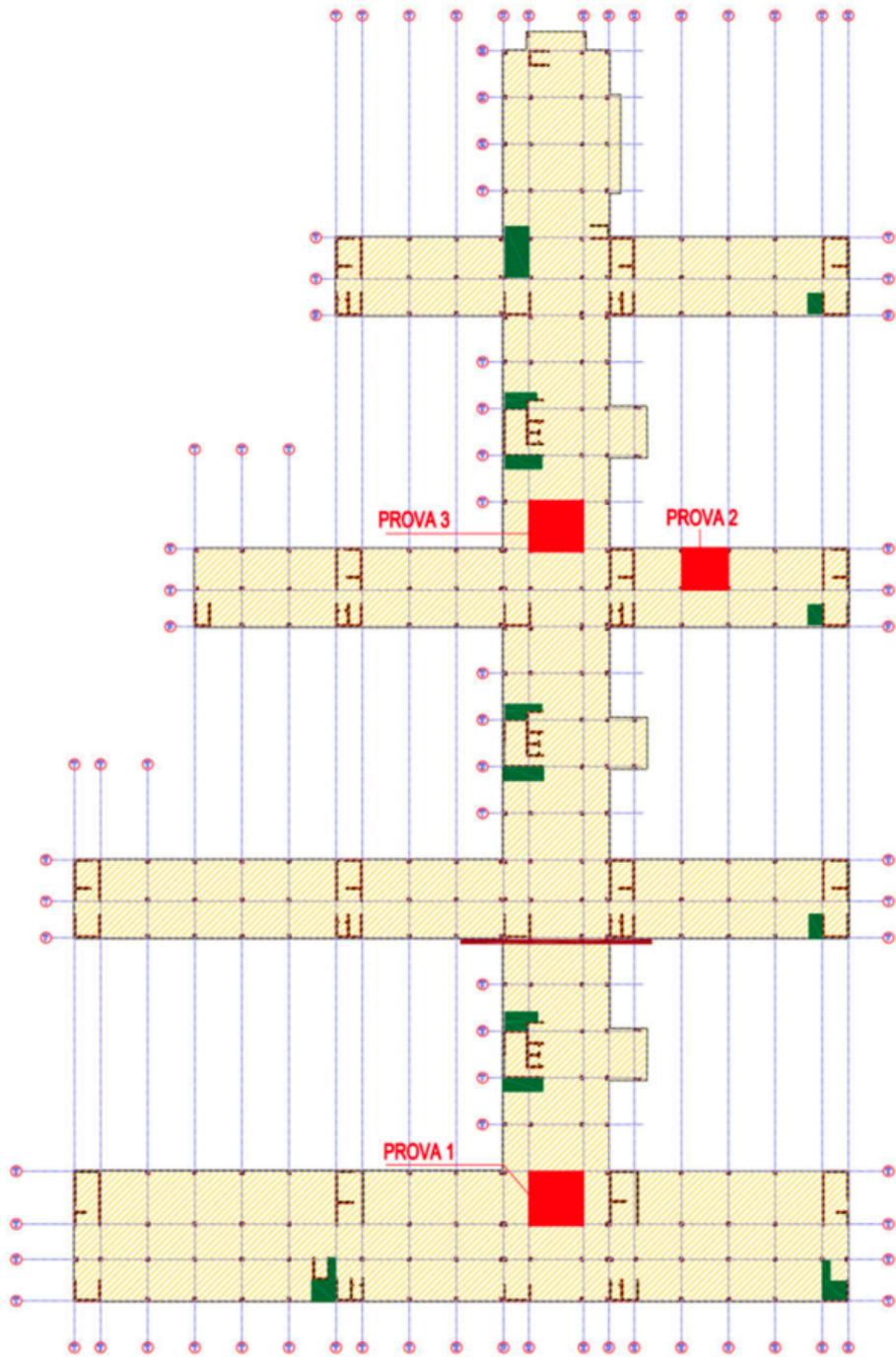


Figura 26. Schema di prova “Edificio DR – Solaio piano 1”

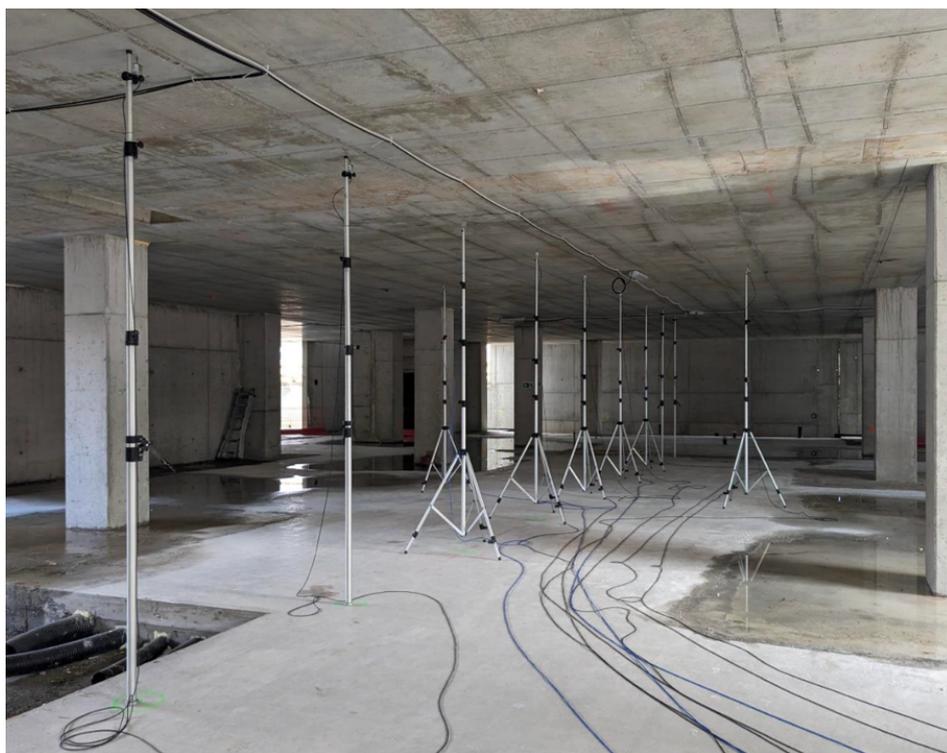


Figura 28. Trasduttori di spostamento installati su aste telescopiche per la misura degli abbassamenti



Figura 29. Martinetti oleodinamici per sistema di applicazione del carico

L'esecuzione dei prelievi dei provini, dei controlli di accettazione e delle prove di carico è stata effettuata dal laboratorio di prove materiali autorizzato "Cismondi S.r.l."

4.2 Prove di supporto

Ai sensi della NTC 2018 e relativa circolare n. 7/2019 C.S.LL. PP può essere utile, quando si presentino uno o più casi fra quelli previsti dalla norma stessa, ovvero qualvolta il Collaudatore ne ravvisi l'opportunità, controllare la resistenza del calcestruzzo già gettato in opera e indurito [9].

È opportuno tenere presente che tali prove non sono in ogni caso sostitutive dei controlli di accettazione, secondo le prescrizioni del punto 11.2.4., ma possono essere utili al Direttore dei Lavori o al Collaudatore per formulare un giudizio tecnico sul calcestruzzo in opera.

Quando il controllo della resistenza del calcestruzzo in opera viene effettuato mediante carotaggio, per quello che concerne le procedure per l'estrazione e le relative modalità di prova a compressione, si fa riferimento alle seguenti norme:

- UNI EN 12504-1:2021 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Carote – Prelievo, esame e prova di compressione";
- UNI EN 12504-13:2021 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Determinazione del modulo di elasticità secante in compressione";

Aspetto fondamentale nell'impostazione della campagna di indagine è costituito dalla scelta dei punti. Requisito cardinale che dovrà avere il campionamento è

la rappresentatività dello stato complessivo dell'edificio oggetto di indagine in modo da poter riflettere al meglio le caratteristiche di variabilità della struttura, senza però privilegiare zone particolari. Al contempo deve essere valutato l'indebolimento che il prelievo può determinare sugli elementi strutturali, in quanto le sezioni in zone critiche possono essere oggetto di formazione di cerniere plastiche [26].

Nella struttura oggetto della seguente relazione, ai sensi delle norme sopraccitate, *la misura delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura.*

Il carotaggio consiste nell'estrazione di campioni cilindrici di calcestruzzo tramite l'utilizzo di un trapano diamantato e successivo ripristino dello stato tensionale antecedente il prelievo. I campioni vengono poi raccolti e sottoposti a una serie di prove in compressione per la determinazione sperimentale di una serie di caratteristiche.

Per la struttura in esame è stata effettuata una campagna di carotaggi in situ in data 11/10/2023 da parte del Laboratorio di prove materiali "Cismondi S.r.l."

Si riporta schema per l'effettuazione dei prelievi e panoramica dei campioni prelevati:

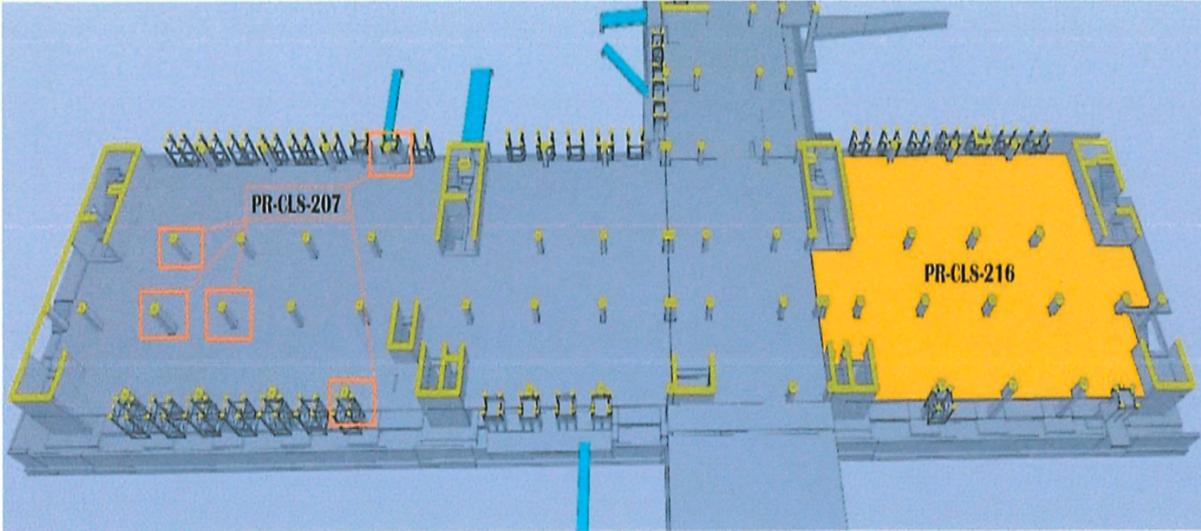


Figura 30. Schema tridimensionale degli elementi su cui sono stati effettuati i prelievi

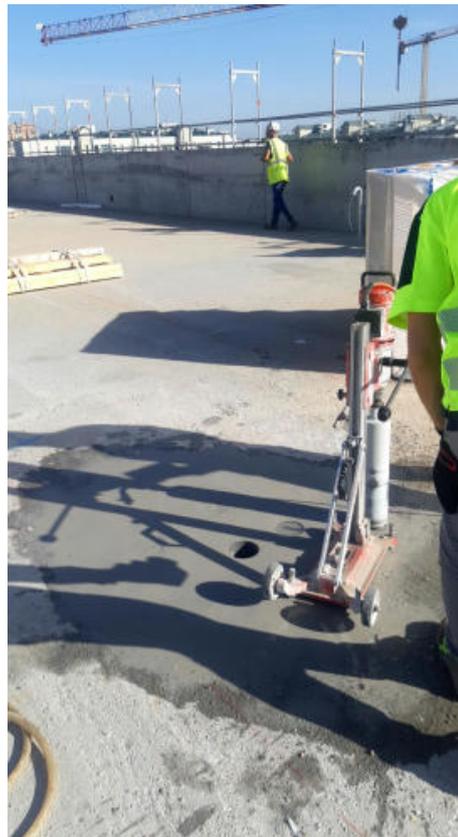
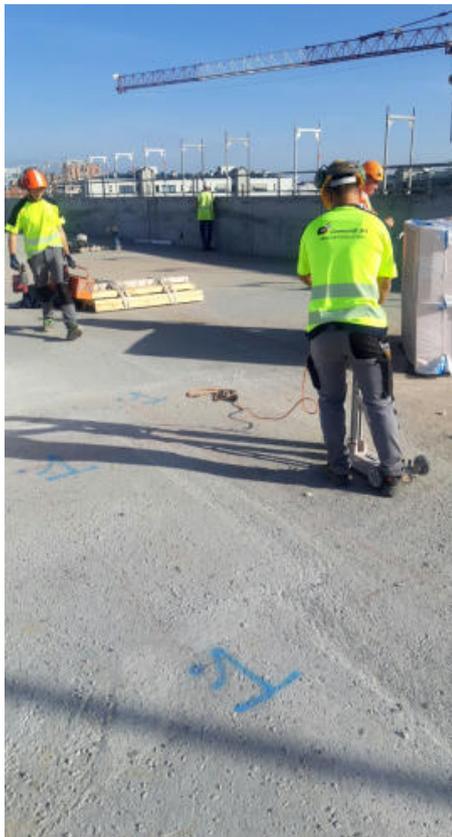


Figura 31. Effettuazione prelievo provini



Figura 32. Foro estrazione carote

CAMPIONI CILINDRICI DI CALCESTRUZZO INDURITO (CAROTE)				
N. campione	Diametro campione (mm)	PRELIEVO		
		Data estrazione	Edificio	Contrassegni ⁽¹⁾
C01_A	104	10/10/2023	DA	Prova di carico 3
C01_B	104	10/10/2023	DA	Prova di carico 3
C02_A	104	10/10/2023	DA	Prova di carico 1
C02_B	104	10/10/2023	DA	Prova di carico 1
C03_A	104	10/10/2023	DA	Prova di carico 2
C03_B	104	10/10/2023	DA	Prova di carico 2
C04_A	104	10/10/2023	Centrale tecnologica	Prova di carico 1
C04_B	104	10/10/2023	Centrale tecnologica	Prova di carico 1
C05_A	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 1
C05_B	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 1
C06_A	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 2
C06_B	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 2
C07_A	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 3
C07_B	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 3
C08_A	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 4
C08_B	104	11/10/2023	DR	Prova di carico 4

Figura 33. Riepilogo campioni cilindrici prelevati

L'esecuzione delle prove è stata effettuata presso il Laboratorio MASTRLAB del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino, sito in Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 – Torino.

È stato previsto il prelievo di n° 2 carote di calcestruzzo indurito, una per la taratura della prova e l'altra per l'effettiva esecuzione delle prove atte a determinare sperimentalmente il modulo elastico del calcestruzzo. I campioni sono stati consegnati al laboratorio suddivisi in otto coppie, con seguenti etichette:

- Etichetta “A”: carota utilizzata per la determinazione della resistenza a compressione;
- Etichetta “B”: carota utilizzata per la determinazione del modulo elastico secante.



Figura 34. Carote estratte sottoposte a prova di compressione

La prova è stata effettuata utilizzando il metodo A, di cui al §7.3.1. della UNI EN 12504-13:2021: esso viene utilizzato quando si dispone di almeno 15 valori della resistenza a compressione del calcestruzzo in situ, la cui distribuzione statistica è rappresentabile con una funzione di probabilità di tipo gaussiano.

Attraverso la prova viene il modulo di elasticità secante iniziale, $E_{c,0}$, e il suo valore stabilizzato, $E_{c,s}$ e, successivamente, la resistenza a compressione, la quale viene stimata utilizzando la seguente espressione:

$$f_{ck,is} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{m(n),is} - 1,48 * \sigma \\ f_{c,is,min} + 4 \end{array} \right.$$

Dove: σ = scarto quadratico medio.

5 ANALISI DEI RISULTATI

L'obiettivo dei controlli di accettazione e delle prove di carico è quello di determinare i parametri necessari alla caratterizzazione del materiale in termini di resistenza e di rispondenza alle prescrizioni progettuali.

I risultati ottenuti dalle prove descritte al capitolo precedente saranno riportati di seguito.

In riferimento ai controlli di accettazione, la valutazione della resistenza meccanica del calcestruzzo è stata ottenuta effettuando la prova a compressione prevista da normativa a 28 gg e a 45 gg dall'effettuazione del prelievo in cantiere.

Si riporta il riepilogo dei risultati della campagna di prove effettuata sulla miscela fornita da Unical S.p.a.

- MISCELA C30/37 – XC2:

CERTIFICATO NUMERO	PRELIEVO NUMERO	R _{ck} [N/mm ²]	RISULTATI 28gg			Differenza R _{m28} -R _{ck}	RISULTATI 45gg			Differenza R _{m45} -R _{ck}
			R ₁	R ₂	R _{m28}		R ₁	R ₂	R _{m45}	
22CU00433	30	37	35,1	34,7	34,9	-2,10	39	38,2	38,60	1,60
22CU00434	31	37	31,4	33,3	32,35	-4,65	46,1	47,9	47,00	10,00
22CU00439	36	37	33,4	33,7	33,55	-3,45	47,3	45,8	46,55	9,55
22CU00443	40	37	31,9	35,8	33,85	-3,15	45,8	48,6	47,20	10,20
22CU00460	42	37	33,7	33,1	33,4	-3,60	37,8	37,6	37,70	0,70
22CU00484	66	37	33,5	33,4	33,45	-3,55	37,4	37,6	37,50	0,50
22CU00485	67	37	31,9	32,6	32,25	-4,75	38,1	37,6	37,85	0,85

- MISCELA C35/45 – XC1:

CERTIFICATO NUMERO	PRELIEVO NUMERO	R _{ck} [N/mm ²]	RISULTATI 28gg			Differenza R _{m28} -R _{ck}	RISULTATI 45gg			Differenza R _{m45} -R _{ck}
			R ₁	R ₂	R _{m28}		R ₁	R ₂	R _{m45}	
22CU00483	65	45	37,2	39,1	38,15	-6,85	45,2	45,1	45,15	0,15
22CU00494	76	45	43,3	44,9	44,1	-0,90	48,4	50,6	49,50	4,50
22CU00555	99	45	43,5	44,6	44,05	-0,95	52,3	51,2	51,75	6,75
22CU00591	127	45	44	43,2	43,6	-1,40	48,9	46,8	47,85	2,85
22CU00611	140	45	40,5	40,7	40,6	-4,40	46,6	47,1	46,85	1,85
22CU00780	207	45	42,8	43,3	43,05	-1,95	50,1	50,8	50,45	5,45
22CU0801	214	45	43,9	44,4	44,15	-0,85	52,2	49,1	50,65	5,65
22CU00803	216	45	43,9	43	43,45	-1,55	49,7	50,6	50,15	5,15
22CU00848	241	45	40,4	42,1	41,25	-0,25	46,80	51,90	49,4	7,80
22CU00850	243	45	40,6	41,2	40,09	-0,60	47,10	46,20	46,67	5,20

Figura 35. Tabella dei risultati sui provini di calcestruzzo in riferimento all'edificio

DR

Nello specifico sono riportate due tabelle distinte in funzione della classe di resistenza prevista da progetto; infatti, si ha un calcestruzzo di classe C30/37 per le fondazioni e C35/45 per tutte le strutture in elevazione.

La figura mostra, per entrambe le classi, i risultati della prova a compressione a 28 giorni; considerando la tabella relativa alla classe C30/37 si osserva che, tra il valore teorico assunto in fase di progetto e quello misurato sui cubi di calcestruzzo vi è una differenza media di -3,60, la quale se si considera, invece,

la misurazione effettuata a 45 gg tende a diventare positiva. Questo significa che la stessa miscela riporta una differenza tra i valori della resistenza di 10.

Analoghe considerazioni possono essere fatte sulla seconda tabella, relativa alla classe C35/45, in cui è possibile evidenziare una differenza negativa massima di -6,85 per i valori a 28 giorni, che diventa positiva con un valore massimo di 7,80 a 45 giorni.

Nel complesso, comunque, tali valori di rottura manifestano un andamento “anomalo” della curva di maturazione ordinaria, intesa come il raggiungimento del 90% della resistenza meccanica complessiva al ventottesimo giorno di maturazione.

Nel caso delle prove di carico, si prenderà come riferimento la prova di carico 01 effettuata sul solaio del primo piano del blocco 2.1 dell’edificio.

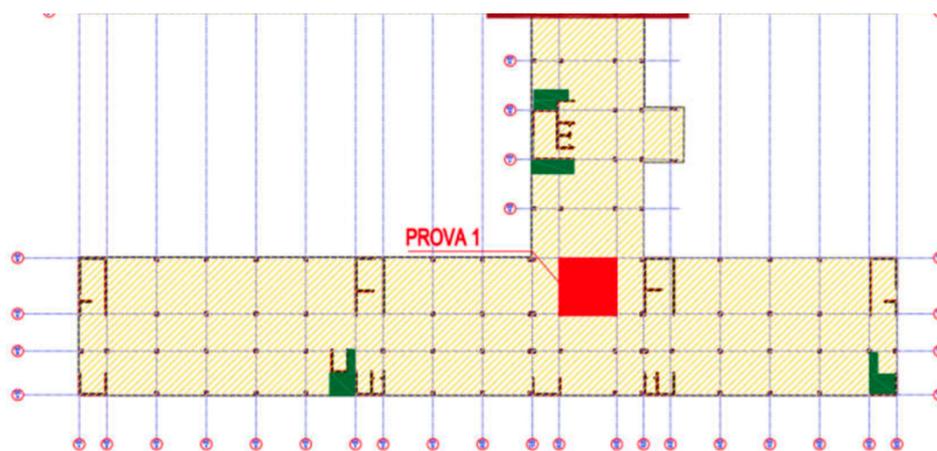


Figura 36. Campo di solaio interessato dalla prova 1 – Blocco 2.1. Edificio DR

Le sollecitazioni di progetto da raggiungere sono state calcolate in fase progettuale con il metodo semiprobabilistico degli stati limite secondo quanto prescritto dalla NTC 2018. In particolare, come già detto in precedenza, si è fatto riferimento alla combinazione di carico “rara”:

$$\gamma_{G2} * G_2 + \gamma_Q * Q$$

Con: $G_2 = 4,36 \text{ kN/m}^2$ (peso proprio di tutti gli elementi non strutturali) e $Q = 4,00 \text{ kN/m}^2$ (valore dell'azione variabile).

Si riportano di seguito l'andamento degli spostamenti del tempo e i risultati della prova espressi in termini di abbassamento.

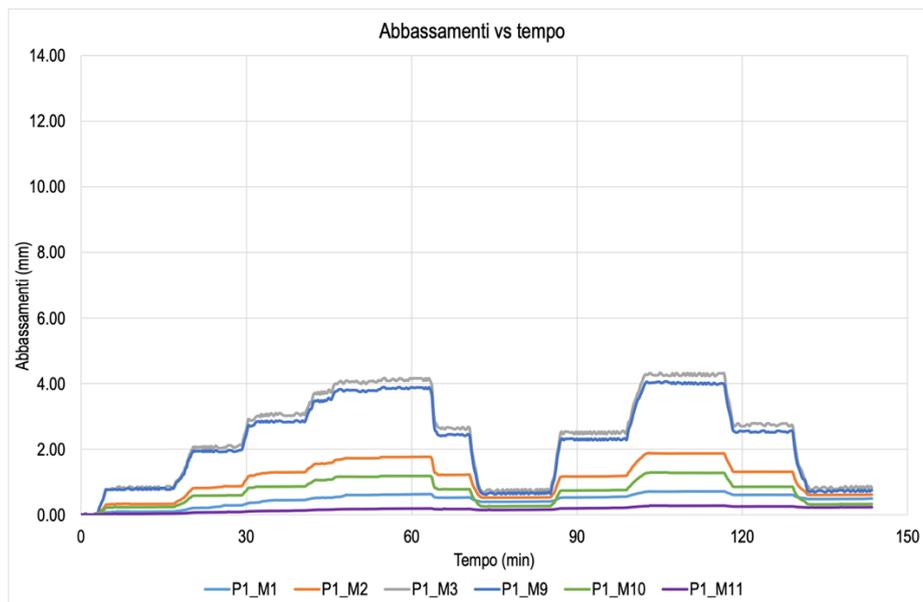


Figura 37. Prova 1 – Conf. 1: Andamento degli abbassamenti nel tempo

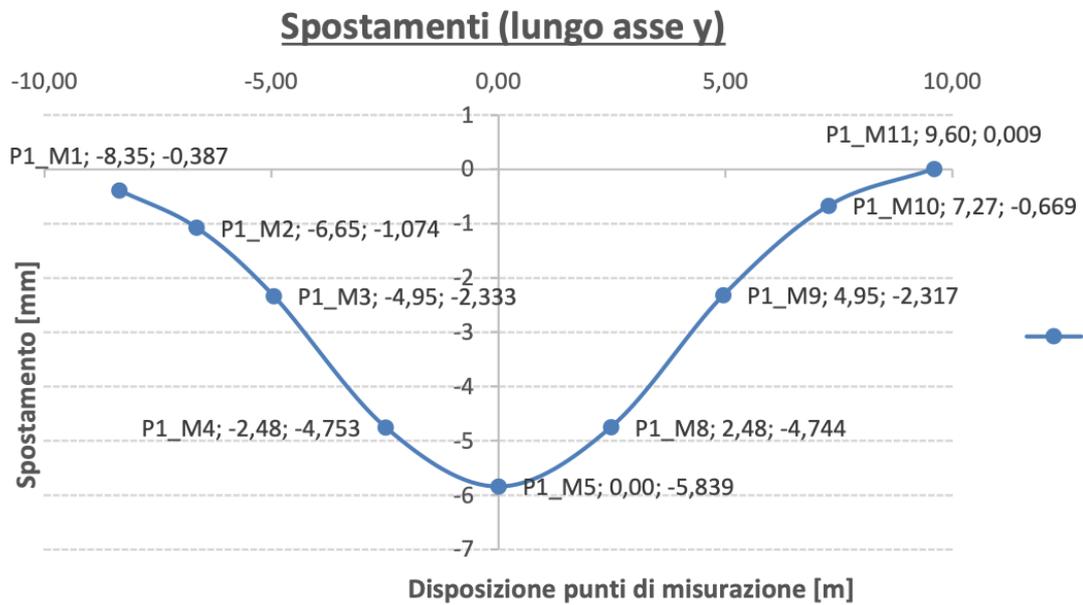


Figura 38. Diagramma degli spostamenti da progetto

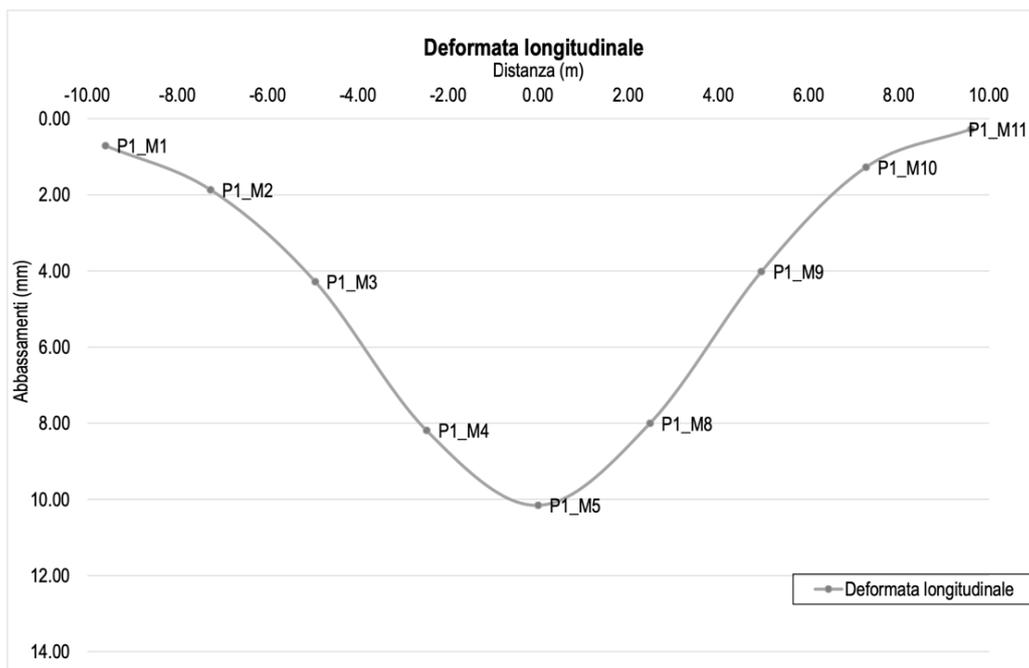


Figura 39. Diagramma degli spostamenti ottenuti da prova di carico

Confrontando il digramma ottenuto dai dati misurati durante la prova di carico con quello teorico realizzato in fase di progetto, è evidente una discrepanza tra i valori di abbassamento nell'uno e nell'altro caso. Nello specifico si osserva un abbassamento misurato di 2 volte superiore rispetto a quello teorizzato.

In relazione a quanto appena esposto si è resa necessaria l'effettuazione di prove complementare atte alla valutazione del modulo elastico realistico del materiale mediante carotaggi sulle porzioni di struttura interessate dalle anomalie, i cui risultati sono riportati di seguito.

N. campione	Diametro massimo aggregato (mm)	H (mm)	D (mm)	Peso (Kg)	Massa volumica (kg/m ³)	H/D (-)	Carico massimo (kN)	f _c (MPa)	E _{c,0} (GPa)	E _{c,s} (GPa)
C01_A	27	206,9	104,2	4,119	2336	2,0	534,5	62,7	-	-
C01_B	35	207,5	104,2	4,121	2329	2,0	511,2	60,0	29,6	32,9
C02_A	31	208,1	104,2	4,144	2336	2,0	448,7	52,6	-	-
C02_B	33	205,4	104,2	4,114	2348	2,0	438,6	51,4	30,8	38,1
C03_A	28	208,3	104,2	4,104	2311	2,0	538,6	63,2	-	-
C03_B	33	206,8	104,2	4,076	2312	2,0	509,5	59,8	33,8	43,7
C04_A	26	206,3	104,2	4,021	2287	2,0	483,1	56,7	-	-
C04_B	31	207,9	104,2	4,060	2291	2,0	488,5	57,3	31,0	40,9
C05_A	26	206,9	104,2	4,006	2272	2,0	413,8	48,6	-	-
C05_B	27	206,3	104,2	3,972	2259	2,0	412,2	48,4	28,3	37,6
C06_A	37	195,4	104,0	3,726	2246	1,9	463,7	54,6	-	-
C06_B	30	199,3	104,2	3,846	2265	1,9	455,4	53,4	30,2	42,6
C07_A	27	207,9	104,1	4,019	2271	2,0	466,4	54,8	-	-
C07_B	36	205,8	104,0	3,989	2280	2,0	495,3	58,3	28,2	39,5
C08_A	26	201,5	104,1	3,907	2276	1,9	495,9	58,2	-	-
C08_B	24	206,1	104,1	3,977	2268	2,0	439,1	51,6	27,2	40,8

Figura 40. Prove di compressione sulle carote di calcestruzzo

Dalla tabella è possibile osservare che i risultati ottenuti dall'analisi sono perfettamente coerenti con i dati di letteratura.

5.1 Interpretazione dei risultati

Considerato che la campagna di prove di carico ha mostrato una lieve discordanza tra i risultati ottenuti in termini di abbassamento e quelli previsti durante la fase di progettazione e considerati i risultati delle prove sui carotaggi atte al calcolo sperimentale del modulo elastico perfettamente in linea con la letteratura, si può desumere che l'utilizzo di aggregati riciclati all'interno della miscela del calcestruzzo abbia impattato notevolmente sulle caratteristiche meccaniche.

D'altro canto, la presenza di queste tipologie di aggregati, i quali sono materiali porosi, agisce sulla microstruttura della miscela finale, rendendola meno rigida [27] e impattando così anche sulla macro struttura del materiale finale in termini di resistenza meccanica; al contempo, la miscela è interessata anche da una riduzione della permeabilità [28], la quale rallenta le reazioni chimiche che producono il legante e quindi si ha valore iniziale di resistenza inferiore, come dimostrato dall'esito delle prove di accettazione.

La ridotta permeabilità del materiale però, nel lungo termine porta ad un notevole aumento della resistenza, infatti, considerando i risultati delle prove a compressione effettuate a 45 giorni dal prelievo e i risultati delle prove sui carotaggi, si evince come il materiale sia perfettamente in linea con le prescrizioni attese.

5.2 Studi complementari

Una ricerca, condotta da alcuni ricercatori dell'Unione Europea ha posto l'attenzione sull'effettiva sostenibilità del calcestruzzo "green". Il punto cardine della ricerca è il deterioramento delle strutture e la velocità con cui esso avviene.

In generale, quando una struttura in cemento armato è in esercizio, ovvero è posta sotto carico, si manifesta il fenomeno della carbonatazione, ossia un processo per il quale il materiale inizia ad assorbire lentamente la CO_2 e, allo stesso tempo, si ha la riduzione dell'alcalinità, rendendo l'acciaio vulnerabile alla corrosione. Sebbene questo fenomeno possa essere visto in termini più o meno positivi, lo studio ha messo in evidenza come nelle strutture realizzate con calcestruzzi "green" il processo di carbonatazione avvenga più velocemente. [29].

In queste condizioni si evince che, nonostante l'utilizzo di materiali riciclati per diminuire l'impatto ambientale, bisogna anche tenere conto dell'impatto generato da eventuali interventi di manutenzione sulle strutture nel lungo periodo.

6 CONCLUSIONI

La campagna di prove effettuate sull'edificio ha prodotto una serie di risultati che evidenziano come il comportamento del calcestruzzo non sia un fenomeno "statico", limitato al valore di resistenza definito in fase di progettazione o a quello ottenuto dalle prove di compressione. Al contrario, è stato osservato che il materiale subisce un'evoluzione continua nel tempo, con un significativo incremento delle sue caratteristiche di resistenza. Sebbene tali proprietà possano risultare inferiori ai limiti normativi nei tempi prestabiliti, esse mostrano un notevole miglioramento nel "lungo termine", come confermato dai risultati delle prove sui provini cilindrici.

Nel caso delle miscele "green", è particolarmente importante considerare anche l'impatto ambientale, in un contesto globale sempre più orientato alla sostenibilità e alla ricerca di soluzioni per un futuro più ecologico. Tuttavia, è necessario approfondire ulteriormente gli studi sulla durabilità e sull'affidabilità di queste miscele, in particolare per quanto riguarda il loro comportamento nel tempo e in condizioni operative variabili. È fondamentale valutare anche il degrado che le strutture potrebbero subire nel corso della loro vita utile.

Infine, si sottolinea che, a parità di caratteristiche meccaniche, l'impiego di un calcestruzzo a basso impatto ambientale dovrebbe essere sempre preso in considerazione, anche considerando che la sua produzione può avvenire in impianti tradizionali senza la necessità di particolari accorgimenti tecnici.

7 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] <https://www.ingenio-web.it/articoli/l-impatto-ambientale-del-calcestruzzo/>
- [2] <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/Goal-07/>
- [3] <https://www.un-industria.it/notizia/119900/cemento-e-calcestruzzo-impatto-ambientale-e/>
- [4] <https://www.mapei.com/it/it/realta-mapei/dettaglio/calcestruzzo-sostenibile-riduzione-delle-emissioni-di-co2-con-geopolimeri-e-rinforzi-innovativi>
- [5] Xu J., Yao Z., Yang G., and Han Q. (2020) Research on crumb rubber concrete: From a multi-scale review. *Construction and Building Materials*, Vol. 232, pp. 117282-117306.
- [6] <https://www.ingenio-web.it/articoli/la-sostenibilita-non-richiede-l-uso-di-calcestruzzo-a-basse-prestazioni/#:~:text=L%27uso%20di%20calcestruzzo%20ad,o%20a%20bassi%20tenori%20di%20cemento>
- [7] Fantilli A.P., Chiaia B. (2013) The Work of Fracture in the Eco-Mechanical Performances of Structural Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Volume 11(10), pp. 282-290
- [8] <https://www.studiopetrillo.com/prontuario/calcestruzzo/manuale-calcestruzzo.pdf>
- [9] NTC 2018 Cap. 11 “Materiali e prodotti per uso strutturale”

- [10] UNI-EN 12390-2 ““Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 5: Resistenza a flessione dei provini”
- [11] UNI EN 206:2021 “Calcestruzzo – Specificazione, prestazione, produzione e conformità”
- [12] Circolare 21 gennaio 2019 “Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.”
- [13] B. Chiaia, A.P. Fantilli “Validazione dei risultati di prove per calcestruzzi green”.
- [14] Fantilli, A.P., Józwiak-Niedzwiedzka, D. (2021) Special Issue: Supplementary Cementitious Materials in Concrete, Part I. Materials 2021, 14, 2291.
- [15] R. Yu, P. Spiesz , H.J.H. Brouwers “Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses”
- [16] N. Zeminian, A. Dalla Libera, I. Torresan – Master Builder Solutions “Calcestruzzo con prestazioni più sostenibili grazie alla tecnologia Intelligent Cluster System”
- [17] <https://gpp.mase.gov.it/Home/CosaEGPP>
- [18] D.M. 256/2022 “Criteri ambientali minimi per l’affidamento del servizio di progettazione di interventi edilizi, per l’affidamento dei lavori per interventi

edilizi e per l'affidamento congiunto di progettazione e lavori per interventi edilizi.”

[19] UNI EN 12390-3: "Prove sul calcestruzzo - Parte 3: Determinazione della resistenza a compressione".

[20]

https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2018_454_30563.pdf

[21] S. Collepari, L. Coppola, R. Troli and M. Collepari, "Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete in the presence of Coarse Aggregate"

[22] <https://www.ingenio-web.it/pdfs/prove-di-carico-per-il-collaudo-statico-dei-solai-giannetto-ribac.pdf>

[23] NTC 2018 Cap. 9 “Collaudo statico”

[24] → <https://cantierecittascienzegrugliasco.it>

[25] → [https://www.cni.it/images/eventi/2023/C.N.I.](https://www.cni.it/images/eventi/2023/C.N.I._Presentazione_n.01_Cardone.pdf)

[_Presentazione_n.01_Cardone.pdf](https://www.cni.it/images/eventi/2023/C.N.I._Presentazione_n.01_Cardone.pdf)

[26] <https://www.ingenio-web.it/articoli/controllo-della-resistenza-del-calcestruzzo-in-sito-nelle-opere-strategiche-mediante-la-prova-pull-out/>

[27] Song Gao, Xin Guo, Shunli Ban, Yanxuan Ma, Qi Yu, Shiyu Sui “Influence of supplementary cementitious materials on ITZ characteristics of recycled concrete”

[28] Fernanda de Andrade Salgado, Flávio de Andrade Silva “Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review”

[29] <https://cordis.europa.eu/article/id/218985-measuring-the-impact-of-concrete-from-cradle-to-grave/it#:~:text=I%20calcestruzzi%20verdi%2C%20che%20sono,mediante%20un%20processo%20di%20carbonatazione.>