I PRINCIPALI ADEMPIMENTI DEL DIRETTORE DEI LAVORI STRUTTURE IN UNA GRANDE OPERA DI CARPENTERIA METALLICA: IL GRATTACIELO DELLA TORRE INTESA DI TORINO

Finzi Bruno - CeAS - Milano
Lanza Michele - IIS Service - Genova
Rossini Luca - CeAS - Milano

Sommario
La realizzazione del grattacielo Torre Intesa Sanpaolo a Torino è il risultato di un importante lavoro di progettazione, che ha coinvolto architetti e strutturisti di chiara fama internazionale, e di fabbricazione con l'impegno di Costruttori italiani di carpenteria di primaria importanza. I piani fuori terra sono realizzati con tre nuclei in cls armato e con una poderosa struttura in acciaio con peculiari caratteristiche di tenacità, garantite ovviamente anche in corrispondenza dei giunti saldati. La DL di un'opera di tali dimensioni e complessità è chiamata a svolgere un ruolo particolarmente delicato, nell'ambito delle specifiche incombenze che la legge stessa le attribuisce: è infatti essa garante della conformità della costruzione ai requisiti di progetto e interviene attivamente affinché la sostanza di tali requisiti venga costantemente mantenuta a seguito delle inevitabili modifiche in corso d'opera. Tale funzione è sempre fondamentale a tutela dell'integrità dell'opera e a garanzia degli utenti della stessa; tuttavia essa è ancor più onerosa quando deve ottemperare anche al rispetto di esigenze architettoniche stringenti e pressoché inderogabili di una struttura che dell'impatto estetico e dell'efficienza energetica fa il suo biglietto da visita nei confronti della società.

Il progetto del Grattacielo per il nuovo centro direzionale Intesa Sanpaolo a Torino è al contempo un laboratorio ambientale ed un progetto urbano, oltre che una grande opera strutturale. È inoltre il risultato di un importante lavoro di progettazione che ha coinvolto strutturisti ed architetti di chiara fama internazionale, e di fabbricazione con l'impegno di costruttori italiani di carpenteria di primaria importanza.
L'area occupata dalla costruzione, posta a Torino all'incrocio N/E del Corso Inghilterra con il Corso Vittorio Emanuele II, si colloca ai margini del centro storico al centro di una eccezionale concentrazione di servizi e di attrezzature pubbliche a scala metropolitana in una zona di importanza strategica nell'ambito delle previsioni urbanistiche a medio e a lungo termine della città. L'adiacente giardino Nicola Grosa verrà riqualificato e trasformato in spazio ludico, caratterizzato da prato e funzioni di quartiere.
Sotto il profilo costruttivo, l'immobile sarà dotato delle più avanzate soluzioni tecnologiche ed impiantistiche, nel pieno rispetto dei principi di sostenibilità ambientale e con la massima attenzione ai livelli di sicurezza nonché a quelli di qualità e comfort degli spazi di lavoro. Il grattacielo ospiterà uffici e spazi operativi della Banca. Saranno inoltre installati un centro congressi e strutture per servizi alle persone aperti anche al pubblico. Il pubblico potrà accedere:

- alla sala conferenze e concerti, collocata nella parte inferiore del grattacielo;
- alla serra bioclimatica, completamente vetrata, collocata nella parte superiore del grattacielo e organizzata su tre livelli che accolgono:
    - un ristorante con giardino;
    - spazi espositivi con piccole terrazze coperte;
    - una terrazza panoramica.

fig.1: render del grattacielo.

Sul lato nord, la spina dorsale del grattacielo composta dai nuclei ascensori realizzati in calcestruzzo armato, contribuirà alla vivacità e all'effetto "dentellato" del progetto. Sul lato sud, lungo tutta l'altezza della facciata, saranno installati sistemi di pannelli fotovoltaici, mentre la scala incorporerà un giardino d'inverno verticale con piccole terrazze interne. La volumetria della sala conferenze costituirà una presenza consolidata per Torino. Questo spazio sarà caratterizzato dalla massima flessibilità di utilizzo grazie ad un pavimento mobile e ad un'acustica variabile, trasformandosi in sala concerti, congressi o spettacoli a seconda delle necessità. Nei piani destinati ad ufficio delle prese d'aria potranno aprirsi per permettere il passaggio naturale di aria

fresca attraverso i condotti ricavati nei solai e raffreddare la massa di calcestruzzo armato riducendo di giorno, per effetto induttivo, il fabbisogno di raffrescamento negli uffici. Nel basamento del grattacielo saranno localizzati, oltre agli spazi per la mensa, per l'asilo e per il fitness, tre piani per parcheggi.
Per quanto riguarda l'involucro dell'edificio, le scelte progettuali si caratterizzano per una "doppia pelle" che si adatta alle condizioni climatiche esterne in maniera ideale, utilizzando l'apporto solare quale energia positiva di riscaldamento nelle condizioni invernali e schermando in modo efficace i raggi solari nelle condizioni estive dissipando la loro energia all'esterno degli ambienti climatizzati. L'adattabilità della "pelle" alle condizioni climatiche esterne permette di ottimizzare la prestazione energetica dell'edificio, di ottenere il miglior livello di illuminazione naturale all'interno degli uffici senza compromettere i consumi per la climatizzazione.
La parte di fabbricato che si sviluppa fuori terra (torre) è assimilabile ad un edificio a pianta rettangolare di dimensioni massime 36 x 60m circa, con l'asse principale longitudinale orientato in direzione nord-sud. La parte interrata invece, occupa l'intero lotto edificabile disponibile con un'impronta di 46 x 161m circa. La torre è caratterizzata dalla presenza di due volumi di estremità aventi le medesime proporzioni, staccate dalla parte destinata ad uffici:

- in basso la sala congressi e conferenze;
- in alto la serra vetrata, bioclimatica, ventilata naturalmente.

Gli uffici operativi e di direzione di Intesa Sanpaolo occupano la parte centrale della torre. I sistemi di trasporto delle persone (impianti ascensori) sono concentrati nel nucleo centrale in calcestruzzo che costituisce la spina dorsale del fabbricato all'interno della quale avviene anche la distribuzione di tutti gli impianti tecnologici a partire dalle centrali tecniche dislocate nella parte interrata dell'edificio (livelli da B6 a B1) e nel corpo della torre (livelli da L6 a L34).
Il primo piano interrato del grattacielo è parzialmente occupato da un giardino sul quale si affacciano una serie di spazi adibiti a funzioni accessorie quali ristorante ed asilo nido. Gli altri piani interrati ospitano i locali tecnici, i depositi ed un parcheggio servito da una doppia rampa carrabile elicoidale. A livello B0 (piano campagna) a sud della torre, è previsto un piccolo edificio monopiano adibito a caffè bar.
Gli elementi dimensionali più significativi del progetto possono essere riepilogati in:

- superficie del lotto edificabile: 7000 m^2 circa;
- superficie lorda di pavimento (slp) realizzata: 50000 m^2;
- superficie lorda sviluppata: 107500 m^2 circa;
- numero piani interrati: 6;
- numero piani fuori terra: 37;
- altezza dell'edificio: 160 m circa;
- altezza massima raggiunta in corrispondenza delle 6 megacolonne: 166,25 m;
- superficie lorda del piano tipo ad uffici: 1860 m^2 circa;
- superficie lorda piani interrati: 41800 m^2 circa;
- superficie lorda piani fuori terra: 65700 m^2 circa;
- superficie lorda destinata a parcheggio: 18000 m^2 circa.

fig.2: sezione longitudinale, prospetto sud, prospetto nord della torre.

Dal punto di vista funzionale, l'edificio è così strutturato (dal basso verso l'alto):

- livello B6: locali tecnici;
- livelli B5-B4-B3: parcheggi auto;
- livello B2: locali tecnici e depositi;
- livello B1: a sud asilo e palestra, al centro ristorante e cucine, a nord locali tecnici;
- livello B0 (terra): hall ingresso, reception;
- livelli L1-L2-L3-L4-L5: sala conferenze e servizi annessi;
- livello L6: centrali tecnologiche;
- livello L7: aule di formazione professionale;
- livelli da L8 a L31 e 33: uffici operativi;
- livello L32: uffici direzione;
- livello L34: centrali tecnologiche e cucine del ristorante della serra;
- livello L35: ristorante della serra e terrazze;
- livello L36: sala espositiva e terrazze;
- livello L37: bar e terrazza panoramica.

La progettazione delle strutture ha tenuto conto di alcuni vincoli particolari legati al contesto. La torre infatti, ricade da un lato all'interno della fascia di rispetto di 30 m dall'asse binari imposta da RFI, dall'altro dalle strutture del parcheggio interrato Grosa. L'area di proprietà è lambita da numerose infrastrutture a reti sotterranee, collocate a meno di due metri di distanza dal confine.
La realizzazione della struttura è stata suddivisa in due appalti separati. Nel primo, denominato "Scavi e Diaframmi", sono state eseguite le opere propedeutiche alla realizzazione delle strutture in elevazione. In particolare, la paratia perimetrale berlinese con micropali, i diaframmi perimetrali per il contenimento del terreno, la realizzazione del solettone corrispondente al livello B2 del basamento, che funge da contrasto transitorio dei diaframmi, lo scavo sino alla quota di imposta delle platee di fondazione. Inoltre, è stata avviata la campagna di monitoraggio del sito sia in termini di strutture realizzate che di controllo delle aree e degli edifici adiacenti.
L'elevazione delle strutture ed il completamento della torre costituiscono un secondo lotto d'appalto, che prosegue anche le attività di monitoraggio.
Tali attività sono fondamentali poiché i processi di lavorazione e costruzione sono caratterizzati da una variabilità geometrica e dimensionale dovuta in primo luogo dall'impiego di prodotti che, anche

quando regolamentati da norme che ne definiscono le dimensioni, possiedono tolleranze dimensionali significative rispetto alle dimensioni di riferimento, ed in secondo luogo da processi realizzativi le cui attività sono costituite da un rilevante apporto manuale. Per questi motivi c'è l'esigenza di determinare in modo oggettivo, diretto e facilmente utilizzabile i limiti di accettazione delle lavorazioni in modo da sancire l'accettabilità delle opere. Tutte le misure sono effettuate in modo oggettivo con l'utilizzo di strumenti che esprimano valori numerici discreti. L'accettabilità del lavoro o dell'opera è determinata dal confronto diretto tra il valore riportato dal progetto ed il valore misurato al quale deve essere sommato il valore della tolleranza di ciascuna lavorazione. Pertanto le tolleranze relative ai prodotti, previste dalle norme tecniche applicabili e dai produttori, che definiscono le variazioni dimensionali ammesse nella costruzione, sono da considerarsi esterne all'intervallo di tolleranza relativo alle lavorazioni e quindi da sommare, con il proprio segno, alle tolleranze specifiche di ogni lavorazione.
Ecco allora che la verifica del rispetto delle tolleranze attraverso controlli dimensionali e di posizionamento, di planarità (orizzontalità) e di verticalità delle strutture diventa di rilevanza particolare nel grattacielo, dove eventuali scostamenti amplificherebbero gli inconvenienti derivanti da deformazioni spontanee degli impalcati (concentrazione di sollecitazioni, imperfezioni costruttive locali).
A livello di impostazione strutturale, la torre si configura come una mensola in struttura mista acciaio-calcestruzzo, sviluppata in elevazione e poggiante su un basamento in calcestruzzo, che si estende al di sotto del piano campagna. Nell'ambito di questo schema elementare, si configurano alcuni elementi distintivi, che hanno un ruolo determinante nella definizione dello schema statico del grattacielo e che verranno di seguito esplicitati.

Basement

Il basamento dell'edificio, in calcestruzzo armato, si sviluppa per circa 25 m in profondità nel sottosuolo e costituisce, da un lato la fondazione diretta della struttura e dall'altro il contrasto dei diaframmi perimetrali di contenimento del terreno, da cui risultano svincolati al movimento verticale. I carichi della struttura in elevazione vengono assorbiti in prima istanza dai livelli B1 e B2 e successivamente trasferiti alla platea, mediante accoppiamento di pareti e solai in calcestruzzo.
Tali strutture interrate si estendono per 6 piani ipogei, da B0 a B6, dove il livello B0 corrisponde all'attuale piano campagna mentre il livello B6 corrisponde alla platea di fondazione. In corrispondenza delle strutture in elevazione della torre i livelli B5 e B6 sono accorpati in un'unica platea.
La parte centrale del basement è soggetta all'intero carico della torre soprastante, pertanto subisce la quota parte maggiore dei cedimenti gravitazionali, rispetto alle zone laterali. La scelta strutturale è stata volta alla suddivisione, mediante giunti strutturali, della zona centrale rispetto alle porzioni laterali: tali giunti sono presenti nella fase transitoria di costruzione, durante la quale vengono scontati gran parte dei cedimenti dovuti ai carichi gravitazionali della torre e chiusi con getti di completamento una volta terminato il periodo transitorio. Sono inoltre previsti ulteriori giunti costruttivi in fase di getto, utili alla compensazione degli effetti reologici del calcestruzzo.

Megacolonne

Gli elementi verticali portanti sono costituiti da 6 megacolonne, realizzate con un guscio in acciaio e riempite internamente in calcestruzzo. Si sviluppano in altezza dalla base alla sommità della torre ed assumono, oltre ad un rilevante impiego strutturale, anche un importante segno estetico caratterizzante l'edificio. Le megacolonne sono distribuite lungo gli assi 10, 13 e 16; in particolare i due elementi posti in asse 10 contribuiscono anche alla funzione di controventamento globale, essendo parte del telaio/controvento presente su tale allineamento.

fig.3: concio di base delle megacolonne.

Core

Il nucleo in calcestruzzo armato costituisce il principale elemento di controvento della torre, pertanto, oltre ad assorbire quota parte dei carichi verticali, assume importanza fondamentale nel comportamento della struttura alle forze orizzontali statiche e dinamiche E' impostato sulla platea di fondazione e si sviluppa in altezza sino in sommità, mediante accoppiamento di setti verticali in calcestruzzo che modificano il proprio spessore in funzione delle sollecitazioni variabili in altezza. Tale struttura accoglie al proprio interno i collegamenti verticali degli impianti e degli ascensori.
In direzione nord-sud i tre core assorbono la quasi totalità delle azioni orizzontali, mentre nella direzione est-ovest un ruolo fondamentale è svolto dagli ascensori con relative travi-solette di accoppiamento al core stesso e dal controvento in asse 10, che svolge il ruolo di centratura delle rigidezze rispetto alle masse ed alle azioni del vento.

Transfer

La struttura di trasferimento è costituita da un graticcio di travi reticolari metalliche che accolgono i pilastri in falso e ne riportano il carico sulle megacolonne e sul nucleo in calcestruzzo armato. Ha la funzione di separare dal suolo tutte le strutture verticali ad eccezione delle megacolonne, del core e degli ascensori panoramici. E' collocata tra il livello L6 ed il livello L7 ed è funzionale alla realizzazione di un auditorium tra il livelli L2 ed L6, per il quale è richiesta l'assenza di colonne interne, con la conseguente necessità di "trasferire" il peso degli impalcati sovrastanti alle strutture verticali perimetrali allo stesso auditorio.

fig.4: vista dal basso del transfer, con il controvento in asse 10, sorretto dalle megacolonne.

Strutture in elevazione

La struttura in elevazione è costituita da una serie di elementi che irrigidiscono il sistema strutturale principale.

In primo luogo, si può evidenziare un sistema di controventi.

Il controvento in asse 10 è composto da un telaio irrigidito nella parte inferiore della torre e da due mensole reticolari, accoppiate tra i livelli L7 ed L34. La parte inferiore è costituita dalla reticolare di trasferimento, dalle megacolonne e dalle funi di irrigidimento, mentre le due "mensole" superiori sono costituite dalle megacolonne, dalla colonna P05 e dai diagonali di irrigidimento, accoppiate alle travi e alle funi presenti nel campo centrale.

I controventi nord-sud, formati dalle megacolonne, dalle funi e dalle travi tubolari, offrono un modesto contributo alla resistenza alle azioni orizzontali ma risultano determinanti negli scenari incidentali.

Un secondo sistema è costituito dalle strutture reticolari, dalle colonne interne e le travi di impalcato, che completano il sistema resistente. In particolare, la struttura reticolare disposta in direzione longitudinale sugli assi B-J tra i livelli L34-L35 ha come funzione principale il far fronte agli scenari accidentali; il sistema reticolare presente nel settore nord tra i livelli L6-L7, ha lo scopo di sostenere l'estremità dell'edificio realizzata "a sbalzo" rispetto al core.

Al sistema portante fin qui descritto, si aggiungono la serra tra i livelli 35 e 38, i piani sospesi tra L2 ed L6, che risultano portati dalla struttura principale, ed i "giardini d'inverno", che emergono a sbalzo dagli impalcati, a sud dell'allineamento 10.

fig.5: assemblaggio della struttura metalica di piano a supporto dei solai.

Solai

I solai, impostati su travi principali e secondarie in acciaio, sono realizzati mediante le seguenti tipologie:

- solette realizzate con lamiera grecata e getto di completamento in opera di calcestruzzo armato per la parte nord dei piani tipo della torre (livelli da L8 a L33) e per tutti i livelli da B0 a L7 e da L34 a L37;
- solai costituiti dall'accostamento di elementi prefabbricati modulari in calcestruzzo armato precompresso aventi sezione a "U", solidarizzati mediante getto di completamento in opera (parte sud dei piani da livello L8 a livello L33) e formati in modo da realizzare un'intercapedine orizzontale continua in direzione est/ovest;
- solai in calcestruzzo gettato in opera, a costituire il collegamento tra i core e le parti nord/sud della struttura.

fig.6: vista laterale del cantiere: si notano i core in cls e le megacolonne in acciaio.

I quantitativi più significativi presenti in progetto sono:

- calcestruzzi armati per strutture di fondazione: 19000m^3 circa, cls classe C28/35 e C35/45, acciaio B450C;
- calcestruzzi armati per strutture interrate (setti, muri, pilastri, solai): 19000m^3 circa, cls classe C35/45, acciaio B450C;
- calcestruzzi armati per il nucleo centrale: 6600m^3 circa, cls classe C70/85 e C45/55, acciaio B450C;
- acciaio per megacolonne: 3200t circa, tipo S355 e S460;
- acciaio per strutture in elevazione: 13000t circa, tipo S355 e S460;
- acciaio per scale di sicurezza e giardino d'inverno: 650t circa, tipo S355;
- solai a getto pieno, solai in lamiera grecata e getto di completamento in calcestruzzo: 26500m^3 circa, cls classe C45/55, acciaio B450C;
- solai in elementi prefabbricati in calcestruzzo armato precompresso: 26000m^3 circa, cls classe C45/55.

Alla luce delle quantità di materiali impiegate nella costruzione di un'opera di così grandi dimensioni e complessità, risulta ancora più importante il ruolo della Direzione Lavori di controllo di conformità e di rintracciabilità dei materiali. Ciascun prodotto qualificato infatti, deve costantemente essere riconoscibile per quanto riguarda le caratteristiche qualitative e riconducibile allo stabilimento di produzione tramite marchiatura indelebile dalla quale risulti in modo inequivocabile il riferimento:

- all'azienda produttrice;
- allo stabilimento di lavorazione (per l'acciaio);
- al tipo di materiale.

La procedura utilizzata nella progettazione della torre per l'analisi ed il controllo da parte della Direzione Lavori delle deformazioni prodotte nelle strutture dell'edificio nei vari momenti di costruzione, è relativa al Presetting.

La problematica nasce dalla complessità strutturale e dalla diversa natura dei materiali costituenti l'edificio; la realizzazione delle megacolonne miste in acciaio-calcestruzzo, dei pilastri interni e del transfer in acciaio e del core in calcestruzzo fa sì che si generi in ciascuno di essi un diverso stato tensionale, producendo deformazioni che variano in modo non uniforme nel tempo.
Nello specifico, l'origine delle deformazioni degli elementi in acciaio è dovuta principalmente all'accorciamento elastico, pertanto non esiste variazione significativa nelle deformazioni degli elementi strutturali alla fine della costruzione e a tempo infinito; viceversa, nel calcestruzzo le principali deformazioni sono dovute agli effetti reologici di ritiro e viscosità, fortemente variabili nel tempo, a causa dei quali esiste una grande variazione tra le deformazioni alla fine della costruzione e a tempo infinito. La differente origine delle deformazioni ha come diretta conseguenza sulla costruzione che la quota reale degli elementi strutturali nelle differenti fasi della realizzazione vari sensibilmente rispetto alla quota teorica.
Oggetto del presetting è, quindi, lo studio e l'analisi delle deformazioni che si producono nei principali elementi strutturali sottomessi ad azioni verticali, nei vari step costruttivi ipotizzati nel modello di calcolo, al momento dell'esecuzione della costruzione, alla fine della costruzione e a tempo infinito. Inoltre per minimizzare l'effetto della difformità di deformazioni, da un punto di vista strutturale e funzionale, è stato pianificato un sistema di pre-monte: per quanto riguarda il core, è stato realizzata una pre-monta durante la costruzione, ottenuta con il getto dei vari livelli, in ogni fase, alla quota teorica, in aggiunta ad un presetting concentrato di 25 mm al livello L7 per correggere le deformazioni che si producono durante la fase costruttiva e a tempo infinito e per minimizzare le deformazioni relative tra i core e il resto degli elementi strutturali. Per quanto riguarda la struttura di trasferimento della zona sud, si progetta una contromonta nel cordone superiore della struttura di trasferimento per compensare le deformazioni elastiche dovute al carico permanente; dal lato nord, invece, si definisce una contromonta lineare di 25 mm nella struttura di trasferimento per compensare le deformazioni proprie elastiche dovute al carico permanente. Parallelamente, si applica un presetting di 20 mm a entrambe le strutture di trasferimento.

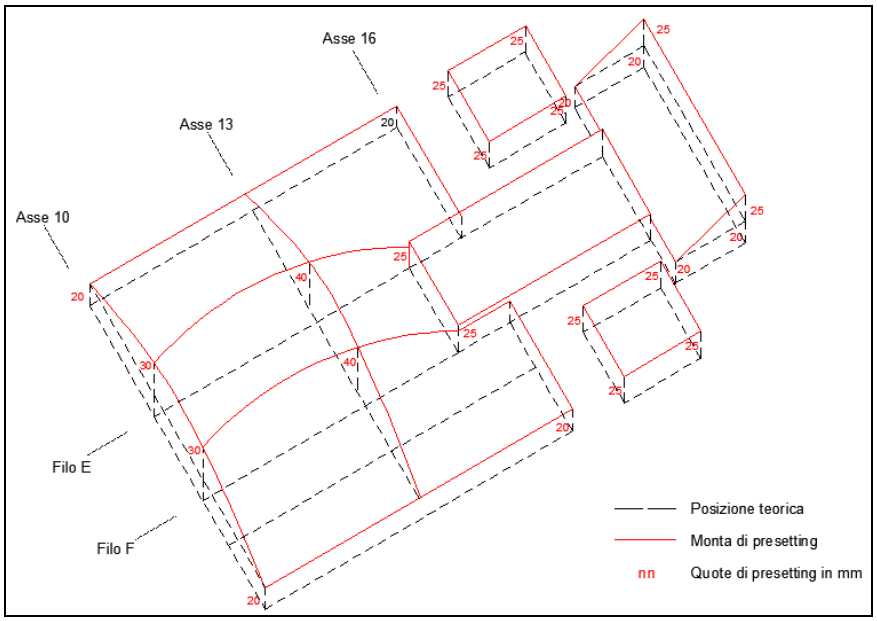


fig.7: schema di presetting degli elementi principali del livello L7.

E' necessario sottolineare che il sistema di presetting sviluppato ha lo scopo di ottenere la massima uniformità nei solai alla fine della costruzione, in modo tale che la quota reale di tutti gli elementi sia il più vicino possibile alla quota teorica. Posto che i valori ottenuti partono da delle ipotesi semplificate ottenute da un modello di calcolo che rappresenta, in modo approssimato, la struttura reale, e che le variabili oggetto di studio corrispondenti agli effetti a lungo termine di ritiro e viscosità hanno un livello di incertezza alto che dipende dalle condizioni climatiche, dalle caratteristiche reali dei materiali, dal processo costruttivo e dalle tolleranze proprie dell'esecuzione,

è necessario controllare e verificare durante la costruzione, tramite tecniche topografiche, che gli accorciamenti e le deformazioni previsti corrispondano con sufficiente approssimazione a quelli reali, in modo che, in caso contrario, sia possibile agire sulle diverse variabili con sufficiente anticipo. In tal senso, è stato previsto un piano di monitoraggio che consenta una verifica continua e puntuale dello stato effettivo della costruzione.
Come anticipato precedentemente, al fine di verificare la correttezza delle ipotesi di calcolo utilizzate per la definizione delle quote di presetting, è stato effettuato un riscontro ad esempio con i risultati misurati in cantiere nella campagna di misura corrispondente allo step costruttivo del piano tipo realizzato fino al solaio a quota di costruzione +104,6 m (corrispondente al livello L26) e a realizzazione dei core fino a quota +127,1 m (corrispondente al solaio di livello L32). Il sistema di controllo ha come scopi principali la verifica del corretto andamento delle lavorazioni durante la costruzione al fine di consentire l'introduzione di eventuali correttivi; la sorveglianza in tempo reale del comportamento strutturale durante la costruzione per fornire informazioni tempestive sulla sicurezza delle operazioni in corso; la verifica nel tempo, durante la fase di esercizio, della continuità del corretto comportamento strutturale della costruzione per consentire la regolare programmazione delle attività di manutenzione. Nella campagna di misura in oggetto sono state determinate le quote differenziali dei vari punti di livellazione, con strumenti ottici di misura situati in corrispondenza del solaio a livello L7 e installati sui correnti delle travi reticolari della struttura di trasferimento; tali strumenti permettono di rilevare gli spostamenti verticali nel tempo, rispetto al punto di riferimento nº12 posto in corrispondenza della megacolonna B10 (vedi fig.8).

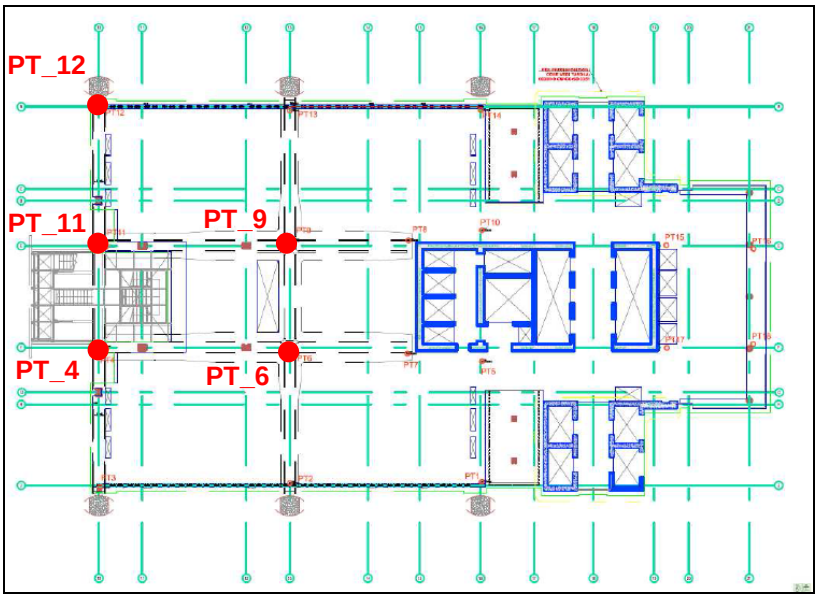
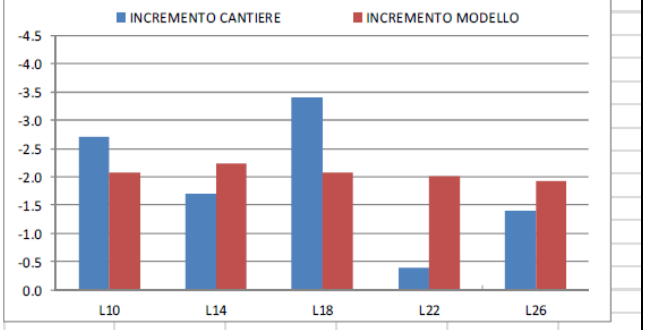


fig.8: schema posizioni dei punti di misura.

I valori risultanti sono stati confrontati con le previsioni teoriche al fine di poter valutare le deformazioni nel tempo della struttura di trasferimento. Il confronto tra i valori teorici e quelli misurati in cantiere è stato effettuato con riferimento sia agli spostamenti assoluti, ovvero in riferimento alla quota iniziale, che a quelli relativi, ovvero gli incrementi di spostamento tra due fasi successive. I grafici di comparazione per ogni rilievo topografico sono stati analizzati per i punti più rilevanti e rappresentativi della monta del transfer: i punti P4 e P11 dell'asse 10 e i punti P6 e P9 dell'asse 13, entrambi nelle intersezioni con gli assi E e F.
A titolo esemplificativo, si riportano i risultati relativi al PT11_Asse 10/E (vedi tab.1). Dalla tabella di incrementi relativi, si evidenzia come l'aumento di deformazione causato dal carico dovuto alla costruzione di quattro piani risulti prossimo ai 2 mm, sia nel modello che nei valori misurati in opera. Si rilevano piccole discrepanze nei valori ottenuti in opera nei rilievi effettuati dopo il getto del solaio corrispondente al livello L18 e del solaio corrispondente al livello L22, di entità tali da poter rientrare nella tolleranza dello strumento di misura.

PT_11_ASSE 10/E

PT_11 LIVELLO	DATA	INCREMENTO CANTIERE	INCREMENTO MODELLO
L10	10/07/2012	-2.7	-2.1
L14	12/09/2012	-1.7	-2.2
L18	23/10/2012	-3.4	-2.1
L22	10/12/2012	-0.4	-2.0
L26	29/01/2013	-1.4	-1.9



tab.1: incrementi relativi, rilevati al punto PT11_Asse 10/E.

I risultati degli incrementi mostrano che la tendenza della deformazione totale o recupero di monta del transfer è simile tra le due misure, a meno di piccole discrepanze nei valori ottenuti in opera nelle campagne di misura effettuate dopo il getto del solaio corrispondente al livello L18 e del solaio corrispondente al livello L22 che, come si vede dal grafico, si correggono dopo il getto del solaio corrispondente al livello L26.
I risultati ottenuti dal monitoraggio hanno lo stesso ordine di grandezza di quelli previsti dal Modello Evolutivo del Progetto Costruttivo e risultano essere praticamente simmetrici rispetto all'asse in direzione Nord-Sud. Pertanto, si evidenzia come i carichi gravino in maniera equilibrata sull'intera struttura di trasferimento, così come teorizzato nel modello.
Nell'ambito del cantiere inoltre, sono poste in essere una serie di procedure realizzative che consentono lo sviluppo in elevazione della struttura con garanzia di verticalità, entro i limiti delle tolleranze imposte.
Per quanto riguarda i core, realizzati con la tecnica del cassero autorampante, le attività di controllo topografico si svolgono con quattro differenti tipologie di misura:

- Controllo con sistema GPS della sommità del cassero esterno, per il corretto posizionamenti dello stesso in termini planimetrici e di verticalità;
- Controllo della verticalità con un sistema laser collocato nei vani della struttura interna in elevazione;
- Controllo periodico della verticalità mediante misura topografica di target posti nelle pareti verticali esterne;
- Controllo periodico della verticalità con filo a piombo posto lungo le pareti in opera, ogni 3-4 rampate.

Per quanto riguarda la carpenteria metallica, vengono effettuati controlli di verticalità sia in fase di realizzazione in officina, sia in fase di montaggio.
Durante la realizzazione delle megacolonne per esempio, tutte le fasi di produzione vengono controllate in stabilimento, tramite controlli geometrici sui singoli elementi e inizialmente sul premontaggio di tre elementi contigui assemblati. Successivamente il rilievo in officina è stato eseguito con scansione laser di ogni singolo concio, che ha permesso di ovviare al premontaggio fisico in officina. La metodologia di rilievo con strumenti di laser scanner consentono di ricavare una "nuvola di punti" che rappresenta l'entità dell'oggetto da rilevare. Le varie nuvole di punti ottenute da ogni scansione vengono unite tra loro per ottenere la nuvola completa dell'oggetto

esaminato. In tal modo si ottiene una fotografia tridimensionale dell'oggetto rilevato, con la possibilità di verificare dopo il rilievo tutte le quote di interesse interagendo con la nuvola di punti.
La costruzione dei conci prevede una successione di lavorazioni che possono influenzare la geometria finale degli elementi, quali la lavorazione meccanica delle flange e dei nuclei di sopravvivenza interni (vedi fig.9), l'assiemaggio e la saldatura delle flange ai nuclei di sopravvivenza interni e la lavorazione meccanica e foratura finale delle flange saldate ai nuclei.

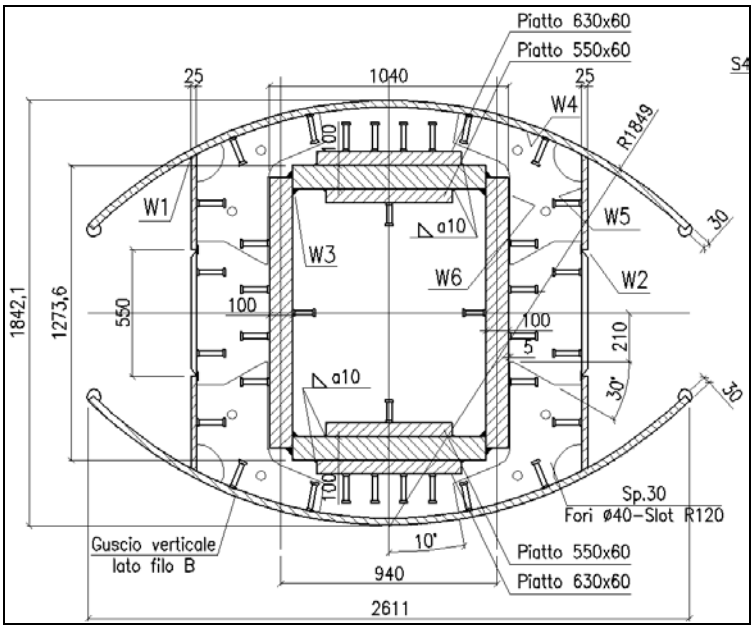


fig.9: sezione di megacolonna con il nucleo di sopravvivenza interno, di forma rettangolare.

Le officine che si occupano delle lavorazioni sono costantemente sotto il controllo della Direzione Lavori, che organizza periodiche visite di expediting con lo scopo di verificare lo stato di avanzamento della produzione. In queste occasioni si analizza il piano di produzione dettagliato, in cui sono descritti e catalogati tutti gli elementi strutturali in lavorazione nello stabilimento. Infine si produce un verbale di sopralluogo, con distinte materiali e documentazione fotografica in allegato.
Per quanto riguarda la qualifica dei materiali utilizzati negli stabilimenti che fungono da Centro di trasformazione, confezionando elementi strutturali a partire da elementi base come barre, rotoli, lamiere o profilati, il Direttore dei Lavori ha l'obbligo di effettuare i controlli stabiliti dalle norme di riferimento. Per evitare di consegnare in cantiere adeguati campioni da sottoporre alle prove di laboratorio, il Direttore dei Lavori ha dato delega ai Direttori Tecnici di stabilimento di effettuare il prelievo dei campioni di materiale che sono oggetto di controllo in laboratorio, dopo essersi accertato preliminarmente che i Centri di Trasformazione fossero in possesso di tutti i requisiti previsti.
Per quanto riguarda gli aspetti tecnologici di fabbricazione mediante saldatura, le strutture principali in acciaio della torre, per lo spessore degli elementi strutturali, il tipo di acciaio impiegato, la forma e il tipo dei giunti saldati, la necessità di eseguire saldature di prefabbricazione e in opera, per la ridotta ispezionabilità della struttura ultimata e ovviamente per le conseguenze di rotture o anomalie gravi, sono state oggetto di particolare attenzione anche nella fase di elaborazione delle specifiche di costruzione e della documentazione a sostegno della garanzia di qualità.
In particolare si è resa necessaria l'elaborazione di una specifica generale per la realizzazione delle giunzioni saldate che definisse in modo ampio e dettagliato i "Requisiti e criteri tecnici generali per la fabbricazione in centro di trasformazione e per il montaggio in opera delle strutture metalliche". Tale documento emesso a cura dei Costruttori, ma condiviso ed approvato dall'Istituto Italiano della Saldatura (IIS), nella sua veste di ente fiduciario della Direzione Lavori, è stato il riferimento per la definizione ed il controllo continuo delle modalità operative da seguire per la fabbricazione in officina (centro di trasformazione ai sensi delle Norme Tecniche sulle Costruzioni)

e per il montaggio in opera, ad integrazione delle richieste del Capitolato Speciale d'Appalto e delle Norme Tecniche sulle Costruzioni emanate con Decreto Ministeriale 14/2/2008. Tale specifica contiene tra l'altro le prescrizioni particolari ed aggiuntive, rispetto alle disposizioni legislative vigenti sulle modalità di esecuzione e qualificazione delle procedure di saldatura e del personale addetto alle operazioni di saldatura ed alle tecniche di assemblaggio, all'estensione e ai metodi di controllo delle giunzioni saldate, nonché alle precauzioni costruttive e ai criteri di buona pratica correntemente utilizzate; ciò costituisce un riferimento importante per la Direzione Lavori, in sintonia con le moderne richieste documentali della normativa europea EN 1090. In particolare viene ribadita la necessità di una figura chiave all'interno delle aziende produttrici delle strutture metalliche, il Coordinatore di Saldatura che ha effettivamente avuto la funzione di diretto interlocutore della Direzione Lavori o del suo ente fiduciario per il controllo di produzione e la risoluzione delle problematiche di fabbricazione. E' infatti demandata al Coordinatore di Saldatura (fatte salve naturalmente prerogative di legge del Direttore Tecnico del Centro di Trasformazione) l'applicazione delle indicazioni delle procedure tecniche, la verifica della fattibilità delle soluzioni progettuali, l'elaborazione dei quaderni delle saldature con indicati la localizzazione dei giunti, il procedimento di saldatura previsto per ogni giunto, la WPS certificata, nonché l'elaborazione delle proposte di risoluzione delle eventuali non conformità.
Le problematiche emerse nella costruzione delle strutture metalliche, sono state talvolta di un certo rilievo, ma il confronto diretto e tempestivo tra Impresa Appaltatrice e Costruttori delle Carpenterie con la Direzione Lavori e l'Istituto Italiano della Saldatura, ha contribuito alla soluzione con obiettivo primario la sicurezza dell'opera e in subordine ma non meno importante, il contenimento dei costi ed il rispetto dei tempi di consegna.
Si vogliono qui citare a solo titolo di esempio, alcune problematiche affrontate e risolte:

- Problematica degli strappi lamellari e lamiere tipo Z 35.

Il capitolato speciale d'appalto richiede che le lamiere per impieghi strutturali siano classificate "tipo Z35", cioè garantiscano una duttilità valutata in termini di strizione non inferiore al 35% su provette di trazione ricavate attraverso lo spessore del laminato. Tale prescrizione è giustificata dalla diffusa presenza di impegnative giunzioni saldate del tipo a T, spesso a piena penetrazione, di spessore anche rilevante, fino a 100 mm in acciaio a media (S355 J2) o alta resistenza (S460 NL): in tali condizioni è lecito considerare seriamente il pericolo di strappi a seguito del processo di saldatura e delle tensioni residue a tale processo direttamente conseguenti. In generale non sono stati riscontrati problemi di approvvigionamento di lamiere Z35 in acciaio S355 J2, mentre sono emersi problemi di duttilità e tenacità nella fascia centrale dello spessore per l'acciaio S460 NL richiesto dal progetto in spessore di 100 mm. La Direzione Lavori ha accettato, d'intesa con i Progettisti una soluzione tecnologicamente affidabile suggerita da IIS che prevede due configurazioni: per i giunti a T, le lamiere di piattabanda dei giunti a T in acciaio S460 sono lavorate con macchina utensile per realizzare una pista scavata di profondità 8-10 mm in corrispondenza della posizione dell'anima; nello scavo viene riportato materiale di apporto di saldatura uguale a quello che verrà utilizzato per le giunzione, il riporto viene spianato al piano della piattabande ed infine viene realizzato il giunto a T di progetto.

fig.10: esempio di preparazione della piattabanda per giunto a T.

Per i giunti testa a testa realizzati con processi di saldatura diversi dall'arco sommerso, una volta realizzato il lembo di saldatura, la fascia centrale viene asportata con mola o macchina utensile per una profondità di circa 12 mm e larghezza circa 20 mm e lo scavo riempito e rilavorato come già sopra indicato. Tali precauzioni tecnologiche, unite alla messa a punto di adeguate procedure di controllo non distruttivo scrupolosamente seguite dagli operatori IIS, hanno risolto il problema contenendo le riparazioni in opera entro valori piuttosto bassi.

fig.11: esempio di giunto testa a testa.

- Elementi di nodo fucinati.

Vista la fondamentale importanza strutturale delle giunzioni a T a piena penetrazione in croce delle piattabande e delle anime dei transfer, si è ritenuto in sede di progetto di affidare la funzione di collegamento a nodi realizzati per fucinatura, di forma geometricamente complessa e atta al trasferimento ottimale delle sollecitazioni. I nodi, pesanti alcune tonnellate, sono realizzati in acciaio bonificato tipo UNI EN 10222-4 per l'acciaio P355 QH. Non sempre tuttavia le caratteristiche meccaniche e la qualità difettologica sono in linea con i requisiti; per scostamenti limitati è opportuno considerare la possibilità di prove integrative a quelle classiche di fornitura e controlli non distruttivi adeguati. Tali strade sono state percorse con il consenso della Direzione Lavori e l'impiego dei tecnici IIS, eseguendo ad esempio una carotatura del corpo di un fucinato per ottenere informazioni dirette e rassicuranti sulle caratteristiche metallurgiche meccaniche e di saldabilità dei manufatti. I riscontri di tali indagini e l'esito positivo dei controlli non distruttivi hanno fatto si che ogni perplessità tecnologica o progettuale fosse risolta.

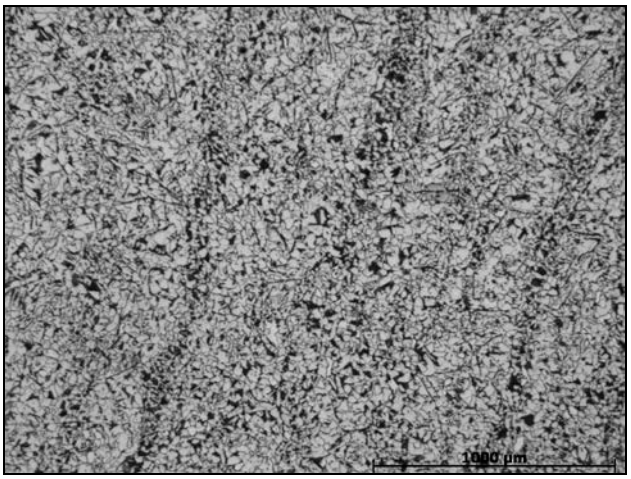


fig.12: struttura metallurgica rilevata su carota estratta da fucinato di nodo.

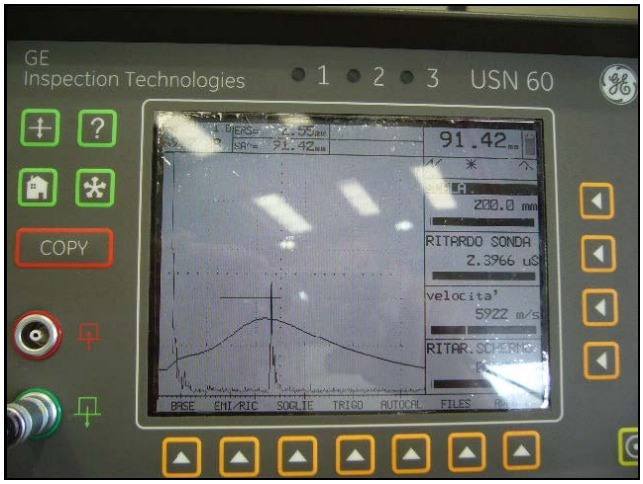


fig.13 e 14: *fasi del controllo ultrasonoro sui fucinati di nodo.*

- Giunzioni tra transfer e megacolonne.

I giunti saldati oggetto di discussione sono tra le anime della struttura di trasferimento e i piatti che costituiscono parte integrante della struttura interna delle megacolonne B10, B13, J10 e J13. Lo spessore degli elementi strutturali e quindi dei giunti saldati è pari a 100 mm e il materiale base è acciaio S460 NL secondo la UNI EN ISO 10025-3 (vedi fig. 15 e 16).

Gi otto giunti di spessore 100 mm dovevano essere eseguiti in opera per le dimensioni degli elementi strutturali coinvolti: si tratta di giunti saldati da eseguire in posizione verticale, di 100 mm

di spessore e di lunghezza tra 7500 mm e 9200 mm a cavallo di quota +30 m. Inoltre poiché i due giunti tra loro paralleli e contrapposti sul medesimo filo e distano solo 840 mm (pari alla distanza tra i piani interni delle anime dei conci del transfer), tali giunti risultano accessibili da un solo lato. In tali condizioni geometriche si è ritenuto che la soluzione più idonea per garantire la corretta esecuzione in quota ed in posizione verticale delle saldature, fosse prevedere l'esecuzione dei giunti su piatto di sostegno metallico sul piano interno delle anime e l'esecuzione dei giunti dall'esterno. In particolare le difficoltà esecutive connesse con il mantenimento di un preriscaldo non inferiore a 100 °C e l'opportunità di eseguire in contemporanea i due giunti contrapposti (Nord e Sud) dello stesso filo e picchetto, hanno indotto alla scelta tecnologica sopra descritta.
Un'ulteriore difficoltà tecnologica risiedeva nella necessità di mantenere la luce al vertice dei giunti entro limiti corretti per la saldatura e contemporaneamente garantire il corretto allineamento della struttura del transfer rispetto alle megacolonne; si consideri che l'interasse tra la coppia di giunti sul filo B e la coppia sul filo J è di 34000 mm. Per consentire il posizionamento del transfer in quota senza gravare sulle megacolonne che altrimenti avrebbero perduto a loro volta il perfetto posizionamento, è stato predisposto un complesso sistema di argani di sollevamento e strutture di sostegno provvisorio; ciò ha consentito di contenere le difformità di posizione rispetto alle quote teoriche entro limiti progettuali accettabili. La superficie dei lembi è stata completamente imburrata con deposito di saldatura seguendo un'istruzione operativa appositamente concepita. Tutte queste precauzioni erano giustificate dall'importanza strutturale dei giunti e dalla grande difficoltà di interventi di riparazione: infatti essi sarebbero risultati estremamente gravosi, sia per la difficilissima accessibilità al rovescio della saldatura (una camera di circa 800 mm di lato e alta più di 9 m con gravi rischi per la sicurezza degli operatori ad arco elettrico), sia per il massimo grado di vincolo dei giunti ed il conseguente rischio di criccabilità a caldo e a freddo dei tratti di giunto riparati. In effetti la qualità generale ottenuta su un'estensione di oltre 50 m è stata buona. In tratti di limitata estensione, è stata riscontrata la presenza di difetti di vertice per imperfetta aderenza del piatto di sostegno; gli interventi di riparazione dei giunti si presentano ad elevato grado di rischio per la qualità finale dei giunti e la sicurezza degli operatori. In particolare la scriccatura e saldatura dall'esterno, avrebbe determinato solchi profondi e stretti, estremamente vincolati, entro i quali non si sarebbe potuto escludere che si determinassero difetti equivalenti o peggiori di quelli che si dovevano asportare. Peraltro l'accessibilità dall'interno era evidentemente molto limitata e le problematiche di sicurezza per gli operatori sarebbero cresciute scendendo dalla estremità superiore verso il basso.

fig.15 e 16: *esempi di giunti saldati del transfer.*

Alla luce delle considerazioni di cui sopra, la Direzione Lavori ha convenuto sulla proposta di IIS di intervenire mediante riparazioni localizzate dall'interno, ma senza l'impiego di scriccatore e senza saldatura di completamento al rovescio. Con tali tecniche si è ottenuta la riparazione di quasi tutti i difetti rilevati. Per alcuni difetti localizzati a circa metà altezza della camera, le condizioni di sicurezza hanno imposto l'applicazione delle tecniche di calcolo della stabilità dei difetti con le tecniche di Meccanica della Frattura: applicazione particolarmente efficace quando, come nel caso in esame si dispone di una perfetta conoscenza dello stato tensionale, della tenacità dei giunti (classificati attraverso prove CTOD, già in sede di qualifica dei processi di saldatura) e delle posizioni e dimensioni dei difetti. Il risultato di tali valutazioni è stato rassicurante. In ogni caso in ottemperanza delle disposizioni legislative e in ossequio ai criteri di prudenza costruttiva, la Direazione Lavori ha raccomandato di inserire i giunti transfer-megacolonne tra quelli da esaminare durante il servizio.

fig.17: fasi di riparazione con molatura di un giunto transfer-megacolonna.

A valle di tutte le considerazioni qui riportate, risulta quindi evidente come la concezione e l'ideazione di un edificio comporti lo studio di un progetto in rapporto alle possibilità e ai metodi di attuazione o di esecuzione dello stesso. La realizzazione di un manufatto architettonico non può d'altronde essere ritenuta una sequenza seriale di fasi, ciascuna esclusivamente dipendente da quella precedente, quanto più un insieme coordinato di attività interdipendenti di cui è difficilmente individuabile in modo netto un inizio e una fine; la progettazione, quindi, non può considerarsi conclusa quando comincia la fase realizzativa, ma prosegue coadiuvata dalla Direzione Lavori facendo proprie le eventuali necessità di modifiche derivanti dalle esigenze costruttive e dall'utilizzo del prodotto stesso.