

UNI/PdR xxx:2026	Linee guida per la progettazione e i controlli di qualità di costruzioni realizzate attraverso la fabbricazione digitale con materiali cementizi
Sommario	<p>La prassi di riferimento definisce i principi, i criteri e le procedure per le costruzioni realizzate mediante tecniche di fabbricazione digitale, descrivendo i materiali cementizi e le attrezzature da utilizzare.</p> <p>La prassi descrive anche i controlli da effettuare durante il processo di fabbricazione digitale e per la verifica della qualità costruttiva.</p> <p>Il documento intende garantire la qualità, la sicurezza e la tracciabilità dei processi di progettazione, produzione e post-produzione di oggetti realizzati mediante tecnologie additive, in conformità con la legislazione vigente e la normativa tecnica di settore.</p>
Data	2025-12-16

Avvertenza

Il presente documento è un progetto di Prassi di Riferimento (UNI/PdR) sottoposta alla fase di consultazione, da utilizzare solo ed esclusivamente per fini informativi e per la formulazione di commenti.

Il processo di elaborazione delle Prassi di Riferimento prevede che i progetti vengano sottoposti alla consultazione sul sito web UNI per raccogliere i commenti del mercato: la UNI/PdR definitiva potrebbe quindi presentare differenze rispetto al documento messo in consultazione.

Questo documento perde qualsiasi valore al termine della consultazione, cioè il: 14 gennaio 2026

UNI non è responsabile delle conseguenze che possono derivare dall'uso improprio del testo dei progetti di Prassi di Riferimento in consultazione.

PREMESSA

La presente prassi di riferimento UNI/PdR xxx:2026 non è una norma nazionale, ma è un documento pubblicato da UNI, come previsto dal Regolamento UE n.1025/2012, che raccoglie prescrizioni relative a prassi condivise all'interno del seguente soggetto firmatario di un accordo di collaborazione con UNI:

ENEL Green Power SpA

viale Regina Margherita, 125
00198 Roma

La presente prassi di riferimento è stata elaborata dal Tavolo “LLGG progettazione e controlli di costruzioni realizzate con fabbricazione digitale con materiali cementizi” condotto da UNI, costituito dai seguenti esperti:

Xxxxxxxxxxxxxx

Xxxxxxxxxxxxxxx

Xxxxxxxxxxxxxxx

Xxxxxxxxxxxxxxx

xxxxxxxxxxxxxxx

Xxxxxxxxxxxxxxx

xxxxxxxxxxxxxxx

La presente prassi di riferimento è stata ratificata dal Presidente dell'UNI il xx xxxx 2026.

Le prassi di riferimento, adottate esclusivamente in ambito nazionale, rientrano fra i “prodotti della normazione europea”, come previsti dal Regolamento UE n.1025/2012, e sono documenti che introducono prescrizioni tecniche, elaborati sulla base di un rapido processo ristretto ai soli autori, sotto la conduzione operativa di UNI.

Le prassi di riferimento sono disponibili per un periodo non superiore a 5 anni, tempo massimo dalla loro pubblicazione entro il quale possono essere trasformate in un documento normativo (UNI, UNI/TS, UNI/TR) oppure devono essere ritirate.

Chiunque ritenesse, a seguito dell'applicazione della presente prassi di riferimento, di poter fornire suggerimenti per un suo miglioramento è pregato di inviare i propri contributi all'UNI, Ente Italiano di Normazione, che li terrà in considerazione.

SOMMARIO

INTRODUZIONE	4
1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	6
2 RIFERIMENTI NORMATIVI E LEGISLATIVI.....	6
3 TERMINI E DEFINIZIONI	7
4 PRINCIPIO	7
5 SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE	8
5.1 GENERALITÀ	8
5.2 PRINCIPI FONDAMENTALI	8
6 AZIONI SULLE COSTRUZIONI.....	8
6.1 GENERALITÀ	8
6.2 PRINCIPI FONDAMENTALI E SPECIFICITÀ	8
7 COSTRUZIONI REALIZZATE ATTRAVERSO LA FABBRICAZIONE DIGITALE CON MATERIALI CEMENTIZI	8
7.1 GENERALITÀ	8
7.2 EDIFICI	9
7.3 OPERE DI FONDAZIONE.....	10
8 MACCHINE E TECNOLOGIE	11
8.1 GENERALITÀ	11
8.2 PROCESSO DI STAMPA 3D	11
8.2.1 PREPARAZIONE DELL'AREA DI LAVORO	13
8.2.2 MONTAGGIO E CALIBRAZIONE	13
8.2.3 SLICING E PROGETTAZIONE DELLA STAMPA	14
8.2.4 PREPARAZIONE DEL MATERIALE CEMENTIZIO	18
8.2.5 STAMPA DEL MATERIALE E MONITORAGGIO DEL PROCESSO	20
9 MATERIALI E PRODOTTI CEMENTIZI PER FABBRICAZIONE DIGITALE	24
9.1 GENERALITÀ	24
9.1.1 DEFINIZIONE E PECULIARITÀ	24

9.2 MATERIALI CEMENTIZI PER LA FABBRICAZIONE DIGITALE.....	24
9.2.1 TIPOLOGIE DI MATERIALI E PROCESSO PRODUTTIVO	24
9.2.2 SPECIFICHE DEI MATERIALI CEMENTIZI PER LA STAMPA 3D.....	25
9.2.3 PRESTAZIONI RICHIESTE ALLO STATO INDURITO (INDICATIVE PER USO STRUTTURALE): 26	
9.2.4 QUALIFICAZIONE E ACCETTAZIONE DEI MATERIALI.....	26
10 PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE.....	27
10.1 GENERALITÀ	27
10.2 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE DEI SISTEMI STRUTTURALI	27
10.3 CRITERI DI PROGETTAZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI SECONDARI ED ELEMENTI COSTRUTTIVI NON STRUTTURALI	28
10.4 REQUISITI STRUTTURALI DEGLI ELEMENTI DI FONDAZIONE.....	28
11 PROGETTAZIONE E COLLAUDO STATICO.....	28
11.1 GENERALITÀ	28
11.2 PROGETTAZIONE.....	29
11.3 COLLAUDO STATICO.....	29
APPENDICE A – SCHEDA DI CONTROLLO DI COSTRUZIONI REALIZZATE CON FABBRICAZIONE DIGITALE CON MATERIALI CEMENTIZI.....	30
BIBLIOGRAFIA.....	36

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, la stampa 3D si è affermata come una tecnologia strategica in numerosi settori, dalla prototipazione rapida alla produzione industriale, dalla ricerca scientifica all'ambito educativo. La sua capacità di trasformare modelli digitali in oggetti fisici tridimensionali consente una notevole flessibilità progettuale, riduzione dei tempi di sviluppo e ottimizzazione dei costi.

Tuttavia, l'adozione di questa tecnologia richiede l'implementazione di procedure standardizzate che garantiscono la corretta progettazione, la qualità dei prodotti, la sicurezza degli operatori e la corretta gestione delle risorse. In questo contesto, la presente prassi intende fornire un riferimento operativo chiaro per l'utilizzo della stampa 3D, definendo ruoli, responsabilità, strumenti e criteri tecnici da adottare.

L'obiettivo è promuovere un uso consapevole, efficiente e sicuro della stampa 3D, assicurando la conformità alle normative vigenti e favorendo l'innovazione tecnologica.

L'evoluzione del mondo della manifattura, spinto negli ultimi anni dal paradigma **Industry 4.0** e dal concetto di **fabbricazione digitale**, ha impattato solo parzialmente sul **settore delle costruzioni**.

La stampa 3D con materiali cementizi (3DCP o 3D Concrete Printing) nell'ambito della fabbricazione digitale è una tecnica avanzata di fabbricazione additiva che permette la costruzione di strutture tridimensionali per deposizione di strati successivi di materiale cementizio, a partire da un modello digitale predefinito. Durante questo processo, una testa di stampa robotizzata estrude una miscela di calcestruzzo o malta cementizia, in funzione della dimensione massima degli aggregati impiegata, in forma rigido-fluida che si solidifica rapidamente per formare strati sovrapposti.

I principali benefici offerti dalla fabbricazione digitale di materiali cementizi, rispetto alle tecniche di costruzione tradizionali sono:

- **Riduzione dei Tempi di Costruzione:** il processo di stampa 3D elimina la necessità di casseforme e consente, con uso di specifiche malte cementizie o uso di additivi nel calcestruzzo, un indurimento più rapido, riducendo i tempi complessivi di costruzione di circa il 50%. Questo aspetto risulta cruciale per migliorare l'efficienza costruttiva e operativa nei cantieri, accorciando i tempi di messa in esercizio delle infrastrutture soprattutto di interesse strategico (es. centrali di energia rinnovabile).
- **Sostenibilità:** la tecnologia 3DCP utilizza meno risorse grazie a un'ottimizzazione della distribuzione del materiale cementizio, contribuendo così a ridurre l'impatto ambientale. Questo è particolarmente significativo, considerando che il calcestruzzo tradizionale è una delle principali fonti di emissioni globali di CO₂.
- **Flessibilità e personalizzazione:** la stampa 3D permette di creare forme complesse e dettagli personalizzati, difficilmente realizzabili con metodi convenzionali. Questa flessibilità apre nuove possibilità nel design architettonico e nella progettazione strutturale.
- **Sicurezza in Cantiere:** l'alto grado di automazione del processo di stampa 3D migliora la sicurezza sul lavoro, riducendo il rischio di incidenti e minimizzando l'intervento umano nelle fasi critiche di costruzione.

Le peculiarità di questa tecnica non si limitano al processo costruttivo ma abbracciano anche la definizione e studio del materiale cementizio stampato, tipicamente caratterizzato da un comportamento meccanico anisotropo per la presenza di interfacce tra strati successivi.

La tecnologia di **manifattura additiva** insieme alle moderne tecniche di progettazione mediante gestione digitale delle informazioni, per esempio il BIM (Building Information Modeling), segnano

l'inizio dell'era della fabbricazione digitale in ambito civile portando, anche in questo settore, i vantaggi che si sono visti in altri casi applicativi.

BOZZA CONSULTAZIONE PUBBLICA

1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

La prassi di riferimento definisce i principi, i criteri e le procedure per le costruzioni realizzate mediante tecniche di fabbricazione digitale, descrivendo i materiali cementizi e le attrezzature da utilizzare.

La prassi descrive anche i controlli da effettuare durante il processo di fabbricazione digitale e per la verifica della qualità costruttiva.

Il documento intende garantire la qualità, la sicurezza e la tracciabilità dei processi di progettazione, produzione e post-produzione di oggetti realizzati mediante tecnologie additive, in conformità con la legislazione vigente e la normativa tecnica di settore.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI E LEGISLATIVI

La presente prassi di riferimento rimanda, mediante riferimenti datati e non, a disposizioni contenute in altre pubblicazioni. Tali riferimenti normativi e legislativi sono citati nei punti appropriati del testo e sono di seguito elencati. Per quanto riguarda i riferimenti datati, successive modifiche o revisioni apportate a dette pubblicazioni valgono unicamente se introdotte nel presente documento come aggiornamento o revisione. Per i riferimenti non datati vale l'ultima edizione della pubblicazione alla quale si fa riferimento.

DECRETO LEGISLATIVO 9 aprile 2008 n. 81 (D.Lgs. 81/2008): Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro.

DIRETTIVA 2006/42/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 17 maggio 2006: relativa alle macchine e che modifica la direttiva 95/16/CE (rifusione) (Testo rilevante ai fini del SEE)

Norme tecniche per le Costruzioni 2018 (NTC 2018): DECRETO DEL MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI, 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»

REGOLAMENTO (UE) 2024/3110: del Parlamento europeo e del Consiglio, del 27 novembre 2024, che fissa norme armonizzate per la commercializzazione dei prodotti da costruzione e abroga il regolamento (UE) n. 305/2011 (Testo rilevante ai fini del SEE)

UNI EN 12390 (serie): Prove sul calcestruzzo indurito Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81 Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro

UNI EN 196 (serie): Metodi di prova dei cementi

UNI EN 1990 (serie): Eurocodice - Basi della progettazione strutturale e geotecnica

UNI EN 1991-1-1: Eurocodice 1 - Azioni sulle strutture - Parte 1-1: Azioni in generale - Pesi per unità di volume, pesi propri e sovraccarichi per gli edifici

UNI EN 1992-1-1: Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per edifici, ponti e strutture di ingegneria civile

UNI EN 1998-1: Eurocodice 8 - Progettazione sismica di strutture - Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici

UNI EN ISO 12100: Sicurezza del macchinario - Principi generali di progettazione - Valutazione del rischio e riduzione del rischio

UNI EN ISO/ASTM 52939:2024: Additive manufacturing per il settore delle costruzioni - Principi di qualificazione - Elementi strutturali ed elementi di infrastrutture

3 TERMINI E DEFINIZIONI

Ai fini del presente documento valgono i termini e le definizioni seguenti:

- 3.1.analisi strutturale:** Procedura o algoritmo per la determinazione degli effetti delle azioni in ogni punto di una struttura.
- 3.2.costruzione:** Si riferisce sia all'azione di costruire sia al risultato di questa azione, ovvero l'opera realizzata (fabbricato, manufatto, struttura).
- 3.3.criteri di progetto:** Formulazioni quantitative che descrivono le condizioni da soddisfare per ogni stato limite.
- 3.4.elemento strutturale:** Parte fisicamente distinguibile di una struttura, per esempio, un pilastro, una trave, un plinto, un palo di fondazione, una soletta, una parete, ecc.
- 3.5.fabbricazione digitale:** Metodo di costruzione basato su uso di macchine e stampanti 3D.
- 3.6.metodo di costruzione:** Metodo mediante il quale la costruzione è realizzata, per esempio, gettata in opera, prefabbricata o realizzata mediante fabbricazione digitale.
- 3.7.resistenza:** Capacità di un elemento o di un componente, o di una sezione trasversale di un elemento o di un componente di una struttura, di resistere alle azioni senza collasso meccanico, per esempio, resistenza a flessione, resistenza a taglio, ecc.
- 3.8.stati limite:** Stati superati i quali la struttura non è più in grado di soddisfare i relativi criteri di progetto.
- 3.9.Stati Limite di Esercizio (SLE):** Stati che corrispondono a condizioni oltre le quali i requisiti funzionali specificati per una struttura o un elemento strutturale non sono più soddisfatti.
- 3.10. Stati Limite Ultimi (SLU):** Stati associati con il collasso o con forme simili di guasto strutturale.
- 3.11. struttura:** Combinazione organizzata di parti connesse, progettate per sostenere i carichi e fornire una rigidezza adeguata.

4 PRINCIPIO

La prassi di riferimento intende fornire delle linee guida sui principi, criteri e procedure per le costruzioni realizzate mediante tecniche di fabbricazione digitale, descrivendo i materiali cementizi e le attrezzature da utilizzare.

La prassi descrive anche i controlli da effettuare durante il processo di fabbricazione digitale e per la verifica della qualità costruttiva.

La prassi è corredata dall'Appendice A Scheda di controllo di costruzioni realizzate con fabbricazione digitale con materiali cementizi.

5 SICUREZZA E PRESTAZIONI ATTESE

5.1 GENERALITÀ

Il presente punto individua i principi fondamentali per la valutazione della sicurezza, definendo altresì gli Stati Limite Ultimi (SLU) e gli Stati Limite di Esercizio (SLE) per i quali devono essere effettuate le opportune verifiche sulle opere.

5.2 PRINCIPI FONDAMENTALI

Le opere e le componenti strutturali devono essere progettate, eseguite, collaudate e soggette a manutenzione in modo tale da consentirne la prevista utilizzazione, in forma economicamente sostenibile e con il livello di sicurezza previsto dalla legislazione vigente.

La sicurezza e le prestazioni di un'opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli stati limite. Nel caso di costruzioni realizzate attraverso la fabbricazione digitale con materiali cementizi, si applica quanto indicato al capitolo 2 delle NTC¹ o nella serie UNI EN 1990 (Eurocodici). La tecnologia della stampa 3D del calcestruzzo (3DCP) non comporta differenze sostanziali riguardo alla sicurezza ed alle prestazioni attese nel caso di produzione in officina oppure di realizzazione mediante fabbrica mobile installata direttamente in sito, in quanto le metodologie ed attrezzature impiegate risultano essere le medesime.

6 AZIONI SULLE COSTRUZIONI

6.1 GENERALITÀ

Il presente punto codifica i modelli per la descrizione delle azioni agenti sulle strutture.

6.2 PRINCIPI FONDAMENTALI E SPECIFICITÀ

I carichi, nominali e/o caratteristici, relativi a costruzioni per uso civile o industriale possono essere definiti come al capitolo 3 delle NTC o analogamente in conformità alla UNI EN 1991-1-1 (Eurocodice 1).

Rispetto a quanto indicato nelle NTC e nella UNI EN 1991-1-1 (Eurocodice 1), il peso specifico da adottare per il materiale di stampa deve essere quello indicato dal fornitore dello specifico materiale cementizio adottato. Nel caso non fossero disponibili requisiti del produttore oppure è impiegato calcestruzzo, adottare i valori indicati nella tabella 3.1.I del paragrafo 3.1.2 delle NTC per calcestruzzo ordinario/armato e malta di cemento.

7 COSTRUZIONI REALIZZATE ATTRAVERSO LA FABBRICAZIONE DIGITALE CON MATERIALI CEMENTIZI

7.1 GENERALITÀ

Il presente punto descrive gli elementi tecnologici che possono essere realizzati attraverso la fabbricazione digitale con uso di materiali cementizi. In particolare, sono trattati parti di edificio, edifici interi e fondazioni.

¹ Norme Tecniche per le Costruzioni. Al momento di pubblicazione della Prassi di Riferimento è in vigore il Decreto del Ministro delle infrastrutture e dei trasporti, 17 gennaio 2018, Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni».

La tecnologia della stampa 3D del calcestruzzo (3DCP) consente oggi la realizzazione di una vasta gamma di elementi strutturali e componenti edilizi con funzione portante o come cassaforma a perdere per successivo getto tradizionale o integrazione con materiali differenti.

Gli elementi realizzabili mediante 3DCP possono essere distinti nelle seguenti categorie:

- **Pareti portanti monolitiche (armate o non armate):** pareti stampate direttamente con funzione strutturale, eventualmente ottimizzate nella geometria interna per ridurre peso e materiale.
- **Setti e nuclei verticali:** elementi stampati per il contenimento o irrigidimento strutturale, anche in combinazione con elementi prefabbricati o armature inserite in fase di stampa o post-stampa.
- **Fondazioni superficiali o plinti:** stampati direttamente in situ o in stabilimento, con possibilità di includere inserti per connessioni meccaniche o sistemi di ancoraggio.
- **Solai leggeri:** realizzati attraverso moduli stampati con funzione autoportante o come componenti da riempire con calcestruzzo.
- **Casseforme a perdere:** componenti stampati in 3D che fungono da stampo o contenimento per getti strutturali, ad esempio per travi, pilastri o pareti con armatura tradizionale.
- **Elementi ibridi o di transizione:** elementi che integrano la 3DCP con materiali diversi (es. legno, acciaio, laterizio) o tecnologie di prefabbricazione, e che necessitano quindi di dettagli costruttivi e regole specifiche per le interfacce.

Ai fini della presente prassi, l'attenzione è focalizzata in modo particolare su:

- **Edifici monopiano o a due piani** realizzati attraverso 3DCP, con pareti portanti in materiali cementizi, eventualmente completati con solai o coperture realizzate mediante tecnologie convenzionali o ibride.
- **Sistemi di fondazione** ottenuti mediante stampa 3D, in continuità o interazione con gli elementi verticali soprastanti.

7.2 EDIFICI

In linea generale, i requisiti normativi espressi al paragrafo 4.1 e nello specifico al paragrafo 4.1.11 delle NTC validi per costruzioni calcestruzzo a bassa percentuale di armatura o non armato sono applicabili anche al caso di elementi realizzati con fabbricazione digitale e nello specifico per edifici monopiano o a due piani realizzati in pareti estese portanti.

Edifici realizzati mediante casseforme a perdere che fungono da stampo o contenimento per getti strutturali, ad esempio per travi, pilastri o pareti con armatura tradizionale, seguono le regole di calcolo e di dettaglio del cemento armato tradizionale o dei materiali realizzativi adottati. Le casseforme a perdere non possono essere considerate come elementi strutturali e non contribuiscono a definire la sezione strutturale degli stessi.

Nella fabbricazione digitale di componenti strutturali, si deve garantire una classe di resistenza minima dei materiali cementizi pari a C20/25, fatti salvi i limiti derivanti dal rispetto della durabilità. L'analisi strutturale deve essere condotta in campo elastico lineare, coerentemente con l'ipotesi di comportamento non dissipativo della struttura.

È ammesso l'impiego di analisi non lineari (pushover o dinamiche time-history) esclusivamente a scopo di ricerca o validazione, qualora siano disponibili modelli numerici calibrati su prove sperimentali di riferimento.

Le verifiche devono essere condotte agli Stati Limite Ultimi (SLU) e agli Stati Limite di Esercizio (SLE) secondo le prescrizioni del paragrafo 7.3.6 delle NTC, adottando combinazioni di carico sismiche in campo elastico.

Le formulazioni e verifiche di cui al paragrafo 4.1.2 delle NTC sono applicabili anche a questa tecnologia. Devono sempre essere applicati fattori di sicurezza maggiorativi ai materiali cementizi. La resistenza di progetto a compressione per materiali stampabili è infatti pari a:

$$f_{cd,3D} = \alpha_{cc} \cdot f_{ck} / (\gamma_c \cdot \gamma_{3D}) = \alpha_{cc} \cdot f_{ck,3D} / \gamma_c$$

dove:

α_{cc} è il coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata ed è pari a 0,85;

γ_c è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al calcestruzzo ed è pari ad 1,5;

γ_{3D} è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al processo di stampa ed è pari ad 1,35;

f_{ck} è la resistenza caratteristica cilindrica a compressione del materiale cementizio a 28 giorni.

Lo stesso coefficiente parziale di sicurezza γ_{3D} è applicabile anche alla resistenza a trazione del materiale cementizio adottato per la stampa ed in generale a tutti i parametri meccanici che derivano dalla resistenza di progetto del materiale.

Nel caso di malte secche premiscelate, le resistenze meccaniche a compressione e a flessione possono essere fornite dal produttore in conformità alla UNI EN 196-1. Il produttore può indicare nella scheda tecnica della malta una classe di resistenza analoga a quella del calcestruzzo, che può essere utilizzata nelle formulazioni previste dal paragrafo 11.2.10 delle NTC per ricavare le altre caratteristiche meccaniche. È comunque raccomandata l'esecuzione di prove di laboratorio per verificare l'idoneità delle formulazioni adottate per quanto riguarda le prestazioni meccaniche delle malte cementizie.

Per tutti i casi, occorre sempre tener conto del coefficiente parziale di sicurezza γ_{3D} relativo al processo di stampa.

I parametri meccanici devono essere sempre verificati in fase di stampa con i controlli di qualità indicati nell'Appendice A e nei punti successivi del presente documento.

L'approccio del design by testing della serie UNI EN 1990 deve essere applicato nel caso di forme complesse laddove formulazioni esistenti di riconosciuta validità non siano applicabili o disponibili. È sempre indicato per questa tecnologia l'uso di sofisticati modelli FEM per il calcolo delle sollecitazioni e verifica dello stato indurito.

Qualora siano predisposti cavedi o sacche per l'inserimento di barre di armatura, gabbie o reti metalliche per fini strutturali, il getto di completamento deve sempre essere realizzato con malte a ritiro compensato con resistenza di progetto almeno pari a quella dell'elemento stampato al fine di garantire la perfetta aderenza e continuità strutturale e meccanica dell'elemento.

7.3 OPERE DI FONDAZIONE

La progettazione geotecnica, così come strutturale, di elementi di fondazione realizzati mediante fabbricazione digitale deve seguire le indicazioni dei punti indicati nella presente prassi e nello specifico al paragrafo 6 delle NTC.

Possono essere realizzate con fabbricazione digitale sia plinti di fondazione che fondazioni continue a travi rovesce e platee. Generalmente, plinti di fondazione possono essere agevolmente realizzati in stampa ed avere funzioni strutturali. Travi rovesce e platee sono invece realizzate con tecniche tradizionali in cemento armato e si adotta la stampa come cassaforma a perdere con capacità strutturale nulla ai fini del calcolo.

Quanto a cavedi o sacche per passaggio barre, gabbie o reti metalliche, si applica quanto indicato al punto 7.2 della presente prassi.

8 MACCHINE E TECNOLOGIE

8.1 GENERALITÀ

Il presente punto descrive nel dettaglio le principali fasi del processo di stampa 3D, illustrando le tecnologie e le apparecchiature impiegate nella fabbricazione digitale. Sono, inoltre, indicati i principali requisiti tecnici e operativi da rispettare al fine di garantire la qualità e l'affidabilità dei manufatti realizzati; sono, inoltre, fornite prescrizioni e indicazioni operative per lo svolgimento in sicurezza ed efficienza delle attività di stampa 3D con materiali cementizi in cantiere o nell'ambiente di produzione, con riferimento sia agli aspetti organizzativi che di tutela del personale.

In particolare, si intende:

- individuare le principali fasi operative della stampa 3D cementizia e i principali operatori coinvolti;
- identificare i rischi potenziali associati al processo;
- definire misure minime di protezione per la sicurezza degli operatori e per la prevenzione di interferenze con altre lavorazioni.

Il punto richiama, ove applicabile, le disposizioni previste dal D.Lgs. 81/2008, dalla Direttiva Macchine 2006/42/CE e dalla UNI EN ISO 12100, in quanto pertinenti alla gestione della sicurezza delle macchine e delle attività di fabbricazione digitale.

8.2 PROCESSO DI STAMPA 3D

Per **sistema di stampa 3D** si intende l'insieme integrato di macchinari, componenti e tecnologie impiegati per la realizzazione di manufatti mediante la deposizione, stratificata e continua, di materiale cementizio. In particolare, una stampante 3D per materiali cementizi è costituita dai seguenti sottosistemi funzionali:

- **Sistema software:** insieme di software per la trasformazione di un modello digitale 3D in un codice di stampa.
- **Sistema di miscelazione:** insieme di macchinari per la miscelazione del materiale secco con l'acqua di impasto.
- **Sistema di pompaggio:** insieme di macchinari per il pompaggio del materiale attraverso il tubo collegato alla testa di estrusione del sistema di movimentazione.
- **Sistema di movimentazione:** sistema robotico e automatizzato che permette di eseguire il codice di stampa.
- **Sistema di estrusione:** ugello di stampa solidale al sistema di movimentazione che permette l'estruzione controllata del materiale pompato.
- **Sistema di controllo:** insieme di sensori e software necessari per monitorare i principali parametri della stampa.

Esistono 2 tipi di sistemi di movimentazione:

Sistemi di movimentazione a singolo asse (tipici di **stampanti a portale** o **Gantry-Based Printers**): sono basati su un processo di stampa in cui tutti gli strati sono realizzati lungo una singola direzione di stampa fissa, tipicamente l'asse Z. La testina di stampa si muove nelle direzioni X e Y per depositare il materiale e il piano di costruzione si muove in Z dopo ogni strato.

Sistemi di movimentazione multi-asse (tipici di **stampanti a braccio robotico o Robotic Arm-Based Printers**): sono basati su un sistema in cui la testina di stampa e/o il piano di costruzione possono muoversi o ruotare lungo più gradi di libertà DoF (più di 3 DoF, tipicamente 4–6). Questo consente una riorientazione dinamica dell'ugello per seguire percorsi curvi o complessi, e persino cambiare direzione di stampa durante la produzione.

Il processo di stampa del materiale cementizio si basa sulla deposizione continua di filamenti lungo un percorso predefinito, generato dal modello digitale. Tale deposizione avviene in modo automatizzato grazie all'integrazione tra il sistema di movimentazione e il sistema di estrusione.

La movimentazione controllata consente di seguire, fedelmente, la geometria del manufatto; il sistema di estrusione garantisce invece la continuità e la regolarità del flusso di materiale. La sinergia tra questi due sottosistemi è essenziale per assicurare la qualità dimensionale, la coesione tra strati e la stabilità strutturale del prodotto finale.

Il sistema di estrusione può essere configurato secondo due modalità principali, in funzione della composizione del materiale e delle esigenze del processo:

- **Configurazione 1K (monocomponente)**: il materiale cementizio viene estruso direttamente, senza ulteriori modifiche, dopo la fase di miscelazione. Questa configurazione è adatta a materiali che non richiedono attivatori o modificatori aggiuntivi in fase di stampa.
- **Configurazione 2K (bicomponente)**: il materiale viene ulteriormente miscelato, in prossimità dell'ugello di estrusione, con un secondo componente — solitamente un accelerante di presa o un modificante reologico. Questa configurazione consente di regolare, in tempo reale, le proprietà del materiale allo stato fresco, migliorando la stabilità del filamento depositato e riducendo i tempi di indurimento.

La scelta tra configurazione 1K e 2K dipende da vari fattori, tra cui: il materiale impiegato, le condizioni ambientali, la geometria del manufatto e i requisiti prestazionali del processo di stampa.

Prospetto1: Sistemi di movimentazione ed estrusione

Sistema di movimentazione	Gradi di libertà	Sistema di estrusione	Applicazioni
Braccio robotico (stampante multiasse)	6	1K (monocomponente) o 2K (bicomponente)	Elementi non strutturali e strutturali realizzati direttamente in situ (on-site) oppure in fabbrica (off-site)
Sistema a carroponte (stampante monoasse)	3		
Sistema crane (stampante monoasse)	3		

La sequenza operativa per la stampa 3D con materiali cementizi deve essere definita in modo chiaro e documentato, così da garantire la ripetibilità, la sicurezza e la qualità del processo produttivo. Di seguito, sono individuate le principali fasi operative da considerare, e che sono trattate nei punti successivi:

1. Preparazione dell'area di lavoro.
2. Montaggio e calibrazione.
3. Slicing e progettazione della stampa (mediante il sistema software).

4. Preparazione del materiale cementizio (mediante i sistemi di miscelazione e pompaggio).
5. Stampa del materiale e monitoraggio del processo (mediante i sistemi di movimentazione, estrusione e controllo).

8.2.1 PREPARAZIONE DELL'AREA DI LAVORO

La preparazione dell'area di lavoro per la stampa 3D cementizia deve tenere conto delle diverse configurazioni operative in cui la tecnologia può essere impiegata. In particolare, si distinguono i seguenti scenari:

- **Stampa on-site**, ossia con realizzazione/stampa degli elementi strutturali o non strutturali nella posizione finale di posa all'interno del cantiere;
- **Fabbrica mobile**, con predisposizione di un'area di produzione attrezzata temporaneamente all'interno del cantiere, nella quale sono stampati i manufatti che sono successivamente movimentati e assemblati in opera;
- **Stampa off-site**, cioè in ambiente controllato (stabilimento o laboratorio), con successivo trasporto degli elementi stampati fino al sito di installazione/cantiere.

In funzione dello scenario operativo adottato, la predisposizione dell'area di lavoro deve garantire:

- adeguati spazi di movimentazione in funzione del tipo di stampante;
- zone sicure per le attività ausiliarie (carico/scarico materiali, stoccaggio e maturazione dei pezzi finiti, manutenzione);
- percorsi di accesso riservati al personale autorizzato;
- predisposizione di dispositivi di protezione collettiva (barriere, segnaletica di sicurezza, sistemi di evacuazione).

Nel caso di macchinari che richiedano spostamenti successivi per raggiungere diverse aree di stampa all'interno dello stesso cantiere, è necessario pianificare la sequenza delle postazioni operative e definire per ciascuna di esse le condizioni di sicurezza e di segregazione delle aree di rischio.

8.2.2 MONTAGGIO E CALIBRAZIONE

La fase di montaggio e calibrazione comprende tutte le attività necessarie a installare e rendere operativo il sistema di stampa 3D, compresi i suoi sottosistemi, in condizioni di sicurezza e nel rispetto delle specifiche tecniche.

In questa fase occorre:

- installare gli elementi strutturali portanti della stampante e il sistema di movimentazione;
- predisporre e collegare i circuiti di alimentazione elettrica, idraulica e pneumatici, se presenti;
- verificare la presenza e la funzionalità dei dispositivi di sicurezza (arresti di emergenza, barriere fisiche, sensori di prossimità, interblocchi);
- effettuare la calibrazione degli assi di movimento (X, Y, Z), verificando precisione e linearità dei percorsi, anche mediante test a vuoto o simulazioni di spostamento;
- verificare l'orizzontalità del piano di stampa in modo da garantire la massima precisione degli oggetti stampati;
- configurare i parametri di controllo software attraverso l'interfaccia uomo-macchina (HMI), impostando ad esempio gli zero macchina, i limiti di corsa e le velocità massime;
- nel caso sia previsto, verificare la corretta integrazione funzionale con eventuali sistemi di miscelazione/pompaggio, valutando la gestione coordinata dei segnali di comando.

Deve, inoltre, essere valutato l'ingombro complessivo del sistema, considerando in particolare i collegamenti tra il sistema di pompaggio e il sistema di movimentazione. Tali collegamenti, come ad esempio tubazioni flessibili, possono avere lunghezze e diametri variabili e devono essere gestiti in modo da evitare curve strette, schiacciamenti o potenziali punti di interferenza con i movimenti del sistema di stampa.

In caso di sistemi di movimentazioni mobili (per esempio bracci robotici montati su veicoli o cingolati), devono essere previsti ancoraggi o stabilizzazioni temporanee idonee a garantire la precisione e la stabilità del processo.

Tutte le operazioni devono essere condotte nel rispetto dei manuali forniti dai fabbricanti delle macchine e in coerenza con le prescrizioni generali della Direttiva Macchine 2006/42/CE e della UNI EN ISO 12100 in materia di sicurezza del macchinario.

Tutte le attività di preparazione devono conformarsi alle disposizioni del D.Lgs. 81/2008 e, ove applicabile, della Direttiva Macchine 2006/42/CE, al fine di garantire la sicurezza degli operatori e la protezione delle altre attività di cantiere.

8.2.3 SLICING E PROGETTAZIONE DELLA STAMPA

La progettazione digitale alla base della stampa inizia con un modello 3D digitale e termina con la generazione di una lista di istruzioni per il sistema di movimentazione che guidano il processo di stampa fisica.

La fase di progettazione coinvolge tipicamente software di progettazione assistita da computer (CAD), dove viene creato l'oggetto 3D. Indipendentemente dalla tecnologia AM (Additive Manufacturing) specifica utilizzata, il modello è preparato per la stampa tramite un processo chiamato *slicing*, in cui la geometria 3D viene convertita in una serie di strati sottili e sequenziali da depositare uno alla volta.

8.2.3.1 INPUT DEL MODELLO E FORMATI DI FILE

Generalmente, il formato di file più utilizzato per rappresentare oggetti 3D nella stampa è il formato STL (stereolitografia). I file STL approssimano un modello CAD usando una mesh di facce triangolari, creando così una rappresentazione tassellata della superficie originale. Sebbene altri formati come CLI o point clouds siano occasionalmente usati, lo STL rimane lo standard industriale per la sua semplicità e il vasto supporto software.

Esistono due approcci principali di slicing a seconda dell'input del modello:

- Slicing STL: Comporta lo slicing di un modello di superficie tassellata (mesh triangolare);
- Slicing Diretto: Comporta lo slicing diretto di un modello solido o di superficie nativo da un file CAD senza conversione in mesh.

La precisione del processo di slicing dipende in gran parte dalla risoluzione della tassellazione: mesh più fini offrono maggior dettaglio ma aumentano il carico computazionale. Pertanto, il costo computazionale dello slicing cresce con il numero di facce triangolari nel file STL.

8.2.3.2 ALGORITMI DI SLICING

Gli algoritmi di slicing sono classificati in base a come sono generate le sezioni:

a) Algoritmi di Slicing Planare

Definizione: Lo slicing planare produce una pila di strati piatti e paralleli, tipicamente allineati lungo l'asse Z.

Vantaggi: Semplice da calcolare, ampiamente supportato dai software di slicing convenzionali e compatibile con la maggior parte delle stampanti 3D commerciali.

Svantaggi: Porta a effetti a gradini sulle superfici inclinate e può richiedere strutture di supporto per gli sbalzi.

Progressi: Alcuni metodi planari avanzati adattano lo spessore degli strati o ottimizzano i percorsi per ridurre il tempo di stampa o migliorare la qualità della superficie.

b) Algoritmi di Slicing Non Planare

Definizione: Lo slicing non planare genera strati curvi o inclinati che seguono la geometria del pezzo, conformatosi spesso alla sua superficie.

Vantaggi: Riduce l'effetto a gradini, migliora la finitura superficiale, riduce la necessità di supporti e può migliorare le proprietà meccaniche.

Sfide: Richiede una generazione complessa del percorso utensile nello spazio 3D e spesso necessita di un controllo del movimento multi-asse per mantenere l'orientamento corretto dell'ugello ed evitare collisioni durante la stampa.

8.2.3.3 COMPATIBILITÀ DELLO SLICING CON I SISTEMI DI MOVIMENTAZIONE

La strategia di slicing è strettamente correlata al sistema di movimentazione, e quindi alla stampante 3D impiegata. L'algoritmo di slicing determina la geometria degli strati desiderata, mentre la cinematica della stampante determina se e come questi strati possono essere fisicamente realizzati.

a) Sistemi di movimentazione a singolo asse

Sistemi di movimentazione a singolo asse, come indicato in precedenza, sono basati su un processo di stampa in cui tutti gli strati vengono costruiti lungo una singola direzione di stampa fissa, tipicamente l'asse Z. Questo processo è completamente compatibile con lo slicing planare. È anche possibile eseguire uno slicing non planare limitato con macchine a singolo asse, ma l'ugello non può adattare il proprio orientamento per eseguire superfici curve. Questo comporta rischi, come sbavature di materiale o collisioni dell'ugello su pendenze ripide.

Le stampanti a portale o Gantry-Based Printers, le più comuni nella stampa 3D su scala edilizia, sono sistemi a singolo asse, poiché il piano di costruzione procede in una sola direzione (asse Z). Queste stampanti operano in modo simile ai sistemi di estrusione di polimeri. Generalmente utilizzano firmware progettati per interpretare direttamente i file di istruzioni macchina chiamati G-code.

In questi sistemi, lo strumento di slicing deve essere configurato per generare il "G-code flavor" corretto, in modo che il firmware possa riconoscere i comandi relativi a:

- Cinematica e posizionamento (movimenti lineari in X, Y, Z).
- Controllo del flusso di estrusione (mappatura dei comandi G-code sull'azionamento della pompa o della vite).
- Funzioni ausiliarie (es. attuazione valvole, ventilatori sostituiti dall'avvio/arresto della pompa).

Poiché questi firmware interpretino nativamente il G-code, la compatibilità è principalmente garantita dalla scelta del profilo corretto nello strumento di slicing; questo permette un coordinamento fluido tra il movimento dell'ugello e la deposizione del materiale cementizio.

Diversi strumenti di slicing sono compatibili con firmware sulle stampanti che consentono un controllo dettagliato su layer, infill e configurazioni multi-estrusore, ecc.

b) Sistemi di movimentazione multi-asse

Sistemi di movimentazione multi-asse hanno la particolarità che la testina di stampa e/o il piano di costruzione possono muoversi o ruotare lungo più gradi di libertà (più di 3 DoF, tipicamente 4–6). Per

ottenere slicing non planare è necessario che il software e la macchina supportino la stampa conforme, ovvero la deposizione di materiale su superfici non orizzontali.

I sistemi multi-asse includono bracci robotici, stampanti ibride CNC/3D o sistemi a portale modificati con assi rotazionali. Questi sistemi richiedono una pianificazione avanzata del movimento e algoritmi per evitare collisioni.

Le stampanti a braccio robotico o Robotic Arm-Based Printers sono sistemi multi-asse che offrono maggiore libertà di movimento e la possibilità di stampare geometrie non planari o complesse. Tuttavia, non interpretano nativamente il G-code; robot industriali utilizzano infatti linguaggi differenti rispetto al G-code standard. In questi sistemi, lo slicing produce comunque G-code o dati di percorso utensile, ma è necessario un passaggio di post-elaborazione aggiuntivo. Post-processor personalizzati convertono i comandi G-code nel linguaggio nativo del robot; ad esempio, i comandi di estrusione sono mappati su uscite digitali o analogiche che controllano pompe, cocle o valvole.

In questo caso, la compatibilità dipende non solo dallo strumento di slicing, ma anche dalla disponibilità di un post-processor robusto in grado di tradurre con precisione i percorsi di stampa in istruzioni eseguibili dal robot, mantenendo la sincronizzazione con il sistema di consegna del materiale.

8.2.3.4 IMPLICAZIONI HARDWARE DELLA SCELTA DELLO SLICING

Lo slicing planare è pienamente compatibile con i sistemi di stampa a singolo asse (vedere punto 8.2.4.3), motivo per cui è il metodo più utilizzato nella manifattura additiva. Questi sistemi si muovono strato per strato in una direzione fissa (tipicamente l'asse Z) e lo slicing planare produce strati piatti e orizzontali che si adattano perfettamente a questa configurazione. Non è richiesta alcuna complessità hardware aggiuntiva.

Lo slicing non planare, in cui gli strati possono seguire una forma curva invece di essere piatti, può talvolta essere utilizzato su stampanti a singolo asse, ma con delle limitazioni. Poiché l'ugello non può inclinarsi o riorientarsi, possono sorgere problemi su superfici inclinate, come estrusione irregolare, scarsa finitura superficiale o persino collisioni dell'ugello. Pertanto, anche se tecnicamente possibile, lo slicing non planare è più adatto a sistemi in grado di controllare l'orientamento dell'ugello.

Per un vero slicing conforme o allineato alla superficie, in cui il percorso utensile segue da vicino forme 3D complesse o cambia direzione dinamicamente, è necessario un sistema di stampa multi-asse. Questi sistemi offrono gradi di libertà aggiuntivi (come rotazione o inclinazione), permettendo alla testina di stampa di rimanere allineata perpendicolarmente alla superficie dell'oggetto. Tale hardware è essenziale per realizzare appieno i benefici dello slicing non planare e ottenere risultati di alta qualità su geometrie complesse².

8.2.3.5 MODALITÀ DI COLLASSO DURANTE LA STAMPA

La definizione e l'ottimizzazione dei parametri di stampa per la stampa 3D di materiali cementizii costituiscono un aspetto cruciale della progettazione digitale. Un'accurata analisi preliminare consente di migliorare l'esito del processo di stampa, riducendo il rischio di deformazioni eccessive e

² Nayyeri, P., Zareinia, K., & Bougerara, H. (2022). Planar and nonplanar slicing algorithms for fused deposition modeling technology: a critical review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 119(5–6), 2785–2810. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-08347-x>

collassi strutturali allo stato fresco. Durante la fase di deposizione, l'elemento stampato può essere soggetto a due principali modalità di collasso:

1. *Instabilità per perdita di equilibrio (self-buckling)* si verifica quando la rigidezza complessiva dell'elemento in fase di stampa $E_{tot}(t)$ risulta inferiore alla rigidezza critica $E_{cr}(t)$:

$$E_{tot}(t) \leq E_{cr}(t)$$

2. *Schiacciamento per compressione del primo strato* si verifica quando la tensione verticale $\sigma_v(t)$ indotta dal peso proprio dell'elemento supera la resistenza a compressione del materiale allo stato fresco $\sigma_{c,max}$:

$$\sigma_{c,max}(t) \leq \sigma_v(t)$$

Le modalità di collasso dipendono rispettivamente dai valori di rigidezza e resistenza a compressione del materiale allo stato fresco, che sono tempo-dipendenti a causa dei processi di idratazione del legante cementizio.

Tali parametri possono essere determinati mediante prove sperimentali di compressione non confinata su provini cilindrici di malta fresca, sottoposti a test in controllo di spostamento a diversi tempi di maturazione. Considerata la forte sensibilità dei risultati alle condizioni di prova (preparazione del provino, velocità di deformazione, geometria) e la mancanza di una procedura sperimentale standard, si raccomanda l'esecuzione di uno studio sperimentale di buildability, volto a verificare le effettive capacità del materiale in relazione alla geometria dell'oggetto stampato.

Per prevenire fenomeni di collasso durante la stampa, è essenziale garantire l'assenza di imperfezioni geometriche e una forma del filamento stabile, coerente con le caratteristiche dell'ugello utilizzato. Un parametro chiave per la valutazione della forma del filamento è il rapporto tra altezza e larghezza, che rappresenta un indicatore diretto della sua stabilità geometrica.

Studi numerici hanno evidenziato che tale rapporto è fortemente influenzato da diversi parametri di processo, tra cui:

- il rapporto tra la velocità di avanzamento dell'ugello e la portata di estrusione;
- il rapporto tra il diametro dell'ugello e la sua altezza rispetto al piano di deposizione.

La forma del filamento risulta altamente sensibile a variazioni di questi parametri. In particolare, una distanza eccessiva tra ugello e piano di stampa può causare deviazioni del filamento dal percorso previsto, compromettendo la precisione geometrica e la stabilità dell'elemento stampato. Per garantire stabilità geometrica e adesione efficace tra gli strati durante la stampa 3D del calcestruzzo, è necessario assicurare una sovra-estruzione rispetto al diametro dell'ugello. Questo accorgimento consente di esercitare una pressione sufficiente del filamento estruso sullo strato sottostante, favorendo il legame tra i layer e riducendo il rischio di delaminazione.

La sovra-estruzione deve essere calibrata in funzione dei parametri di processo e delle caratteristiche reologiche del materiale fresco, in modo da ottenere una deposizione continua e uniforme, senza eccessi che possano compromettere la precisione geometrica o causare instabilità.

Inoltre, valori elevati del tempo interlayer, associati a una geometria del percorso di stampa stabile, contribuiscono a ridurre il rischio di collasso durante la stampa. È, tuttavia, fondamentale che il tempo interlayer non superi un valore critico, oltre il quale si osserva una significativa riduzione della resistenza del legame tra gli strati. Questo compromette la coesione strutturale dell'elemento stampato e può portare a fenomeni di delaminazione o instabilità locale. Pertanto, la scelta del tempo interlayer deve bilanciare due esigenze contrastanti:

- Garantire la stabilità dell'elemento stampato, permettendo al materiale di acquisire sufficiente rigidezza e resistenza prima della deposizione dello strato successivo.

- Preservare l'adesione tra strati, evitando che il materiale perda la capacità di formare un legame efficace con lo strato sottostante.

Lo studio e l'ottimizzazione dei parametri di stampa sono fondamentali per migliorare le prestazioni e l'affidabilità della 3DCP. Oltre alla relazione tra tali parametri e la forma del filamento, le discrepanze in altezza tra il modello digitale e l'oggetto stampato, causate dalla deformazione del filamento, costituiscono un fattore cruciale nel determinare la geometria finale della struttura stampata.

Anche l'altezza dell'ugello riveste un ruolo fondamentale nella determinazione della larghezza del filamento. All'aumentare dell'altezza dell'ugello, la larghezza del filamento depositato diminuisce. Gli studi hanno identificato tre fasi distinte nel comportamento del filamento in funzione dell'aumento dell'altezza dell'ugello:

Fase I – Un lieve aumento dell'altezza dell'ugello comporta un notevole incremento della sezione trasversale. Ciò è attribuito a un'elevata contropressione esercitata dallo strato sottostante, che limita il flusso del materiale e porta a una sezione più piccola. Con un leggero aumento dell'altezza, questa contropressione diminuisce, consentendo la deposizione di una maggiore quantità di materiale.

Fase II – Le caratteristiche della sezione trasversale si stabilizzano, mostrando variazioni minime nonostante ulteriori aumenti dell'altezza dell'ugello.

Fase III – Ulteriori aumenti dell'altezza dell'ugello portano alla deviazione del filamento dal percorso progettato. Ciò è accompagnato da un aumento della sezione trasversale e da una riduzione del rapporto di forma (aspect ratio) e del semirapporto.

Questi risultati evidenziano il ruolo critico dell'altezza dell'ugello nell'influenzare sia il comportamento del flusso che la geometria finale del filamento estruso.

Sulla base di queste osservazioni, è importante identificare sperimentalmente, caso per caso, un intervallo di altezze stabili di stampa dell'ugello. All'interno di questo intervallo, la forma del filamento rimane costante. Se l'altezza dell'ugello scende al di sotto del limite inferiore, la portata effettiva diminuisce, portando a un profilo schiacciato del filamento. Se invece supera il limite superiore, si verifica una deviazione (meandering), compromettendo l'allineamento al tracciato previsto.

Infine, l'altezza strutturale dell'oggetto stampato è influenzata in modo significativo dall'intervallo di tempo tra gli strati e da eventuali pressioni aggiuntive applicate. È stato osservato un aumento lineare dell'altezza della struttura con un intervallo temporale tra strati di 30 minuti, suggerendo che il comportamento tempo-dipendente del materiale contribuisce positivamente alla stampabilità della struttura.

8.2.4 PREPARAZIONE DEL MATERIALE CEMENTIZIO

La preparazione del materiale cementizio destinato alla stampa 3D avviene tramite il sistema di miscelazione/pompaggio e si articola in due fasi principali:

- **Fase di miscelazione:** i componenti secchi vengono combinati con l'acqua d'impasto fino a ottenere una miscela omogenea, idonea all'estruzione.
- **Fase di pompaggio:** il materiale miscelato viene trasferito nel sistema di pompaggio, che lo convoglia fino all'ugello della testa di stampa.

A seconda della configurazione impiantistica, si distinguono due tipologie di sistemi:

a) Sistemi continui

In questi sistemi, la miscelazione e il pompaggio avvengono in modo integrato e sincronizzato. Il materiale asciutto viene miscelato in tempo reale con l'acqua d'impasto e immediatamente trasferito

al sistema di pompaggio, garantendo un flusso costante e continuo verso l'ugello. L'efficienza della miscelazione è elevata, con tempi di processo generalmente ridotti a pochi secondi. Il rapporto tra il flusso d'acqua e il flusso di materiale secco (polveri) determina il contenuto effettivo di acqua d'impasto. Tuttavia, a causa delle tolleranze e delle imprecisioni nella misurazione dei flussi (sia liquidi che solidi), la determinazione diretta del rapporto acqua/materiale può risultare poco accurata. Per questo motivo, è spesso necessario ricorrere a metodi di misurazione indiretta per stimare il contenuto reale di acqua nella miscela.

b) Sistemi batch (lotti)

In questa configurazione, il materiale viene preparato in quantità predefinite (lotti), con tempi di miscelazione più lunghi per garantire l'omogeneità del composto. Una volta completata la miscelazione, il materiale viene trasferito al sistema di pompaggio. La preparazione avviene in sequenza, lotto per lotto. In questi sistemi, l'efficienza della miscelazione può risultare inferiore, poiché le macchine devono gestire volumi maggiori e tempi di lavorazione più estesi, che possono variare in funzione delle caratteristiche del materiale e delle prestazioni dell'impianto. Nei sistemi a lotti, il dosaggio dell'acqua d'impasto viene determinato in funzione del volume del lotto da preparare e sulla base della percentuale di acqua indicata dal produttore del materiale. Questo approccio consente un controllo preciso del contenuto effettivo di acqua nella miscela, parametro fondamentale che incide direttamente sulle proprietà reologiche del materiale allo stato fresco e sulle prestazioni meccaniche e durabilità del manufatto allo stato indurito.

La scelta del sistema di miscelazione e pompaggio deve essere effettuata in funzione dell'applicazione specifica, delle esigenze del processo produttivo e della tipologia di materiale utilizzato (vedere prospetto 2).

I *sistemi continui* offrono un elevato grado di automazione e consentono una maggiore velocità operativa, risultando particolarmente vantaggiosi per applicazioni che richiedono lunghi cicli di stampa o elevata produttività. La continuità del flusso di materiale riduce i tempi morti e migliora l'efficienza complessiva del processo.

I *sistemi batch*, invece, permettono un controllo più accurato delle caratteristiche del materiale prima della fase di pompaggio. Ogni lotto può essere verificato e validato in termini di consistenza, omogeneità e prestazioni, garantendo una maggiore affidabilità del materiale immesso nel sistema.

Prospetto 2: Sistemi di miscelazione e pompaggio

Sistemi di miscelazione/pompaggio	Dosaggio acqua di impasto	Controllo acqua di impasto	Compatibilità
Continuo	continuo e regolabile	Indiretto tramite prove aggiuntive	Materiale premiscelato: malta secca o calcestruzzo premiscelato secco
Batch	manuale/automatico regolabile per ogni lotto	Diretto tramite dosaggio nella camera di miscelazione	Materiale premiscelato: malta secca o calcestruzzo premiscelato secco Malta o calcestruzzo confezionato con processo industrializzato di cui al paragrafo 11.2.8 delle NTC. Malta o calcestruzzo confezionato direttamente in cantiere di cui al paragrafo 11.2.8 delle NTC.

Durante l'intera sessione di stampa 3D, è fondamentale monitorare in modo continuo i seguenti parametri del processo:

1. il dosaggio dell'acqua d'impasto
2. la pressione di pompaggio
3. temperatura del materiale miscelato

La stabilità del processo di estrusione è strettamente legata alla costanza di tali parametri. Variazioni significative possono compromettere la qualità del manufatto, influenzando la regolarità del flusso, la geometria depositata e le proprietà meccaniche del materiale.

Nel caso di sessioni di stampa prolungate, l'aumento della temperatura dovuto al riscaldamento dei componenti del sistema può alterare le condizioni operative. In particolare:

- può essere necessario aumentare il dosaggio di acqua per mantenere la stessa consistenza del materiale;
- può verificarsi un incremento della pressione di pompaggio, dovuto a variazioni nella viscosità del materiale o a fenomeni di attrito interno.
- può verificarsi un incremento della temperatura del materiale, dovuto al riscaldamento del sistema e dell'ambiente circostante.

Tutte le condizioni sopra descritte possono influenzare significativamente le proprietà del materiale cementizio stampato. È pertanto fondamentale eseguire un accurato controllo di qualità del materiale sia allo stato fresco che indurito, mediante il prelievo di campioni direttamente dall'ugello, sia all'inizio che al termine del processo di stampa (numero minimo di controlli obbligatori in conformità all'Appendice A).

Per garantire la qualità e la ripetibilità del processo, è inoltre raccomandato l'impiego di sistemi di monitoraggio in tempo reale.

8.2.5 STAMPA DEL MATERIALE E MONITORAGGIO DEL PROCESSO

Durante la fase di stampa del materiale è necessario supervisionare il processo fino al completamento dell'elemento progettato, garantendo la qualità del risultato e la sicurezza degli operatori.

Attività previste:

- configurazione iniziale dei parametri di stampa tramite l'interfaccia uomo-macchina (HMI) descritte al punto 8.2.5.2, includendo velocità, accelerazioni, sequenza di deposizione e altezza dei layer;
- verifica del corretto funzionamento del sistema di pompaggio, controllando la continuità del flusso e la pressione di alimentazione;
- monitoraggio dei parametri di processo in tempo reale, quali portata del materiale, temperatura, eventuali vibrazioni anomale della macchina;
- sorveglianza visiva della stabilità degli strati depositati, per individuare fenomeni di collasso, fessurazioni premature o fuori tolleranza geometriche;
- gestione di eventuali interruzioni di processo, prevedendo modalità di arresto controllato e di ripresa della stampa (es. registrazione della posizione di stop, verifica della qualità dell'interfaccia di ripresa ed eventuale trattamento);
- aggiornamento continuo del registro di stampa (vedere Appendice A), documentando i parametri di produzione, eventuali anomalie riscontrate e interventi correttivi adottati;

- rispetto delle procedure di emergenza in caso di malfunzionamenti o situazioni di pericolo, in coerenza con i piani di sicurezza di cantiere e con la Direttiva Macchine 2006/42/CE.

La gestione della stampa deve avvenire sotto la supervisione di personale formato e dotato di tutti i dispositivi di protezione individuale, dotato di adeguate competenze in materia di fabbricazione digitale con materiali cementizi.

Durante la stampa è opportuno monitorare i parametri dei sistemi di miscelazione, pompaggio, movimentazione ed estrusione. È inoltre necessario eseguire prelievi di materiale cementizio direttamente dall'ugello per monitorarne le caratteristiche allo stato fresco ed indurito. A supporto di questa fase, si deve fare riferimento all'Appendice A che fornisce indicazioni sulle prove da eseguire sul materiale allo stato fresco ed indurito.

Ulteriori aspetti relativi alla qualità, alla standardizzazione e al controllo del processo di stampa additiva nel settore delle costruzioni possono essere approfonditi facendo riferimento ai punti 6.3 e 6.5 della UNI EN ISO/ASTM 52939.

Nel caso di calcestruzzo confezionato con processo industrializzato vale quanto detto al paragrafo 11.2.8 delle NTC.

8.2.5.1 OPERATORI COINVOLTI E MANSIONI

Le attività di stampa 3D di materiali cementizi richiedono la presenza di personale adeguatamente formato, in grado di garantire la gestione sicura, efficiente e coordinata del processo. È fondamentale che le comunicazioni tra gli operatori siano chiare e costanti, così da poter intervenire tempestivamente in caso di anomalie o modifiche operative.

Ruoli e mansioni principali

Operatore sistema di movimentazione/stampante 3D:

- gestisce la configurazione iniziale dei parametri di stampa tramite HMI;
- controlla il processo di deposizione strato per strato, monitorando continuità, tolleranze geometriche e andamento del percorso utensile;
- effettua eventuali modifiche parametriche durante la stampa;
- interviene in caso di fermo macchina o ripartenze del processo.

Operatore sistema di miscelazione e pompaggio:

- prepara la miscela cementizia secondo le prescrizioni tecniche e i parametri previsti;
- gestisce la pulizia ordinaria della pompa e delle tubazioni al termine della sessione di stampa, prevenendo indurimenti accidentali;
- controlla la pressione di pompaggio, la portata e la continuità del materiale durante la stampa;
- effettua un primo controllo sulla qualità del materiale estruso (consistenza, omogeneità) per valutarne l'idoneità alla stampa.

Operatore di alimentazione materiale:

- alimenta la pompa o il miscelatore con i sacchi di materiale (malta, legante, additivi), garantendo la continuità di approvvigionamento;
- monitora il consumo di materiale in tempo reale, regolando la frequenza di caricamento (ad esempio più o meno sacchi) in base alla velocità di stampa e alle condizioni operative;

- collabora con l'operatore della pompa per segnalare eventuali anomalie nei tempi di consumo o variazioni delle ricette.

Operatore supervisore della stampa:

- sorveglia la deposizione degli strati direttamente nella zona di lavoro, verificando la corretta sovrapposizione dei layer e l'assenza di difetti macroscopici (fessurazioni, deformazioni, collassi locali);
- coordina le comunicazioni tra *l'operatore della stampante* e l'operatore del *sistema di miscelazione e pompaggio*, per garantire interventi rapidi in caso di problemi di processo;
- registra eventuali non conformità riscontrate in tempo reale, contribuendo alla documentazione del controllo qualità.

In base alla complessità dell'impianto e al numero di turni lavorativi, i ruoli sopra elencati possono essere coperti da personale diverso o riuniti sotto la responsabilità di figure multi-competenti, purché venga assicurata la supervisione continua del processo e la tracciabilità delle operazioni svolte.

8.2.5.2 INTERFACCIA UOMO-MACCHINA E CONTROLLO DIGITALE

L'interfaccia uomo-macchina (HMI) rappresenta il sistema di comunicazione tra operatore e macchine per il processo di stampa 3D, comprensiva di strumenti hardware e software finalizzati alla gestione del processo di fabbricazione digitale.

L'HMI deve consentire la configurazione, l'avvio, il monitoraggio, il controllo e l'arresto del processo di stampa, fornendo informazioni coerenti e tempestive sullo stato del sistema e sull'avanzamento delle lavorazioni.

L'interfaccia può essere realizzata con un personal computer collegato al sistema di stampa, oppure integrata nelle macchine stesse tramite dispositivi dedicati.

a) Caratteristiche delle interfacce

L'interfaccia uomo-macchina deve prevedere le seguenti caratteristiche:

- visualizzazione in tempo reale dello stato di funzionamento con segnalazioni di anomalie ed eventi di diagnostica;
- sezioni dedicate alla configurazione e al monitoraggio dei principali parametri di processo, inclusi:
 - velocità di stampa;
 - numero di layer programmati e stampati;
 - coordinate spaziali del punto terminale della testina di stampa;
- possibilità di controllo manuale per attività ausiliarie quali prove di ingombro o verifiche preliminari sul funzionamento dei macchinari;
- interfacce dedicate, ove previsto, alla gestione del sistema di pompaggio e miscelazione, con monitoraggio di:
 - contenuto d'acqua nella miscela;
 - pressione in uscita;
 - temperatura del materiale in fase di pompaggio.

Il monitoraggio e la configurazione dei parametri sopra indicati risultano essenziali per garantire la qualità e la ripetibilità del processo di stampa, consentendo di prevenire eventuali difetti, variazioni dimensionali indesiderate o interruzioni della continuità di estrusione e permettendo all'operatore di intervenire tempestivamente in caso di scostamenti significativi dal programma di stampa in modo da apportare opportune correzioni.

b) Funzionalità avanzate

Possono essere previste, in via opzionale, funzionalità di supporto atte a ottimizzare il processo, tra cui:

- controllo remoto tramite connessioni sicure, che consente al personale tecnico qualificato di supervisionare, modificare e monitorare a distanza l'andamento del processo di stampa, riducendo i tempi di intervento e garantendo maggiore flessibilità operativa;
- diagnostica predittiva, ottenuta attraverso l'integrazione di sensori (ad esempio per vibrazioni, temperatura, pressione) che permettono di analizzare l'andamento del processo di stampa nel tempo e di segnalare preventivamente condizioni di malfunzionamento o derive, migliorando l'affidabilità complessiva del sistema;
- sincronizzazione automatica tra sistema di stampa e sistema di pompaggio, con la regolazione in tempo reale dei parametri di portata e velocità di estrusione in funzione della velocità e traiettoria della testina, al fine di assicurare la continuità del deposito e ridurre il rischio di difetti di stampa.

8.2.5.3 ARRESTO DEL PROCESSO E ATTIVITÀ POST-STAMPA

Questa fase comprende le operazioni di chiusura controllata del sistema di stampa, la gestione dei residui di materiale, la manutenzione ordinaria delle attrezzature e il ripristino dell'area di lavoro in condizioni di sicurezza.

Attività previste:

- arresto controllato del sistema attraverso le procedure definite dal costruttore e tramite l'interfaccia uomo-macchina (HMI);
- svuotamento e pulizia delle linee di pompaggio e dei serbatoi di alimentazione per prevenire indurimenti accidentali del materiale residuo;
- ispezione visiva di ugelli, valvole e componenti soggetti a usura o a potenziali occlusioni;
- eventuali interventi di manutenzione programmata o sostituzione parti di consumo, secondo le prescrizioni dei manuali tecnici;
- registrazione delle operazioni di pulizia e manutenzione svolte, a fini di tracciabilità del processo;
- rimozione delle barriere e della segnaletica temporanea installate per la sicurezza, ripristinando l'agibilità generale dell'area di lavoro;
- archiviazione dei dati di processo e dei controlli di qualità finali per garantire la rintracciabilità e la conformità rispetto ai requisiti progettuali.

8.2.5.4 CONTROLLO QUALITÀ DEI MANUFATTI STAMPATI

Al termine della sessione di stampa devono essere eseguite attività di controllo qualità sui pezzi realizzati, con ispezione visiva delle geometrie, verifica dimensionale rispetto al modello progettuale,

valutazione dell'aderenza tra layer e rilevazione di eventuali fessurazioni o difetti superficiali. Ove richiesto, possono essere prelevati provini dagli elementi stampati per l'esecuzione di prove meccaniche o di durabilità. Le modalità di esecuzione delle prove meccaniche e di durabilità sono descritte in dettaglio negli articoli scientifici pubblicati a seguito di studi interlaboratorio promossi dal Technical Committee RILEM TC 304-ADC^{3,4,5,6}.

Tutte le operazioni devono avvenire nel rispetto delle normative di sicurezza applicabili (D.Lgs. 81/2008, Direttiva Macchine 2006/42/CE) e delle procedure interne di gestione del cantiere o dello stabilimento.

A supporto di questa fase, si deve fare riferimento all'Appendice A che fornisce indicazioni sulle misurazioni da effettuare sull'elemento stampato.

9 MATERIALI E PRODOTTI CEMENTIZI PER FABBRICAZIONE DIGITALE

9.1 GENERALITÀ

Il presente punto fornisce le regole di qualificazione, certificazione e accettazione dei materiali e prodotti per uso strutturale validi sia per il caso di prefabbricazione che di esecuzione in sito.

9.1.1 DEFINIZIONE E PECULIARITÀ

I materiali impiegati nel 3DCP appartengono alla famiglia dei conglomerati cementizi, ma presentano formulazioni e prestazioni specifiche, in quanto devono soddisfare requisiti simultanei sia allo stato fresco che a quello indurito. In particolare, essi devono garantire:

- **Stampabilità (printability):** capacità del materiale di fluire nell'ugello, mantenere la forma dopo la deposizione e supportare i successivi strati senza eccessive deformazioni.
- **Buildability:** capacità del materiale di sostenere il proprio peso ed il peso degli strati successivi senza collassare.
- **Pumpability:** capacità del materiale di essere pompato con continuità e per tempi prolungati senza provocare blocchi nel sistema di pompaggio.
- **Open time / pot life:** capacità del materiale di mantenere le sue proprietà allo stato fresco nel tempo utile di lavorazione compatibile con le velocità di stampa.

9.2 MATERIALI CEMENTIZI PER LA FABBRICAZIONE DIGITALE

9.2.1 TIPOLOGIE DI MATERIALI E PROCESSO PRODUTTIVO

I componenti dei materiali cementizi utilizzati nella tecnologia di stampa 3D sono gli stessi elencati al paragrafo 11.2.9 delle NTC (leganti, aggregati, aggiunte, additivi e acqua di impasto). Questi materiali

³ Bos, F., Menna, C., Robens-Radermacher, A. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study — approach and main results. Mater Struct 58, 183 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02686-w>

⁴ Robens-Radermacher, A., Kujath, C., Bos, F. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study-Design and implementation of a database system for querying, sharing, and analyzing experimental data. Mater Struct 58, 184 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02650-9>

⁵ Mechtcherine, V., Muthukrishnan, S., Robens-Radermacher, A. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM 304-ADC interlaboratory study – compressive strength and modulus of elasticity. Mater Struct 58, 181 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02688-9>

⁶ Wolfs, R., Verstege, J., Santhanam, M. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study — flexural and tensile strength. Mater Struct 58, 182 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02687-w>

sono caratterizzati da una dimensione massima dell'aggregato solitamente inferiore rispetto a quella del calcestruzzo tradizionale (es. dimensione massima dell'aggregato 8-10 mm).

A seconda di come vengono miscelati i diversi componenti, si possono distinguere i seguenti casi:

- 1) materiale premiscelato: malta secca o calcestruzzo premiscelato secco dove i singoli componenti sono predosati e miscelati in fabbrica in rapporti precisi;
- 2) calcestruzzo confezionato con processo industrializzato: materiale prodotto mediante impianti, strutture e tecniche organizzate sia in cantiere che in uno stabilimento esterno al cantiere stesso, con le prescrizioni indicate al paragrafo 11.2.8 delle NTC;
- 3) calcestruzzo confezionato direttamente in cantiere.

In assenza di specifica norma armonizzata europea, il fabbricante di materiale premiscelato (punto 1 del presente punto) per applicazione di stampa 3D, cui sia da aggiungere in cantiere l'acqua di impasto, deve documentare per ogni componente utilizzato la conformità alla relativa norma armonizzata europea di cui al paragrafo 11.2.9.6 delle NTC.

In più, in accordo con il Capo II del Regolamento UE 2024/3110, art. 14: “un fabbricante può decidere di non assoggettarsi al sistema di valutazione e verifica applicabile della conformità del prodotto ai requisiti dei prodotti applicabili e di non redigere una dichiarazione di prestazione e di conformità qualora si applichi una delle condizioni seguenti: a) il prodotto sia fabbricato in un unico esemplare o su specifica del committente e soddisfi tutte le condizioni seguenti: (i) è fabbricato mediante un processo non in serie; (ii) è prodotto a seguito di una specifica ordinazione; (iii) è installato in una singola ed identificata opera di costruzione da un fabbricante che è anche responsabile della sicurezza dell'incorporazione del prodotto nell'opera di costruzione; e (iv) è fabbricato conformemente alle normative nazionali applicabili e sotto la supervisione dei soggetti incaricati della sicurezza dell'esecuzione delle opere di costruzione designati in conformità delle norme nazionali applicabili”.

Il sistema di estrusione può essere configurato secondo due modalità principali, in funzione della composizione del materiale e delle esigenze del processo (vedere punto 8.2 della presente prassi):

- **sistemi monocomponente (1K)**: conglomerati a base cementizia che necessitano della sola acqua di impasto per essere pompanti ed estrusi attraverso l'ugello;
- **sistemi bicomponente (2K)**: conglomerati a base cementizia che, oltre all'acqua di impasto, richiedono uno specifico additivo che modifica le proprietà del materiale dopo l'estruzione. Un esempio è l'aggiunta di un accelerante liquido nell'ugello di stampa, che accelera la presa e l'indurimento del materiale immediatamente dopo l'estruzione.

Le formulazioni possono includere fibre strutturali o non strutturali (es. PVA, acciaio, basalto, polimeriche) per il controllo della fessurazione e il miglioramento delle proprietà meccaniche. Nel caso di calcestruzzo fibrorinforzato (FRC), si rimanda al paragrafo 11.2.12 delle NTC.

9.2.2 SPECIFICHE DEI MATERIALI CEMENTIZI PER LA STAMPA 3D

La classe di consistenza e il diametro massimo dell'aggregato sono funzione della specifica configurazione di stampa adottata e dai limiti dei sistemi di miscelazione e pompaggio. Test di stampa preliminari sono necessari al fine di verificare la compatibilità tra il materiale cementizio e la stampante. Al contrario, la classe di resistenza, la classe di esposizione ambientale e le altre caratteristiche prestazionali dei materiali cementizi da stampa devono essere compatibili con i requisiti meccanici del progetto.

9.2.3 PRESTAZIONI RICHIESTE ALLO STATO INDURITO (INDICATIVE PER USO STRUTTURALE)

Nel caso di materiali cementizi per usi strutturali, occorre seguire in fase di realizzazione è necessario valutare, con prove di laboratorio (in conformità all'appendice A del presente documento), la resistenza caratteristica a compressione a 28 giorni del materiale gettato f_{ck} e stampato $f_{ck,3D}$ e verificare che sia maggiore o uguale a quella considerata in fase di progetto. Il valore di f_{ck} deve essere ricavato da prove di laboratorio eseguite su provini preparati con materiale proveniente direttamente dall'ugello di stampa. Il valore di $f_{ck,3D}$ deve essere ricavato da prove di laboratorio eseguite su provini estratti da elementi stampati con la stessa configurazione utilizzata per l'elemento strutturale progettato e caratterizzati da:

- layers con la stessa dimensione e geometria di quelli pianificati per l'elemento strutturale progettato,
- massimo valore di tempo interlayer ($\pm 30\%$) previsto durante la realizzazione dell'elemento strutturale progettato,
- percorso di stampa, condizioni ambientali, condizioni di maturazione, procedura di estrazione/taglio in accordo con gli studi interlaboratorio promossi dal Technical Committee RILEM TC 304-ADC^{3,4,5,6}.

Nei materiali cementizi adottati nella fabbricazione digitale, i controlli di qualità e nello specifico la resistenza caratteristica a compressione deve essere valutata a 1, 7, 28 giorni secondo quanto indicato nell'Appendice A. In funzione dell'evoluzione nel tempo della resistenza caratteristica del materiale e della resistenza minima di progetto, il direttore dei lavori può autorizzare l'eventuale messa in opera delle strutture prima dei 28 giorni canonici.

9.2.4 QUALIFICAZIONE E ACCETTAZIONE DEI MATERIALI

Considerata l'assenza di una norma armonizzata specifica per il 3DCP, si raccomanda di seguire quanto indicato nell'Appendice A e le seguenti linee guida per la **qualificazione dei materiali** ad uso strutturale:

- **controllo qualità del materiale:** caratterizzazione completa allo stato fresco ed indurito in conformità all'Appendice A del presente documento;
- **caratterizzazione allo stato indurito:** da eseguire su provini gettati in sít (con materiale proveniente dall'ugello di stampa) e provini ricavati da elementi stampati. Per le prove sui provini gettati si possono seguire i protocolli di cui alla UNI EN 12390 (per compressione, flessione, densità) e UNI EN 196, rispettivamente per calcestruzzo e malta. Per la preparazione e l'estrazione dei provini stampati si raccomanda di seguire le procedure descritte negli studi interlaboratorio promossi dal Technical Committee RILEM TC 304-ADC^{3,4,5,6} adattate alle geometrie stampate e in relazione alle specificità del progetto;

³ Bos, F., Menna, C., Robens-Radermacher, A. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study - approach and main results. Mater Struct 58, 183 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02686-x>

⁴ Robens-Radermacher, A., Kujath, C., Bos, F. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study-Design and implementation of a database system for querying, sharing, and analyzing experimental data. Mater Struct 58, 184 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02650-9>

⁵ Mechtcherine, V., Muthukrishnan, S., Robens-Radermacher, A. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM 304-ADC interlaboratory study – compressive strength and modulus of elasticity. Mater Struct 58, 181 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02688-9>

⁶ Wolfs, R., Verstege, J., Santhanam, M. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study — flexural and tensile strength. Mater Struct 58, 182 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02687-w>

- **prove di aderenza tra strati:** secondo approcci definiti negli studi interlaboratorio promossi dal Technical Committee RILEM TC 304-ADC^{3,4,5,6} utilizzando test di tipo tensione diretta o double-lap shear;
- **certificazione del materiale:** marcatura CE ai sensi del Regolamento Europeo n. 305/2011⁷, in conformità alla specifica norma tecnica armonizzata. In alternativa, una marcatura “per uso strutturale in elementi 3DCP” sulla base di prove iniziali e controlli periodici (FPC) da parte del produttore. In assenza di specifica norma armonizzata europea, vale quanto indicato al punto 9.2.1 del presente documento.

10 PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE

10.1 GENERALITÀ

Il presente punto disciplina la progettazione e la costruzione delle nuove opere soggette anche all’azione sismica. Le sue indicazioni sono da considerarsi aggiuntive e non sostitutive di quelle riportate al punto 7; si deve inoltre far sempre riferimento a quanto indicato nel punto 5, per la valutazione della sicurezza, e nel punto 6, per la valutazione delle azioni sulle costruzioni.

È opportunamente trattata in dettaglio l’analisi di componenti strutturali e fornite le disposizioni per il calcolo, verifica e modellazione delle diverse tipologie strutturali realizzate mediante fabbricazione digitale. È evidente e riconosciuta, infatti, l’importanza che assume nella progettazione la corretta modellazione delle strutture, anche in relazione all’ormai inevitabile impiego dei programmi automatici di calcolo. A tal fine, per le verifiche strutturali, l’esatta geometria del componente oggetto di calcolo deve essere sempre modellata e le sue reali caratteristiche geometriche, meccaniche e inerziali considerate.

In generale, la progettazione sismica di sistemi strutturali e fondazioni realizzati mediante fabbricazione digitale segue quanto indicato al capitolo 7 delle NTC o UNI EN 1998-1.

10.2 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE DEI SISTEMI STRUTTURALI

Edifici sismo-resistenti realizzati con fabbricazione digitale rientrano prevalentemente nella classificazione delle strutture a pareti estese debolmente armate (paragrafo 7.4.3.1 delle NTC) seguendo tutti i principi di calcolo e di dettaglio per esse valide, indicati al paragrafo 7.4.

Le strutture realizzate mediante fabbricazione digitale con materiali cementizi (3DCP), in assenza di dettagli costruttivi specificamente validati per garantire duttilità locale e globale, devono essere considerate a comportamento non dissipativo, e quindi progettate in campo elastico.

³ Bos, F., Menna, C., Robens-Radermacher, A. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study - approach and main results. Mater Struct 58, 183 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02686-x>

⁴ Robens-Radermacher, A., Kujath, C., Bos, F. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study-Design and implementation of a database system for querying, sharing, and analyzing experimental data. Mater Struct 58, 184 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02650-9>

⁵ Mechtcherine, V., Muthukrishnan, S., Robens-Radermacher, A. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM 304-ADC interlaboratory study – compressive strength and modulus of elasticity. Mater Struct 58, 181 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02688-9>

⁶ Wolfs, R., Verstege, J., Santhanam, M. et al. Mechanical properties of 3D printed concrete: a RILEM TC 304-ADC interlaboratory study — flexural and tensile strength. Mater Struct 58, 182 (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02687-w>

⁷ Il Regolamento n. 305/2011 è stato sostituito dal Regolamento n. 3110/2024, che entrerà in vigore da gennaio 2026 e sarà operativo negli anni successivi.

In tal caso, il fattore di struttura si assume pari a:

$$q = 1.0$$

come previsto dal paragrafo 7.3.1 delle NTC e dal punto 3.2.2.5 dell'Eurocodice 8 (UNI EN 1998-1). Qualora siano disponibili evidenze sperimentali e numeriche atte a dimostrare la capacità dissipativa dell'elemento stampato e la presenza di dettagli costruttivi idonei (ad esempio armature integrate, giunti duttili o sistemi ibridi acciaio–cementizio), la struttura può essere assimilata a comportamento mediamente dissipativo (classe di duttilità CD-B) con valori di $q \leq 2.0$, previa adeguata validazione analitico-sperimentale.

In questo ultimo caso, devono essere rispettate tutte le prescrizioni di norma e dettagli costruttivi validi per pareti in CD”B”.

I riferimenti normativi presenti al paragrafo 7.4.6.1.4 delle NTC sono applicabili anche alle pareti stampate. Riguardo ai dettagli costruttivi, a favore di sicurezza, si suggerisce di riferirsi anche al paragrafo 7.8.6.2 delle NTC⁸.

In ambito costruttivo, si suggerisce di evitare riprese di getto e, laddove inevitabile, predisporre specifici dispositivi atti a garantire la continuità strutturale nei riguardi delle sollecitazioni agenti debitamente calcolati e, ove necessario, testati con prove secondo una filosofia del design by testing (UNI EN 1990).

Le verifiche strutturali di elementi stampati devono garantire che le tensioni indotte dalle azioni di progetto non superino le resistenze di progetto ridotte dai coefficienti. Le verifiche agli SLU devono essere condotte nel dominio lineare, considerando le azioni sismiche con fattore $q = 1.0$ e gli altri coefficienti di combinazione come di cui ai paragrafi 2.5.3 e 7.3.6 delle NTC.

Laddove la struttura sia progettata per resistere al sisma in campo elastico, le deformazioni devono risultare compatibili con la capacità deformativa del materiale stampato, verificata sperimentalmente o tramite modelli numerici calibrati.

10.3 CRITERI DI PROGETTAZIONE DI ELEMENTI STRUTTURALI SECONDARI ED ELEMENTI COSTRUTTIVI NON STRUTTURALI

Nel caso il componente stampato sia considerato secondario oppure non strutturale, il paragrafo 7.2.3 delle NTC è applicabile per le dovute verifiche e dettagli costruttivi.

In questo caso, chiaramente, la struttura portante è calcolata d'accordo con le canoniche regole delle norme tecniche in funzione della struttura portante adottata.

Elementi stampati come casseforme a perdere non devono essere considerati collaboranti né per fini di calcolo né per la determinazione di proprietà meccaniche e inerziali di elementi strutturali.

10.4 REQUISITI STRUTTURALI DEGLI ELEMENTI DI FONDAZIONE

Per elementi di fondazione, occorre invece riferirsi ai paragrafi 7.2.5 e 7.11.5 delle NTC.

11 PROGETTAZIONE E COLLAUDO STATICO

11.1 GENERALITÀ

Il presente punto disciplina la redazione dei progetti esecutivi delle strutture, contenente i criteri guida per il loro esame ed approvazione da parte degli Uffici preposti nonché criteri per la loro verifica e

⁸ Giulivo, M., Capozzi, V., Menna, C. (2025). Experimental and analytical assessment of the in-plane behaviour of 3D printed concrete walls subjected to cyclic loads, Engineering Structures, 345 (2025), 121516. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121516>

validazione. Il punto riporta, inoltre, le prescrizioni generali relative al collaudo statico delle opere e le responsabilità del collaudatore.

11.2 PROGETTAZIONE

Fermo restando quanto definito al capitolo 10 delle NTC che resta applicabile nella sua totalità per costruzioni realizzate mediante stampa 3D, specificità legate alla digitalizzazione del processo devono essere introdotte tra cui lo slicing (vedere punto 8.2.4 del presente documento).

11.3 COLLAUDO STATICO

Il collaudo statico di opere realizzate mediante fabbricazione digitale deve comprendere gli adempimenti indicati al capitolo 9 delle NTC.

**APPENDICE A – SCHEDA DI CONTROLLO DI COSTRUZIONI REALIZZATE CON
FABBRICAZIONE DIGITALE CON MATERIALI CEMENTIZI**

Prospetto A.1 - Scheda di controllo di costruzioni realizzate con fabbricazione digitale con materiali cementizi

Informazioni generali	
Progetto	
Responsabile scheda di controllo	
Progettista	
Direttore lavori	
Collaudatore	
Descrizione opera	
Materiale cementizio	<input type="checkbox"/> Materiale premiscelato: malta secca o calcestruzzo premiscelato secco (data di produzione) (massima dimensione dell'aggregato mm)
	<input type="checkbox"/> Malta o calcestruzzo confezionato con processo industrializzato (massima dimensione dell'aggregato mm)
	<input type="checkbox"/> Malta o calcestruzzo confezionato direttamente in cantiere (massima dimensione dell'aggregato mm)
Stampante 3D	<input type="checkbox"/> Stampante monoasse (modello.....)
	<input type="checkbox"/> Stampante multiasse (modello.....)
Luogo (laboratorio/cantiere)	
Data	
Orario inizio/fine stampa	
Condizioni ambientali	<p>... °C / ... %</p> <p>In caso di stampa all'esterno:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Soleggiato <input type="checkbox"/> Parzialmente nuvoloso <input type="checkbox"/> Coperto <input type="checkbox"/> Pioggia <p>Sistema di protezione/copertura:</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Sì (Note:) <input type="checkbox"/> No

Note:

Sistema di miscelazione	
<input type="checkbox"/> Sistema continuo	<input type="checkbox"/> Sistema batch
Modello	Modello
Dosaggio acqua (medio)..... [l/min] Variazioni dosaggio acqua.....[l/min] Note: Temperatura materiale.....[°C]	Volume di miscelazione [l] Tempo di miscelazione..... [min] Velocità di miscelazione [rpm] Modalità dosaggio acqua: <input type="checkbox"/> Manuale <input type="checkbox"/> Automatico (Note:) Dosaggio acqua di impasto: <input type="checkbox"/> Percentuale di acqua sul premiscelato secco:[%] <input type="checkbox"/> Contenuto di acqua sul volume di malta/calcestruzzo: [kg/m ³] Variazioni dosaggio di acqua.....[%] o [kg/m ³] Note:
Se disponibili: <input type="checkbox"/> Frequenza .....[rpm] <input type="checkbox"/> Torque.....[Nm]	Se disponibile: <input type="checkbox"/> Torque.....[Nm]
Sensori installati: (se disponibili, allegare i dati registrati durante la stampa alla scheda di controllo) <input type="checkbox"/> Temperatura materiale <input type="checkbox"/> Temperatura acqua di impasto <input type="checkbox"/> Dosaggio acqua <input type="checkbox"/> Torque <input type="checkbox"/> Velocità di miscelazione	Sensori installati: (se disponibili, allegare i dati registrati durante la stampa alla scheda di controllo) <input type="checkbox"/> Temperatura materiale <input type="checkbox"/> Temperatura acqua di impasto <input type="checkbox"/> Dosaggio acqua <input type="checkbox"/> Controllo batch (Tempo di miscelazione, conteggio, mix-design, velocità di miscelazione) <input type="checkbox"/> Torque

Sistema di pompaggio	
Modello	
Specifiche pompante (produttore, specifiche, orientamento)	
Flusso di materiale	[l/min]
Lunghezza del tubo.....	[m]
Diametro nominale del tubo.....	[mm]
Pressione di pompaggio media.....	[bar]
Variazioni di pressione di pompaggio	[bar]
Note:	
Sensori installati: (se disponibili, allegare i dati registrati durante la stampa alla scheda di controllo)	
<input type="checkbox"/> Temperatura materiale <input type="checkbox"/> Pressione di pompaggio	

Obbligatoria Opzionale

Sistema di estrusione	
<input type="checkbox"/> Sistema monocomponente 1k	<input type="checkbox"/> Sistema bicomponente 2k
Modello	Modello
Buffer di miscelazione <input type="checkbox"/> Sì (modello) <input type="checkbox"/> No	Buffer di miscelazione <input type="checkbox"/> Sì (modello) <input type="checkbox"/> No
Flusso materiale cementizio [l/min]	Flusso materiale cementizio [l/min]
Temperatura materiale media .....[°C]	Temperatura materiale media .....[°C]
Additivo 1: - Nome..... - Portata .....[ml/min] - Dosaggio.....[% m/m] - Temperatura media .....[°C]	
Additivo 2: - Nome..... - Portata .....[ml/min] - Dosaggio.....[% m/m] - Temperatura media .....[°C]	
Geometria/dimensione ugello <input type="checkbox"/> Cilindrico ($\Phi=$ [mm]) <input type="checkbox"/> Rettangolare (L=.... [mm], h= [mm]) <input type="radio"/> Flaps <input checked="" type="checkbox"/> Sì (.....) <input checked="" type="checkbox"/> No	
Sensori installati <i>(se disponibili, allegare i dati registrati durante la stampa alla scheda di controllo)</i> <input type="checkbox"/> Temperatura materiale <input type="checkbox"/> Pressione <input type="checkbox"/> Geometria	

Parametri di stampa	
Altezza layer	..... mm
Larghezza layer	..... mm
Interlayer time	..... s
Velocità lineare dell'ugello di stampa	..... mm/s
Velocità di stampa in altezza	..... m/h

Obbligatoria	Opzionale
--------------	-----------

Controllo qualità materiale

		<i>Normativa di riferimento</i>	N. 1	N. 2	N. 3	N. 4	N. 5
	Ora prelievo:	-					
Stato fresco, materiale estruso dall'ugello	Temperatura [°C]	-					
	Densità stato fresco [kg/m ³]						
	Contenuto di aria [%]						
	Prova tavola a scosse [mm]						
	Slump test (abbassamento) [mm]						
	Slump test (spandimento) [mm]						
	Contenuto di acqua con microonde [%]						
	Slug test – yield stress [kPa]						
Stato indurito, provini gettati con materiale estruso dall'ugello	Confezionamento provini (malta) 4x4x16cm	UNI EN 196-1	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg
	Confezionamento provini (calcestruzzo) 150x150x150cm	UNI EN 12390-3	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg
Conservazione standard in acqua	Confezionamento provini (malta) 4x4x16cm	RILEM TC 304-ADC, UNI EN 196-1	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg
	Confezionamento provini (calcestruzzo) 150x150x150cm	RILEM TC 304-ADC, UNI EN 12390 - 3	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg	<input type="checkbox"/> 1 g <input type="checkbox"/> 7 gg <input type="checkbox"/> 28 gg <input type="checkbox"/> gg
Conservazione in sítο* °C/ ... % (Note:)	Confezionamento provini (malta) 4x4x16cm	UNI EN 196-1	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg
	Confezionamento provini (calcestruzzo) 150x150x150cm	UNI EN 12390-3	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg
Conservazione in sítο* °C/ ... % (Note:)	Confezionamento provini (malta) 4x4x16cm	UNI EN 196-1	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg
	Confezionamento provini (calcestruzzo) 150x150x150cm	UNI EN 12390-3	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg	<input type="checkbox"/> U, 28 gg <input type="checkbox"/> V, 28 gg <input type="checkbox"/> W, 28 gg

Note:

Obbligatoria	Opzionale
--------------	-----------

Descrizione oggetto stampato Modello 3D
Percorso di stampa
Ripresa di stampa e Cold joint Tipo di trattamento impiegato per la ripresa di stampa Posizione Cold joint: <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Cold joint 1: altezza cm (successivo al layer n.)<input type="checkbox"/> Cold joint 2: altezza cm (successivo al layer n.)<input type="checkbox"/> Cold joint 3: altezza cm (successivo al layer n.)<input type="checkbox"/> Cold joint 4: altezza cm (successivo al layer n.)<input type="checkbox"/> Cold joint 5: altezza cm (successivo al layer n.)
Condizioni di conservazione oggetto stampato <ul style="list-style-type: none"><input type="checkbox"/> Trattamento durante la stampa (.....)<input type="checkbox"/> Trattamento dopo la stampa (.....)

Controllo geometrico	Dati di progetto	Misura reale a fine stampa	Delta	Esito (OK/ NON OK)
Altezza totale del manufatto	..... cm	..... cm	..... cm	.....
Larghezza layer	..... cm	..... cm	..... cm	.....
Altezza layer	..... cm	..... cm	..... cm	.....
Deformazioni fuori piano	..... cm	..... cm	..... cm	.....
Scostamento percorsi orizzontali	..... cm	..... cm	..... cm	.....

Metodologia di misura:

- Strumenti impiegati:

Metro rigido Calibro digitale Laser scanner Fotogrammetria

Altro (specificare): _____

- Modalità di rilievo:

Manuale punto-punto

Rilievo 3D completo e confronto con modello

Rilievo strato per strato (per verifiche intermedie)

Eventuali irregolarità

BIBLIOGRAFIA

[1] **ICC 1150-202X**: bozza di standard dell'International Code Council per la tecnologia di costruzione automatizzata 3D, focalizzata sulle pareti in calcestruzzo stampate in 3D.

[2] **Direttive DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik)**: documenti tecnici tedeschi basati sull'esperienza pratica con il 3DCP, che forniscono linee guida per l'applicazione sicura e conforme di questa tecnologia nella forma di "lost formwork".