COLLANA SCIENTIFICA

LA NUOVA INGEGNERIA

Scienza, Innovazione e Cultura Tecnica per le Costruzioni del Futuro

Direzione Scientifica

Ing. Andrea Dell'Erba -- Ing. Diego Dell'Erba



LA SICUREZZA NELLE COSTRUZIONI: EVOLUZIONE, PRINCIPI E CULTURA DELLA PREVENZIONE

«La sicurezza non rappresenta un vincolo alla progettazione, ma uno dei suoi principali indicatori di qualità.»

Anno 2026

Volume 1

Collana scientifica dedicata all'evoluzione dell'ingegneria, della sicurezza e della trasformazione digitale delle costruzioni.

Volumi previsti

1. **Sicurezza, Prevenzione e Ingegneria Digitale**
2. **Building Information Modeling – Metodi e Applicazioni**
3. **Digital Twin nelle Costruzioni**
4. **Intelligenza Artificiale per l'Ingegneria**
5. **Direzione Lavori Digitale**
6. **Diagnostica e Monitoraggio Strutturale**
7. **Infrastrutture Intelligenti**
8. **Sostenibilità e Innovazione nelle Costruzioni**

LA SICUREZZA NELLE COSTRUZIONI: EVOLUZIONE, PRINCIPI E CULTURA DELLA PREVENZIONE

«La sicurezza non rappresenta un vincolo alla progettazione, ma uno dei suoi principali indicatori di qualità.»

PARTE I

LA CULTURA DELLA SICUREZZA

CAPITOLO 1

LA SICUREZZA NELLE COSTRUZIONI: EVOLUZIONE, PRINCIPI E CULTURA DELLA PREVENZIONE

«La sicurezza non rappresenta un vincolo alla progettazione, ma uno dei suoi principali indicatori di qualità.»

1.1 Introduzione

La sicurezza nei luoghi di lavoro costituisce uno dei pilastri fondamentali dell'ingegneria contemporanea e rappresenta un elemento imprescindibile della qualità del processo edilizio. Nel settore delle costruzioni, caratterizzato da un'elevata complessità organizzativa, dalla presenza simultanea di numerosi operatori e dalla continua evoluzione delle lavorazioni, la prevenzione assume un ruolo strategico che va ben oltre il semplice adempimento normativo.

Negli ultimi decenni il concetto stesso di sicurezza ha subito una profonda trasformazione. Se in passato essa era prevalentemente associata all'adozione di misure di protezione durante l'esecuzione delle opere, oggi viene interpretata come un processo integrato che accompagna l'intero ciclo di vita dell'intervento, dalla fase di concezione progettuale fino alla gestione e manutenzione dell'opera realizzata.

Questa evoluzione è il risultato di un cambiamento culturale che ha progressivamente spostato l'attenzione dalla gestione dell'emergenza alla prevenzione del rischio, riconoscendo nella progettazione il momento più efficace per individuare, valutare e ridurre le situazioni potenzialmente pericolose.

La crescente diffusione delle tecnologie digitali, delle metodologie collaborative e dei sistemi di gestione informativa ha ulteriormente rafforzato questa visione. Oggi strumenti quali il

Building Information Modeling (BIM), il Common Data Environment (CDE), i Digital Twin e i sistemi di monitoraggio digitale consentono di affrontare la sicurezza con un approccio sistemico, nel quale dati, competenze e organizzazione concorrono alla costruzione di un ambiente di lavoro più sicuro ed efficiente.

La sicurezza non può quindi essere considerata un settore autonomo rispetto alla progettazione, alla direzione dei lavori o alla gestione del cantiere. Essa rappresenta un requisito trasversale che influenza ogni decisione tecnica, organizzativa ed economica, contribuendo alla qualità complessiva dell'opera.

1.2 L'evoluzione del concetto di sicurezza

La storia della sicurezza nel settore delle costruzioni riflette l'evoluzione dell'ingegneria stessa. Le prime disposizioni legislative erano prevalentemente orientate alla protezione fisica del lavoratore, intervenendo quando il rischio era già presente all'interno del processo produttivo.

Con l'affermarsi della moderna cultura della prevenzione, il legislatore europeo ha progressivamente introdotto un approccio differente, fondato sull'identificazione preventiva dei rischi, sulla pianificazione delle attività e sulla responsabilizzazione di tutti i soggetti coinvolti nel processo edilizio.

L'adozione della Direttiva Quadro 89/391/CEE ha segnato un passaggio decisivo, introducendo principi destinati a modificare profondamente l'organizzazione della sicurezza nei luoghi di lavoro. La successiva Direttiva 92/57/CEE, dedicata ai cantieri temporanei e mobili, ha posto al centro del sistema la figura del coordinamento della sicurezza, riconoscendo come le interferenze tra imprese costituiscano una delle principali cause di rischio.

In Italia tali principi sono stati recepiti e consolidati attraverso il Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81, che rappresenta ancora oggi il principale riferimento normativo in materia di salute e sicurezza sul lavoro.

L'evoluzione normativa ha determinato un cambiamento culturale di grande rilevanza: la sicurezza non è più affidata esclusivamente all'adozione di dispositivi di protezione individuale o al controllo delle attività di cantiere, ma viene considerata una componente essenziale della progettazione, dell'organizzazione e della gestione dell'intero processo costruttivo.

1.3 La sicurezza come qualità del progetto

Uno degli aspetti più innovativi dell'ingegneria contemporanea consiste nell'aver riconosciuto la sicurezza come parametro di qualità dell'opera.

Tradizionalmente la qualità di un edificio veniva valutata sulla base di aspetti quali la resistenza strutturale, la funzionalità, l'estetica, la durabilità e il contenimento dei costi. Oggi a tali requisiti si aggiunge la capacità del progetto di garantire condizioni di lavoro sicure durante la costruzione, la manutenzione e l'intero ciclo di vita dell'opera.

Questa prospettiva modifica profondamente il ruolo del progettista. Egli non è più chiamato esclusivamente a definire geometrie, materiali e prestazioni tecniche, ma deve valutare anche le conseguenze che le proprie scelte progettuali producono sull'organizzazione del cantiere e sulle attività future di gestione dell'edificio.

La scelta di sistemi costruttivi prefabbricati, la riduzione delle lavorazioni in quota, la predisposizione di dispositivi permanenti anticaduta, la progettazione di percorsi sicuri per la manutenzione o la semplificazione delle fasi di montaggio costituiscono esempi concreti di decisioni progettuali che incidono direttamente sulla sicurezza.

In tale prospettiva la prevenzione non rappresenta un costo aggiuntivo, bensì un investimento capace di migliorare la qualità complessiva dell'opera, ridurre gli imprevisti, limitare le varianti in corso d'opera e favorire una migliore organizzazione delle attività.

1.4 Il cantiere come sistema complesso

Il cantiere moderno può essere definito come un sistema dinamico nel quale convergono competenze professionali, tecnologie, imprese, mezzi d'opera, materiali e attività che evolvono continuamente nel tempo.

A differenza dell'ambiente industriale, caratterizzato da processi relativamente stabili e ripetitivi, il cantiere è soggetto a modifiche costanti determinate dall'avanzamento dei lavori, dalle condizioni ambientali, dalle esigenze del committente e dalle inevitabili varianti progettuali.

Questa complessità genera un numero elevato di interazioni tra soggetti diversi, aumentando la probabilità di interferenze operative. È proprio in tali momenti che il coordinamento assume un ruolo determinante.

La sicurezza, pertanto, non può essere affidata esclusivamente alla corretta esecuzione delle singole lavorazioni, ma deve essere governata attraverso una pianificazione complessiva che tenga conto delle relazioni tra persone, mezzi, materiali e tempi di esecuzione.

Il Coordinatore della Sicurezza, il Direttore dei Lavori, il Responsabile Unico del Progetto, il progettista e le imprese sono chiamati a operare come parti di un unico sistema, nel quale la condivisione delle informazioni rappresenta uno dei principali strumenti di prevenzione.

1.5 Dalla cultura dell'adempimento alla cultura della prevenzione

Uno degli ostacoli più significativi alla diffusione della sicurezza è rappresentato dalla tendenza a considerarla un insieme di obblighi documentali.

Piani di Sicurezza, verbali, registri, check-list e procedure costituiscono strumenti indispensabili, ma non possono essere confusi con la sicurezza stessa. La documentazione ha valore soltanto quando rappresenta il risultato di un'effettiva attività di pianificazione, coordinamento e controllo.

La cultura della prevenzione si fonda invece su alcuni principi fondamentali:

- anticipare i rischi prima dell'inizio delle lavorazioni;
- eliminare i pericoli quando tecnicamente possibile;
- privilegiare le protezioni collettive rispetto ai dispositivi individuali;
- promuovere la collaborazione tra tutti i soggetti coinvolti;
- migliorare continuamente il processo attraverso l'analisi dell'esperienza maturata.

Questa impostazione trova oggi un importante supporto nelle metodologie digitali, che consentono di condividere le informazioni, simulare le lavorazioni e verificare preventivamente le interferenze.

1.6 L'innovazione tecnologica come opportunità

Negli ultimi anni il settore delle costruzioni è stato interessato da una rapida evoluzione tecnologica. La progressiva digitalizzazione dei processi ha introdotto strumenti capaci di migliorare la qualità della progettazione e l'efficienza organizzativa dei cantieri.

Il Building Information Modeling, l'Internet of Things, i sistemi di monitoraggio in tempo reale, la Computer Vision e i Digital Twin consentono di raccogliere e analizzare informazioni con un livello di dettaglio fino a pochi anni fa impensabile.

È tuttavia fondamentale evitare un equivoco ricorrente: **la tecnologia non produce automaticamente sicurezza**.

La disponibilità di modelli digitali, sensori o algoritmi di analisi rappresenta un'opportunità solo se inserita all'interno di un processo organizzato, governato da professionisti competenti e fondato su una corretta pianificazione.

L'innovazione tecnologica deve quindi essere interpretata come uno strumento di supporto alle decisioni e non come un sostituto dell'esperienza professionale.

1.7 Una nuova figura professionale: l'ingegnere della sicurezza digitale

L'evoluzione normativa e tecnologica sta progressivamente modificando il profilo dell'ingegnere che opera nel settore delle costruzioni.

Alle competenze tradizionali si affiancano oggi conoscenze relative alla gestione digitale delle informazioni, all'interoperabilità dei sistemi, ai modelli BIM, all'analisi dei dati e agli strumenti collaborativi.

Non si tratta della nascita di una nuova figura giuridica, ma dell'evoluzione del professionista verso un approccio multidisciplinare, nel quale progettazione, organizzazione e innovazione tecnologica convergono in un unico processo.

L'ingegnere della sicurezza del prossimo decennio dovrà essere in grado di interpretare dati complessi, coordinare processi digitali e guidare il cambiamento senza rinunciare ai principi fondamentali della prevenzione e della responsabilità tecnica.

1.8 Considerazioni conclusive

La sicurezza rappresenta oggi uno dei principali indicatori della qualità del processo edilizio. Essa non può essere ridotta a un insieme di prescrizioni normative, ma deve essere interpretata come una componente strutturale della progettazione, dell'organizzazione e della gestione delle opere.

La trasformazione digitale offre strumenti straordinari per migliorare il coordinamento, la pianificazione e il monitoraggio delle attività. Tuttavia, il vero elemento innovativo non risiede nella tecnologia in sé, bensì nella capacità dei professionisti di integrarla all'interno di un processo progettuale consapevole, collaborativo e orientato alla tutela della persona.

Il percorso illustrato in questo capitolo costituisce il punto di partenza della monografia. Nei capitoli successivi saranno approfonditi il quadro normativo, i principi della progettazione della sicurezza e il contributo delle tecnologie digitali alla gestione del rischio, delineando un modello di **ingegneria della sicurezza** capace di coniugare competenza tecnica, innovazione e cultura della prevenzione.

PARTE I

LA CULTURA DELLA SICUREZZA

CAPITOLO 2

IL QUADRO NORMATIVO DELLA SICUREZZA NELLE COSTRUZIONI

Dall'evoluzione legislativa alla trasformazione digitale del processo edilizio

«La normativa non rappresenta il punto di arrivo della prevenzione, ma il quadro entro il quale progettazione, organizzazione e responsabilità devono tradurre la sicurezza in pratica operativa.»

2.1 Introduzione

La sicurezza nei cantieri temporanei e mobili è il risultato di un lungo percorso evolutivo che ha interessato il diritto del lavoro, l'ingegneria, l'organizzazione aziendale e la cultura della prevenzione. Il sistema normativo oggi vigente non si limita a imporre obblighi o prescrizioni tecniche, ma definisce un modello organizzativo nel quale ogni soggetto coinvolto nel processo edilizio è chiamato ad assumere responsabilità precise e coordinate.

Nel settore delle costruzioni, caratterizzato dalla presenza simultanea di molteplici operatori, dalla continua evoluzione delle lavorazioni e dall'elevata variabilità delle condizioni di cantiere, il legislatore ha progressivamente abbandonato un approccio esclusivamente prescrittivo, orientandosi verso un modello fondato sulla pianificazione preventiva del rischio.

L'attuale quadro normativo non deve essere interpretato come un insieme di adempimenti amministrativi, bensì come un sistema integrato finalizzato alla tutela della salute dei lavoratori, alla qualità dell'organizzazione del cantiere e alla corretta gestione delle responsabilità.

Parallelamente, la trasformazione digitale del settore delle costruzioni sta introducendo nuovi strumenti operativi che, pur non modificando i principi giuridici consolidati, consentono di applicarli con maggiore efficacia, trasparenza e tracciabilità.

2.2 L'evoluzione della legislazione europea

La moderna disciplina della salute e sicurezza sul lavoro trova il proprio fondamento nella normativa europea.

L'atto che ha profondamente modificato l'approccio alla prevenzione è rappresentato dalla **Direttiva 89/391/CEE**, nota come *Direttiva Quadro*, che ha introdotto alcuni principi destinati a influenzare tutte le successive legislazioni nazionali.

Tra questi assumono particolare rilievo:

- la valutazione preventiva dei rischi;
- il miglioramento continuo delle condizioni di lavoro;
- la responsabilità organizzativa del datore di lavoro;
- la partecipazione dei lavoratori;
- la formazione quale strumento essenziale di prevenzione.

Per il settore delle costruzioni, un passaggio decisivo è rappresentato dalla **Direttiva 92/57/CEE**, relativa ai cantieri temporanei o mobili.

Per la prima volta viene riconosciuto che la contemporanea presenza di più imprese richiede una figura di coordinamento capace di pianificare le attività e gestire le interferenze prima dell'avvio dei lavori.

Nascono così i principi che oggi caratterizzano il coordinamento della sicurezza in fase di progettazione e in fase di esecuzione.

2.3 Il sistema normativo italiano

Il recepimento delle direttive europee ha portato, nel tempo, alla costruzione di un sistema legislativo organico culminato con il **Decreto Legislativo 9 aprile 2008, n. 81**, comunemente definito *Testo Unico sulla Salute e Sicurezza sul Lavoro*.

Il decreto rappresenta oggi il riferimento principale per tutte le attività lavorative e dedica il **Titolo IV** ai cantieri temporanei e mobili.

La norma individua con precisione i soggetti del processo edilizio e ne disciplina ruoli, responsabilità e rapporti reciproci.

Tra le figure fondamentali figurano:

- il Committente;
- il Responsabile dei Lavori;
- il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione (CSP);
- il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Esecuzione (CSE);
- il Datore di Lavoro dell'impresa affidataria;
- i Datori di Lavoro delle imprese esecutrici;
- i Lavoratori autonomi.

La chiarezza nell'attribuzione delle responsabilità costituisce uno degli elementi più significativi dell'intero sistema normativo.

2.4 I principi fondamentali della prevenzione

Il Testo Unico introduce un principio destinato a modificare profondamente la gestione della sicurezza: il rischio deve essere affrontato prima dell'inizio delle lavorazioni.

Questo orientamento si traduce in una precisa gerarchia delle misure di prevenzione:

1. eliminazione del rischio;
2. riduzione del rischio mediante progettazione;
3. adozione di misure di protezione collettiva;
4. organizzazione delle lavorazioni;
5. informazione e formazione;
6. utilizzo dei dispositivi di protezione individuale.

Tale gerarchia evidenzia come la prevenzione sia principalmente una questione progettuale e organizzativa.

2.5 Gli strumenti operativi previsti dal D.Lgs. 81/2008

Per dare concreta attuazione ai principi della prevenzione, il legislatore ha previsto una serie di strumenti documentali e organizzativi.

Tra i principali si ricordano:

Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC)

Documento elaborato dal Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione che analizza le lavorazioni previste, individua le interferenze e definisce le misure preventive.

Piano Operativo di Sicurezza (POS)

Documento predisposto da ciascuna impresa esecutrice contenente la valutazione dei rischi specifici delle proprie attività.

Fascicolo dell'Opera

Documento destinato ad accompagnare l'edificio durante il suo ciclo di vita, contenente informazioni utili per le future attività di manutenzione.

Notifica Preliminare

Comunicazione obbligatoria alle autorità competenti nei casi previsti dalla normativa.

Questi strumenti assumono pieno valore solo se inseriti in un processo di pianificazione e coordinamento realmente operativo.

2.6 Il ruolo del Coordinatore della Sicurezza

Tra le innovazioni più significative introdotte dalla normativa vi è la figura del Coordinatore della Sicurezza.

Il CSP opera durante la progettazione con l'obiettivo di:

- analizzare il progetto;
- valutare le interferenze;
- pianificare le misure preventive;
- predisporre il PSC;
- redigere il Fascicolo dell'Opera.

Il CSE interviene invece durante l'esecuzione dei lavori, verificando l'attuazione delle misure previste e coordinando le attività delle imprese.

La normativa attribuisce a tali figure un ruolo di coordinamento e controllo, non di sostituzione delle responsabilità proprie dei datori di lavoro e delle imprese.

2.7 Norme tecniche e digitalizzazione

Accanto alla legislazione cogente, un ruolo sempre più importante è svolto dalle norme tecniche volontarie.

Tra le principali:

- **UNI 11337**, relativa alla gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni;
- **UNI EN ISO 19650**, dedicata alla gestione delle informazioni mediante BIM;
- **UNI ISO 45001**, relativa ai sistemi di gestione della salute e sicurezza sul lavoro;
- **UNI ISO 31000**, concernente la gestione del rischio.

Queste norme non introducono nuovi obblighi giuridici, ma forniscono metodologie che favoriscono una migliore organizzazione del processo edilizio.

2.8 Il nuovo Codice dei Contratti Pubblici

L'entrata in vigore del **D.Lgs. 36/2023** ha rappresentato un ulteriore passo verso la digitalizzazione del settore.

Il nuovo Codice promuove:

- digitalizzazione dell'intero ciclo di vita dell'appalto;
- interoperabilità delle piattaforme;
- utilizzo di ambienti di condivisione dei dati;
- progressiva diffusione del BIM negli appalti pubblici.

La digitalizzazione non modifica le responsabilità previste dal D.Lgs. 81/2008, ma offre strumenti capaci di migliorarne l'attuazione.

2.9 Intelligenza Artificiale e quadro regolatorio europeo

L'evoluzione tecnologica impone nuove riflessioni anche sul piano normativo.

Il **Regolamento (UE) 2024/1689** (*AI Act*) definisce il primo quadro europeo dedicato all'utilizzo dei sistemi di Intelligenza Artificiale.

Nel settore delle costruzioni tali strumenti possono essere impiegati per:

- supportare l'analisi documentale;
- elaborare dati di monitoraggio;

- assistere nella pianificazione;
- analizzare immagini di cantiere.

L'AI Act sottolinea tuttavia un principio fondamentale: i sistemi di Intelligenza Artificiale devono operare sotto un'adeguata supervisione umana, garantendo trasparenza, affidabilità e responsabilità.

2.10 La normativa come motore dell'innovazione

Una lettura moderna della legislazione evidenzia come molte delle tecnologie oggi considerate innovative rappresentino, in realtà, strumenti idonei a dare concreta attuazione ai principi già presenti nel sistema normativo.

Il BIM facilita il coordinamento tra progettisti.

Il Common Data Environment migliora la condivisione delle informazioni.

Le simulazioni digitali consentono una più efficace pianificazione delle lavorazioni.

I sistemi di monitoraggio supportano il controllo delle attività.

La trasformazione digitale non sostituisce quindi la normativa, ma ne rafforza l'efficacia applicativa.

2.11 Considerazioni conclusive

Il quadro legislativo italiano ed europeo ha progressivamente trasformato la sicurezza da insieme di prescrizioni tecniche a sistema organizzativo fondato sulla prevenzione, sul coordinamento e sulla responsabilità condivisa.

Le tecnologie digitali rappresentano oggi una straordinaria opportunità per rendere più efficace tale sistema, migliorando la qualità delle informazioni, la tracciabilità delle decisioni e la collaborazione tra i diversi soggetti coinvolti.

La vera innovazione, tuttavia, non risiede nella tecnologia in sé, ma nella capacità di utilizzarla per realizzare quanto la normativa richiede da oltre trent'anni: progettare la sicurezza prima ancora di gestire il rischio.

PARTE II

PROGETTARE LA SICUREZZA

CAPITOLO 3

SAFETY BY DESIGN

La progettazione della sicurezza come principio dell'ingegneria moderna

«Il rischio più efficace da gestire è quello che non viene mai generato.»

3.1 Introduzione

Nel panorama dell'ingegneria contemporanea la sicurezza non rappresenta più un insieme di misure da applicare durante l'esecuzione dei lavori, ma un requisito progettuale che deve essere considerato fin dalle prime fasi del processo edilizio. Questo principio, ormai consolidato nella letteratura internazionale e richiamato dalle principali direttive europee, prende il nome di **Safety by Design** o **Prevention through Design (PtD)**.

La Safety by Design si fonda su un concetto tanto semplice quanto rivoluzionario: **la maggior parte dei rischi può essere eliminata o significativamente ridotta attraverso scelte progettuali consapevoli**. Ciò implica che il progetto non debba limitarsi a definire forma, funzione e prestazioni dell'opera, ma debba incorporare, sin dalla fase ideativa, soluzioni orientate alla tutela della salute e della sicurezza dei lavoratori.

Questo approccio supera la tradizionale separazione tra progettazione e sicurezza, proponendo un modello nel quale la prevenzione diventa parte integrante della qualità progettuale. L'obiettivo non è soltanto ridurre gli infortuni, ma migliorare l'organizzazione del cantiere, la sostenibilità dell'intervento, la manutenzione futura e la resilienza dell'opera lungo l'intero ciclo di vita.

3.2 Origini e sviluppo della Safety by Design

L'idea di affrontare la sicurezza nella fase progettuale si è sviluppata a partire dagli anni Novanta, parallelamente all'evoluzione della normativa europea in materia di salute e sicurezza sul lavoro.

La **Direttiva 92/57/CEE** ha introdotto il principio secondo cui il rischio deve essere valutato e gestito già durante la progettazione dell'opera, attribuendo al Coordinatore per la

Sicurezza in fase di Progettazione il compito di integrare le misure preventive nelle scelte tecniche e organizzative.

Successivamente, numerosi organismi internazionali – tra cui l'ILO, l'EU-OSHA e il NIOSH – hanno sviluppato metodologie orientate alla *Prevention through Design*, evidenziando come una quota significativa degli incidenti nei cantieri possa essere ricondotta a decisioni progettuali che non hanno adeguatamente considerato le modalità costruttive, le interferenze o le future attività di manutenzione.

Oggi la Safety by Design è riconosciuta come uno dei principi fondamentali dell'ingegneria della sicurezza e trova applicazione in numerosi settori, dalle infrastrutture agli edifici civili e industriali, fino agli impianti complessi.

3.3 La sicurezza come requisito progettuale

Tradizionalmente il progetto viene valutato in funzione di requisiti quali la stabilità strutturale, la funzionalità, l'efficienza energetica, l'impatto ambientale e il costo.

La Safety by Design introduce un ulteriore parametro di qualità: **la capacità del progetto di ridurre il rischio durante la costruzione, l'esercizio, la manutenzione e la dismissione dell'opera**.

Ciò comporta un cambiamento culturale profondo. Il progettista non è più chiamato esclusivamente a definire la configurazione tecnica dell'intervento, ma anche a interrogarsi sulle modalità con cui l'opera sarà costruita, utilizzata e mantenuta.

In quest'ottica, ogni scelta progettuale assume una duplice valenza: tecnica e preventiva.

3.4 La gerarchia delle misure di prevenzione

Il principio cardine della Safety by Design è rappresentato dalla gerarchia degli interventi di prevenzione, secondo la quale le misure devono essere adottate seguendo un preciso ordine di priorità.

1. **Eliminare il rischio**, modificando il progetto quando tecnicamente possibile.
2. **Ridurre il rischio**, scegliendo soluzioni costruttive meno pericolose.
3. **Adottare protezioni collettive**, privilegiando opere provvisionali e sistemi permanenti.
4. **Definire procedure organizzative** per le attività residue.
5. **Formare e informare i lavoratori**.

6. **Ricorrere ai dispositivi di protezione individuale (DPI)** come ultima misura.

Questa gerarchia evidenzia come la sicurezza debba essere costruita attraverso il progetto e non demandata esclusivamente ai comportamenti individuali.

3.5 Il ruolo del progettista

La progettazione rappresenta il momento nel quale possono essere eliminate numerose criticità che, una volta avviato il cantiere, risulterebbero difficili o costose da correggere.

Tra le principali decisioni progettuali che influenzano la sicurezza si possono richiamare:

- scelta dei sistemi costruttivi;
- utilizzo della prefabbricazione;
- riduzione delle lavorazioni in quota;
- organizzazione delle aree di cantiere;
- pianificazione della logistica;
- accessibilità per la manutenzione;
- predisposizione di sistemi permanenti anticaduta;
- semplificazione delle fasi di montaggio.

La qualità del progetto si misura anche nella capacità di anticipare tali aspetti.

3.6 Il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione

Il Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione (CSP) rappresenta la figura chiamata a tradurre i principi della Safety by Design in azioni concrete.

Le sue attività comprendono:

- analisi delle lavorazioni;
- valutazione delle interferenze;
- individuazione dei rischi residui;
- predisposizione del Piano di Sicurezza e Coordinamento;
- redazione del Fascicolo dell'Opera;
- coordinamento con il gruppo di progettazione.

Il CSP non opera come soggetto esterno al progetto, ma come parte integrante del processo progettuale, contribuendo alla definizione delle soluzioni tecniche più idonee.

3.7 La gestione delle interferenze

Le interferenze rappresentano una delle principali cause di rischio nei cantieri temporanei e mobili.

Esse possono derivare dalla contemporanea presenza di:

- più imprese;
- lavorazioni incompatibili;
- mezzi di movimentazione;
- impianti temporanei;
- aree di deposito;
- percorsi di accesso.

La Safety by Design affronta tali criticità attraverso la pianificazione preventiva delle fasi di lavoro, la definizione della logistica di cantiere e il coordinamento tra tutti gli attori coinvolti.

L'obiettivo non è soltanto ridurre il rischio, ma migliorare l'efficienza complessiva del processo costruttivo.

3.8 Il contributo delle tecnologie digitali

L'affermazione del Building Information Modeling ha profondamente rafforzato i principi della Safety by Design.

Il modello BIM consente infatti di:

- simulare le lavorazioni;
- verificare le interferenze;
- pianificare il cronoprogramma;
- analizzare gli spazi operativi;
- condividere informazioni tra progettisti e imprese.

La progettazione della sicurezza assume così una dimensione dinamica e collaborativa, nella quale le decisioni possono essere verificate e aggiornate prima dell'inizio delle attività di cantiere.

Il BIM non sostituisce la Safety by Design, ma ne costituisce uno dei principali strumenti applicativi.

3.9 Caso applicativo

Si consideri la progettazione di un edificio direzionale di cinque piani.

Durante le prime fasi progettuali vengono individuate alcune criticità:

- estese lavorazioni in copertura;
- montaggio di facciate continue;
- movimentazione di elementi prefabbricati;
- manutenzione futura degli impianti tecnologici.

Attraverso l'applicazione dei principi della Safety by Design vengono adottate le seguenti soluzioni:

- incremento dell'uso di elementi prefabbricati per ridurre le lavorazioni in quota;
- predisposizione di linee vita permanenti integrate nella copertura;
- definizione di percorsi tecnici dedicati alla manutenzione;
- organizzazione preventiva delle aree di stoccaggio e sollevamento.

L'analisi condotta in fase progettuale consente di ridurre significativamente le interferenze previste durante il cantiere e di migliorare le condizioni di sicurezza nelle successive attività di gestione dell'edificio.

3.10 La Safety by Design nel ciclo di vita dell'opera

Uno degli aspetti più innovativi della progettazione moderna consiste nell'estendere la sicurezza oltre la fase di costruzione.

Le decisioni progettuali influenzano infatti:

- la manutenzione programmata;
- gli interventi straordinari;
- le verifiche ispettive;
- le attività di adeguamento;
- la futura dismissione dell'opera.

Per questo motivo il Fascicolo dell'Opera assume un ruolo strategico, raccogliendo le informazioni necessarie affinché ogni intervento successivo possa essere pianificato in condizioni di sicurezza.

La progettazione della prevenzione accompagna quindi l'intero ciclo di vita del costruito.

3.11 Considerazioni conclusive

La Safety by Design rappresenta oggi uno dei paradigmi fondamentali dell'ingegneria delle costruzioni.

Essa non introduce nuovi obblighi rispetto al quadro normativo vigente, ma propone una diversa prospettiva: affrontare la sicurezza come componente intrinseca della qualità progettuale.

La trasformazione digitale, il Building Information Modeling e le metodologie collaborative offrono strumenti sempre più efficaci per applicare tali principi, rendendo possibile una progettazione più consapevole e una gestione più efficiente del rischio.

Il successo di questo approccio dipenderà tuttavia dalla capacità dei professionisti di integrare competenze tecniche, cultura della prevenzione e innovazione organizzativa.

PARTE II

PROGETTARE LA SICUREZZA

CAPITOLO 4

BUILDING INFORMATION MODELING E GESTIONE DELLA SICUREZZA

Il BIM come piattaforma collaborativa per la prevenzione nei cantieri

«Il modello digitale non rappresenta semplicemente l'opera da costruire: rappresenta la conoscenza condivisa attraverso la quale progettare, coordinare e gestire la sicurezza.»

4.1 Introduzione

La trasformazione digitale del settore delle costruzioni costituisce uno dei cambiamenti più significativi degli ultimi decenni. L'evoluzione delle tecnologie informatiche, la crescente complessità delle opere e la necessità di migliorare qualità, sostenibilità e sicurezza hanno favorito l'affermazione del **Building Information Modeling (BIM)** quale metodologia di riferimento per la gestione delle informazioni lungo l'intero ciclo di vita dell'opera.

Contrariamente a una visione riduttiva, il BIM non coincide con un software tridimensionale né con una semplice rappresentazione grafica dell'edificio. Esso rappresenta un processo collaborativo fondato sulla produzione, condivisione e gestione di informazioni strutturate, integrate in un modello digitale unico.

Nel contesto della sicurezza, il BIM consente di superare l'approccio documentale tradizionale, offrendo al Coordinatore della Sicurezza, ai progettisti e alle imprese uno strumento dinamico per analizzare le interferenze, simulare le fasi costruttive, pianificare le lavorazioni e migliorare il coordinamento tra tutti i soggetti coinvolti.

L'obiettivo non è digitalizzare documenti esistenti, ma costruire un ambiente informativo nel quale la sicurezza diventi parte integrante del progetto.

4.2 Dal disegno al modello informativo

Per molti decenni il progetto edilizio è stato sviluppato attraverso elaborati bidimensionali, costituiti da tavole, sezioni e prospetti. Sebbene tali strumenti abbiano rappresentato il fondamento della progettazione tradizionale, essi presentano limiti evidenti nella gestione di

opere complesse, soprattutto quando occorre coordinare discipline differenti e aggiornare rapidamente le informazioni.

Il Building Information Modeling introduce un paradigma completamente diverso.

Ogni elemento del modello digitale non è soltanto rappresentato geometricamente, ma contiene informazioni relative a:

- caratteristiche dimensionali;
- materiali;
- prestazioni;
- relazioni con altri elementi;
- tempi di realizzazione;
- costi;
- manutenzione;
- documentazione tecnica.

Il progetto diventa così un sistema informativo dinamico, continuamente aggiornabile e condivisibile tra tutti gli attori del processo edilizio.

4.3 I principi del BIM

Il BIM si fonda su alcuni principi metodologici fondamentali.

Collaborazione

Le informazioni vengono prodotte da discipline differenti all'interno di un processo coordinato.

Unicità del dato

Ogni informazione è inserita una sola volta e può essere utilizzata da tutti i soggetti autorizzati.

Aggiornamento continuo

Ogni modifica progettuale viene propagata all'intero modello.

Interoperabilità

Il modello può essere condiviso tra piattaforme differenti mediante standard aperti, come il formato IFC.

Tracciabilità

Ogni revisione è documentata, consentendo il controllo delle modifiche e delle responsabilità.

Questi principi costituiscono la base della gestione digitale della sicurezza.

4.4 Il BIM come strumento per la Safety by Design

Nel capitolo precedente è stato illustrato come la prevenzione debba essere integrata nella progettazione.

Il BIM rappresenta oggi il principale strumento operativo per dare concreta attuazione a tale principio.

Attraverso il modello digitale è possibile:

- simulare le sequenze costruttive;
- individuare interferenze tra lavorazioni;
- verificare gli spazi operativi;
- analizzare le aree di movimentazione;
- pianificare gli accessi;
- valutare la logistica di cantiere.

Il Coordinatore della Sicurezza può quindi partecipare attivamente allo sviluppo del progetto, contribuendo all'eliminazione preventiva dei rischi.

4.5 Il Common Data Environment (CDE)

Elemento centrale della metodologia BIM è il **Common Data Environment (CDE)**, ovvero l'Ambiente di Condivisione dei Dati.

Il CDE costituisce la piattaforma nella quale vengono archiviati, aggiornati e condivisi tutti i documenti e i modelli informativi relativi all'opera.

Una corretta organizzazione del CDE comprende:

- modelli disciplinari;

- modelli federati;
- elaborati grafici;
- PSC;
- POS;
- verbali;
- fotografie;
- cronoprogrammi;
- report di controllo;
- Fascicolo dell'Opera.

La disponibilità di un ambiente informativo unico riduce il rischio di utilizzare documentazione non aggiornata e favorisce la collaborazione tra tutti i soggetti coinvolti.

4.6 Il BIM 4D: la dimensione temporale

L'associazione tra il modello digitale e il cronoprogramma dei lavori dà origine al cosiddetto **BIM 4D**.

Questa metodologia consente di simulare nel tempo l'evoluzione del cantiere, verificando:

- successione delle lavorazioni;
- sovrapposizione delle attività;
- interferenze temporali;
- disponibilità delle aree operative;
- movimentazione dei mezzi.

Per il Coordinatore della Sicurezza il BIM 4D rappresenta uno strumento di straordinaria utilità, poiché permette di analizzare preventivamente le criticità organizzative e di aggiornare il Piano di Sicurezza in funzione delle reali modalità esecutive.

4.7 Clash Detection e analisi delle interferenze

Una delle applicazioni più conosciute del BIM riguarda la **Clash Detection**, ovvero il rilevamento automatico delle interferenze tra elementi appartenenti a discipline differenti.

Tradizionalmente tale procedura viene utilizzata per individuare conflitti tra strutture, architettura e impianti.

Dal punto di vista della sicurezza, il medesimo principio può essere esteso all'analisi delle interferenze operative.

Ad esempio:

- sovrapposizione di lavorazioni incompatibili;
- interferenza tra mezzi di sollevamento;
- conflitti tra percorsi pedonali e carrabili;
- occupazione contemporanea di aree critiche.

L'identificazione preventiva di tali situazioni consente di migliorare il coordinamento e ridurre il rischio.

4.8 Il Piano di Sicurezza e Coordinamento digitale

La metodologia BIM favorisce una progressiva evoluzione del PSC.

Il Piano di Sicurezza non è più soltanto un documento descrittivo, ma può diventare un sistema informativo dinamico collegato al modello digitale.

In questa prospettiva il PSC può essere associato a:

- fasi costruttive;
- elementi del modello;
- cronoprogramma;
- documentazione tecnica;
- procedure operative;
- fotografie;
- verbali;
- aggiornamenti.

Il Coordinatore dispone così di uno strumento continuamente aggiornabile e coerente con l'evoluzione del progetto.

4.9 Il ruolo del Coordinatore nel processo BIM

La digitalizzazione modifica anche le modalità operative del Coordinatore della Sicurezza.

Accanto alle competenze tradizionali assumono crescente importanza:

- lettura dei modelli informativi;
- utilizzo del CDE;
- verifica delle revisioni progettuali;

- coordinamento interdisciplinare;
- interpretazione dei dati.

Il Coordinatore non diventa un BIM Specialist, ma acquisisce competenze sufficienti a utilizzare il modello informativo quale supporto alle proprie attività.

4.10 Caso applicativo

Si consideri la realizzazione di un edificio ospedaliero di nuova costruzione.

Attraverso il modello BIM vengono simulate tutte le principali fasi costruttive.

L'analisi preventiva evidenzia:

- sovrapposizione tra montaggio della struttura metallica e installazione degli impianti;
- interferenze tra percorsi dei mezzi e aree di deposito;
- criticità nella movimentazione di elementi prefabbricati.

Grazie alle simulazioni 4D il cronoprogramma viene riorganizzato, separando temporalmente alcune lavorazioni e ridefinendo la logistica di cantiere.

L'intervento dimostra come la modellazione informativa possa supportare il Coordinatore nella prevenzione delle interferenze senza modificare le responsabilità previste dalla normativa.

4.11 Il BIM lungo il ciclo di vita dell'opera

Uno dei maggiori vantaggi del Building Information Modeling consiste nella continuità informativa.

Le informazioni raccolte durante la progettazione e la costruzione possono essere utilizzate anche nelle successive fasi di gestione dell'edificio.

Tra gli utilizzi principali:

- manutenzione programmata;
- ispezioni;
- gestione degli impianti;
- aggiornamento del Fascicolo dell'Opera;
- interventi di riqualificazione.

La sicurezza viene così estesa all'intero ciclo di vita del costruito.

4.12 Considerazioni conclusive

Il Building Information Modeling rappresenta oggi il principale strumento metodologico per integrare progettazione, organizzazione e sicurezza.

La sua efficacia non dipende dalla complessità del software utilizzato, ma dalla qualità del processo collaborativo e dalla capacità dei professionisti di condividere informazioni affidabili.

Il BIM non sostituisce il Coordinatore della Sicurezza né il progetto tradizionale; li arricchisce, offrendo una piattaforma attraverso la quale pianificare, simulare e documentare la prevenzione.

L'evoluzione della sicurezza nelle costruzioni passa quindi attraverso la gestione intelligente delle informazioni, preparando il terreno alle tecnologie che saranno analizzate nei capitoli successivi: Intelligenza Artificiale, Internet of Things e Digital Twin.

CAPITOLO 5

INTELLIGENZA ARTIFICIALE, INTERNET OF THINGS E DIGITAL TWIN

Le tecnologie emergenti per una nuova ingegneria della sicurezza

«La tecnologia non sostituisce la competenza tecnica: la rende più consapevole, più tempestiva e meglio supportata dai dati.»

5.1 Introduzione

Negli ultimi anni il settore delle costruzioni è stato interessato da una profonda trasformazione digitale che va oltre l'adozione del Building Information Modeling. L'integrazione di **Intelligenza Artificiale (Artificial Intelligence – AI)**, **Internet of Things (IoT)**, **Computer Vision**, **Cloud Computing**, **Digital Twin** e piattaforme collaborative sta modificando il modo in cui vengono progettati, realizzati e gestiti gli interventi edilizi.

Queste tecnologie non costituiscono una semplice evoluzione degli strumenti informatici tradizionali, ma introducono un nuovo paradigma operativo basato sulla raccolta continua di dati, sulla loro elaborazione e sulla capacità di supportare il processo decisionale.

Nel contesto della sicurezza dei cantieri, tali innovazioni consentono di migliorare il monitoraggio delle lavorazioni, la gestione delle interferenze, l'organizzazione delle attività e la pianificazione preventiva. È tuttavia fondamentale ribadire un principio essenziale: **nessuna tecnologia sostituisce il ruolo del Coordinatore della Sicurezza, del progettista o del Direttore dei Lavori**. Le decisioni rimangono sempre affidate alle figure professionali previste dalla normativa.

5.2 La trasformazione digitale del cantiere

Il cantiere contemporaneo può essere descritto come un sistema complesso nel quale convergono persone, macchine, materiali, informazioni e processi.

Tradizionalmente la gestione di tali elementi si basava su documentazione cartacea, comunicazioni frammentarie e verifiche periodiche. Oggi la disponibilità di reti digitali, dispositivi mobili e piattaforme cloud consente di condividere informazioni in tempo reale, riducendo i tempi di comunicazione e migliorando il coordinamento operativo.

La trasformazione digitale del cantiere si fonda su quattro pilastri:

- acquisizione continua dei dati;
- integrazione delle informazioni;
- analisi a supporto delle decisioni;
- collaborazione tra tutti gli attori del processo edilizio.

In questo scenario il dato diventa una risorsa strategica, al pari dei materiali, delle attrezzature e delle competenze professionali.

5.3 L'Intelligenza Artificiale nelle costruzioni

L'Intelligenza Artificiale comprende un insieme di metodologie informatiche capaci di elaborare grandi quantità di dati, individuare schemi ricorrenti e fornire supporto all'analisi di problemi complessi.

Nel settore delle costruzioni le applicazioni dell'AI sono in rapida evoluzione e riguardano principalmente:

- classificazione automatica della documentazione tecnica;
- supporto alla pianificazione delle attività;
- analisi dei cronoprogrammi;
- identificazione di anomalie nei dati di cantiere;

- elaborazione di immagini e filmati;
- organizzazione delle informazioni provenienti dai modelli BIM.

È importante sottolineare che tali sistemi **non assumono decisioni autonome**. Essi producono analisi e suggerimenti che devono essere interpretati e validati dal professionista responsabile.

Il quadro regolatorio europeo, definito dal **Regolamento (UE) 2024/1689 (AI Act)**, pone infatti al centro il principio della supervisione umana, della trasparenza e della tracciabilità.

5.4 Machine Learning e analisi predittiva

Una delle principali applicazioni dell'Intelligenza Artificiale è rappresentata dal **Machine Learning**, disciplina che consente ai sistemi informatici di individuare correlazioni e modelli all'interno di grandi quantità di dati.

Nel contesto della sicurezza il Machine Learning può essere utilizzato per:

- individuare ricorrenze nei near miss;
- analizzare le non conformità;
- classificare gli eventi infortunistici;
- evidenziare lavorazioni con maggiore esposizione al rischio;
- supportare l'aggiornamento delle misure preventive.

Tali analisi non hanno lo scopo di prevedere un infortunio con certezza, ma di fornire al Coordinatore informazioni utili per orientare le attività di controllo e pianificazione.

5.5 Computer Vision

La **Computer Vision** applica algoritmi di elaborazione delle immagini a fotografie e flussi video.

Nel settore delle costruzioni le principali applicazioni riguardano:

- verifica dell'utilizzo dei DPI;
- controllo degli accessi alle aree riservate;
- monitoraggio della viabilità interna;
- documentazione automatica dello stato di avanzamento dei lavori;
- identificazione di situazioni che richiedono ulteriori verifiche.

L'impiego di tali sistemi deve avvenire nel rispetto della normativa sulla protezione dei dati personali e delle disposizioni nazionali in materia di salute e sicurezza.

5.6 Internet of Things (IoT)

L'Internet of Things consente di collegare sensori, dispositivi e attrezzature a una rete di comunicazione, permettendo la raccolta continua di informazioni provenienti dal cantiere.

Tra i dispositivi maggiormente utilizzati si possono citare:

- sensori ambientali;
- centraline meteo;
- sistemi GPS;
- dispositivi RFID;
- sensori di vibrazione;
- inclinometri;
- dispositivi wearable.

Le informazioni raccolte riguardano, ad esempio:

- temperatura;
- umidità;
- qualità dell'aria;
- rumore;
- posizione dei mezzi;
- condizioni di funzionamento delle attrezzature.

L'integrazione di tali dati con il modello BIM consente una rappresentazione più completa dello stato del cantiere.

5.7 Smart PPE

L'evoluzione tecnologica ha favorito lo sviluppo dei **Dispositivi di Protezione Individuale intelligenti (Smart PPE)**.

Tra gli esempi oggi disponibili sul mercato figurano:

- caschi con sistemi di comunicazione integrati;
- dispositivi di localizzazione;
- sensori di rilevamento delle cadute;

- gilet ad alta visibilità con sistemi di segnalazione;
- dispositivi per il monitoraggio delle condizioni ambientali.

L'adozione di tali strumenti deve essere preceduta da un'adeguata valutazione tecnica, dalla formazione degli operatori e dalla verifica della loro conformità ai requisiti applicabili.

5.8 Il Digital Twin

Tra le innovazioni più significative dell'ingegneria digitale si colloca il **Digital Twin**, o gemello digitale.

Esso consiste nella rappresentazione dinamica dell'opera, alimentata da dati aggiornati provenienti dal cantiere.

A differenza del modello BIM, prevalentemente orientato alla progettazione e alla gestione delle informazioni, il Digital Twin integra dati operativi relativi a:

- avanzamento dei lavori;
- monitoraggio dei sensori;
- controlli ispettivi;
- manutenzione;
- prestazioni dell'opera;
- condizioni ambientali.

Il risultato è una rappresentazione digitale costantemente aggiornata, che può supportare il monitoraggio e la gestione dell'intervento.

5.9 Verso il Modello DSE – Digital Safety Engineering

L'integrazione tra Safety by Design, BIM, sensori IoT, Intelligenza Artificiale e Digital Twin consente di delineare un nuovo approccio metodologico.

Gli autori propongono di definire questo processo **Digital Safety Engineering (DSE)**.

Il modello DSE non costituisce una nuova disciplina normativa, bensì un quadro metodologico finalizzato a integrare:

- progettazione della sicurezza;
- gestione digitale delle informazioni;
- monitoraggio del cantiere;

- analisi dei dati;
- supporto alle decisioni;
- aggiornamento continuo del PSC.

L'obiettivo è creare un processo unitario nel quale la sicurezza venga gestita attraverso informazioni condivise e costantemente aggiornate.

5.10 Il ruolo del professionista

La disponibilità di tecnologie avanzate modifica gli strumenti di lavoro ma non altera le responsabilità previste dal D.Lgs. 81/2008.

Il Coordinatore della Sicurezza, il progettista e il Direttore dei Lavori mantengono la piena responsabilità delle valutazioni tecniche e delle decisioni.

Le tecnologie digitali costituiscono strumenti di supporto che consentono di:

- disporre di informazioni più tempestive;
- migliorare il coordinamento;
- documentare le attività;
- favorire il miglioramento continuo.

Il valore aggiunto non risiede nell'automazione, ma nella qualità delle decisioni supportate dai dati.

5.11 Considerazioni conclusive

L'Intelligenza Artificiale, l'Internet of Things e il Digital Twin rappresentano la naturale evoluzione del percorso iniziato con il Building Information Modeling.

Queste tecnologie consentono di ampliare le capacità di monitoraggio, pianificazione e coordinamento, contribuendo a una gestione più efficace della sicurezza.

Il loro impiego richiede tuttavia competenze interdisciplinari, adeguata formazione e una piena consapevolezza dei limiti e delle responsabilità connesse al loro utilizzo.

La vera innovazione non consiste nella sostituzione dell'uomo con la macchina, ma nella costruzione di un processo decisionale più informato, collaborativo e orientato alla tutela della salute e della sicurezza.

PARTE III

IL CANTIERE DIGITALE

CAPITOLO 6

ANALISI DEI DATI, KPI E PREVENZIONE PREDITTIVA

La sicurezza guidata dalle informazioni: dal monitoraggio al supporto decisionale

«I dati non eliminano il rischio. Rendono possibile comprenderlo, misurarlo e governarlo con maggiore consapevolezza.»

6.1 Introduzione

L'evoluzione digitale del settore delle costruzioni ha modificato profondamente il modo in cui vengono prodotte, raccolte e condivise le informazioni. Se fino a pochi anni fa la gestione della sicurezza si basava prevalentemente su documentazione cartacea, sopralluoghi periodici e comunicazioni verbali, oggi il cantiere genera un flusso continuo di dati provenienti da modelli BIM, sensori, piattaforme collaborative, sistemi di monitoraggio e attività ispettive.

La disponibilità di tali informazioni apre nuove prospettive per la prevenzione. Il valore aggiunto non risiede infatti nella semplice raccolta dei dati, ma nella loro capacità di supportare decisioni più tempestive, migliorare il coordinamento e favorire un processo di miglioramento continuo.

Nasce così il concetto di **Data-Driven Safety**, ossia una gestione della sicurezza fondata sull'analisi sistematica delle informazioni e non esclusivamente sull'osservazione episodica degli eventi.

È fondamentale chiarire che questo approccio non sostituisce il giudizio professionale. L'analisi dei dati rappresenta uno strumento di supporto che integra l'esperienza del Coordinatore della Sicurezza, del Direttore dei Lavori e delle imprese, contribuendo a una valutazione più completa delle condizioni operative.

6.2 Il dato come risorsa strategica

Nel settore delle costruzioni il dato assume oggi un ruolo analogo a quello tradizionalmente attribuito ai materiali, alle attrezzature o alle risorse economiche.

Ogni attività di cantiere produce informazioni relative a:

- avanzamento delle lavorazioni;
- verifiche ispettive;
- formazione del personale;
- utilizzo delle attrezzature;
- controlli documentali;
- rilievi ambientali;
- fotografie;
- segnalazioni operative.

Quando tali informazioni vengono raccolte secondo criteri omogenei e condivise attraverso un Ambiente di Condivisione dei Dati (CDE), diventano un patrimonio conoscitivo capace di supportare la pianificazione e il coordinamento delle attività.

La qualità delle decisioni dipende, in larga misura, dalla qualità dei dati disponibili.

6.3 Indicatori di prestazione (Key Performance Indicators)

Per valutare l'efficacia delle misure di prevenzione è necessario disporre di indicatori misurabili.

I **Key Performance Indicators (KPI)** costituiscono strumenti che consentono di monitorare nel tempo l'andamento del sistema di gestione della sicurezza.

Tra gli indicatori più significativi si possono individuare:

- indice di frequenza degli infortuni;
- indice di gravità;
- numero di near miss registrati;
- tempo medio di chiusura delle non conformità;
- percentuale di formazione completata;
- numero di audit effettuati;
- stato di aggiornamento del PSC;
- livello di conformità documentale.

L'utilizzo sistematico dei KPI consente di individuare tendenze, verificare l'efficacia delle misure adottate e orientare le successive azioni di miglioramento.

6.4 Indicatori Leading e Lagging

La moderna gestione della sicurezza distingue due categorie fondamentali di indicatori.

Indicatori Lagging

Misurano eventi già accaduti.

Ad esempio:

- infortuni;
- giornate perse;
- danni;
- sanzioni;
- incidenti.

Essi descrivono il passato e consentono di valutare i risultati ottenuti.

Indicatori Leading

Misurano invece attività preventive.

Tra questi:

- audit programmati;
- formazione erogata;
- verifiche eseguite;
- riunioni di coordinamento;
- aggiornamenti del PSC;
- segnalazioni dei near miss.

Gli indicatori Leading assumono particolare importanza perché consentono di monitorare il livello di attenzione prima che si verifichino eventi indesiderati.

Una gestione evoluta della sicurezza richiede l'utilizzo integrato di entrambe le categorie.

6.5 Il valore dei Near Miss

Uno degli strumenti più efficaci per il miglioramento continuo è rappresentato dall'analisi dei **Near Miss**, ovvero degli eventi che avrebbero potuto provocare un infortunio ma che, per circostanze favorevoli, non hanno prodotto conseguenze.

La registrazione sistematica di tali eventi permette di:

- individuare criticità organizzative;
- verificare l'efficacia delle procedure;
- aggiornare le misure preventive;
- migliorare la formazione;
- sviluppare una cultura della segnalazione.

L'obiettivo non è attribuire responsabilità, ma trasformare ogni episodio in un'opportunità di apprendimento.

6.6 Il ciclo informativo della sicurezza

Perché i dati producano un reale miglioramento è necessario che seguano un processo strutturato.

Gli autori propongono il seguente ciclo operativo:

1. raccolta delle informazioni;
2. verifica della qualità dei dati;
3. classificazione;
4. analisi tecnica;
5. individuazione delle criticità;
6. definizione delle azioni correttive;
7. monitoraggio dei risultati;
8. aggiornamento della documentazione.

Questo processo costituisce uno degli elementi fondamentali del **Modello DSE – Digital Safety Engineering**.

6.7 Dashboard e monitoraggio

La crescente disponibilità di informazioni rende possibile la realizzazione di dashboard dedicate al Coordinatore della Sicurezza.

Una dashboard può integrare:

- avanzamento lavori;
- KPI;
- stato della formazione;
- audit;
- non conformità;

- cronoprogramma;
- condizioni ambientali;
- documentazione aggiornata.

La rappresentazione grafica delle informazioni favorisce una lettura immediata dello stato del cantiere e supporta il processo decisionale.

6.8 Verso la prevenzione predittiva

L'integrazione tra dati storici, monitoraggi in tempo reale e algoritmi di analisi apre la strada al concetto di **prevenzione predittiva**.

È importante precisare che non si tratta di prevedere il verificarsi di un infortunio.

La prevenzione predittiva consiste piuttosto nell'identificare condizioni operative che meritano particolare attenzione, quali:

- concentrazione di lavorazioni interferenti;
- incremento delle non conformità;
- riduzione delle attività formative;
- aumento delle segnalazioni;
- modifiche del cronoprogramma;
- condizioni meteorologiche sfavorevoli.

Queste informazioni consentono al Coordinatore di pianificare controlli mirati e aggiornare tempestivamente il Piano di Sicurezza.

6.9 Data-Driven Safety e Modello DSE

L'evoluzione descritta nei capitoli precedenti trova sintesi nel concetto di **Data-Driven Safety**.

Nel Modello DSE proposto dagli autori, il dato costituisce l'elemento di collegamento tra:

- progettazione;
- BIM;
- Common Data Environment;
- monitoraggio;
- Coordinatore della Sicurezza;
- Direzione Lavori;

- imprese esecutrici.

Le informazioni raccolte non vengono archiviate passivamente, ma alimentano un processo continuo di miglioramento, aggiornando il PSC, il Fascicolo dell'Opera e la pianificazione delle attività.

6.10 Il ruolo del professionista

L'analisi dei dati non modifica il sistema delle responsabilità previsto dal D.Lgs. 81/2008.

Il Coordinatore della Sicurezza mantiene la piena autonomia nelle valutazioni tecniche.

Le tecnologie digitali consentono di:

- disporre di informazioni più complete;
- migliorare il coordinamento;
- documentare le attività;
- supportare il processo decisionale.

Il professionista rimane l'unico soggetto in grado di interpretare criticamente i dati, contestualizzarli e tradurli in decisioni operative.

6.11 Considerazioni conclusive

L'analisi dei dati rappresenta una delle principali opportunità offerte dalla trasformazione digitale delle costruzioni.

L'utilizzo di KPI, dashboard, monitoraggi e sistemi di analisi consente di sviluppare una gestione della sicurezza sempre più orientata al miglioramento continuo.

La vera innovazione consiste nella capacità di trasformare informazioni eterogenee in conoscenza condivisa, mantenendo al centro la competenza tecnica del professionista e la tutela della salute dei lavoratori.

In tale prospettiva il dato diventa uno strumento progettuale e organizzativo, contribuendo alla costruzione di un sistema di prevenzione più efficace, collaborativo e sostenibile.

PARTE IV

DALLA TEORIA ALLA PRATICA

CAPITOLO 7

CASI STUDIO E BUONE PRATICHE

Applicazioni della progettazione digitale nella gestione della sicurezza

«Ogni cantiere è diverso, ma i principi della prevenzione rimangono gli stessi: pianificare, coordinare, condividere e migliorare continuamente.»

7.1 Introduzione

La sicurezza nei cantieri non può essere valutata esclusivamente attraverso il rispetto delle prescrizioni normative o la qualità della documentazione prodotta. Essa trova la propria concreta realizzazione nell'organizzazione quotidiana delle attività, nella capacità di coordinare soggetti differenti e nell'integrazione tra progettazione, pianificazione e controllo operativo.

Nei capitoli precedenti sono stati illustrati il quadro normativo, i principi della Safety by Design, il Building Information Modeling, le tecnologie digitali e il ruolo crescente dell'analisi dei dati. Tuttavia, il valore di tali strumenti emerge pienamente solo quando vengono applicati a contesti reali.

I casi studio presentati in questo capitolo non descrivono opere specifiche, ma rappresentano scenari metodologici costruiti per evidenziare come la progettazione integrata della sicurezza possa migliorare il coordinamento, ridurre le interferenze e favorire una gestione più efficace del cantiere.

7.2 Caso studio A – Edificio residenziale multipiano

Contesto

Il primo scenario riguarda la costruzione di un edificio residenziale di cinque piani con struttura in calcestruzzo armato, autorimessa interrata e copertura tecnica.

Il cantiere prevede:

- una impresa affidataria;

- quattro imprese esecutrici specialistiche;
- oltre cinquanta operatori nelle fasi di maggiore attività;
- utilizzo di gru a torre e piattaforme di lavoro elevabili.

Le principali criticità sono:

- lavorazioni in quota;
- movimentazione dei prefabbricati;
- interferenze tra opere strutturali e impiantistiche;
- gestione della logistica.

Approccio tradizionale

Con un'impostazione tradizionale il Piano di Sicurezza e Coordinamento viene predisposto sulla base degli elaborati progettuali disponibili.

Le eventuali modifiche organizzative vengono affrontate nel corso dell'esecuzione mediante aggiornamenti successivi del PSC.

La verifica delle interferenze avviene prevalentemente durante i sopralluoghi di cantiere.

Approccio digitale

Attraverso l'impiego del BIM:

- il cronoprogramma viene associato al modello tridimensionale (BIM 4D);
- le interferenze tra discipline vengono analizzate preventivamente;
- il Coordinatore verifica la compatibilità delle lavorazioni;
- il PSC viene collegato alle fasi costruttive.

L'analisi preventiva consente di:

- ridurre le sovrapposizioni;
- migliorare la pianificazione;
- ottimizzare la logistica;
- semplificare il coordinamento tra imprese.

7.3 Caso studio B – Riqualificazione energetica di edificio esistente

Contesto

Il secondo scenario riguarda un edificio scolastico oggetto di interventi di efficientamento energetico.

Le lavorazioni comprendono:

- rifacimento della copertura;
- isolamento dell'involucro;
- sostituzione degli impianti;
- installazione di impianto fotovoltaico.

Le attività si svolgono mantenendo parzialmente in esercizio l'edificio.

Principali criticità

Le principali problematiche riguardano:

- compresenza tra attività di cantiere e utenti;
- controllo degli accessi;
- gestione delle emergenze;
- sicurezza delle lavorazioni in copertura;
- coordinamento tra imprese.

Soluzioni organizzative

L'utilizzo del modello BIM consente di:

- rappresentare le aree interdette;
- pianificare le fasi di lavoro;
- programmare gli interventi più critici durante i periodi di chiusura dell'edificio;
- aggiornare il cronoprogramma in funzione dell'evoluzione del cantiere.

L'integrazione con il CDE permette inoltre di condividere in tempo reale elaborati aggiornati, verbali e documentazione di sicurezza.

7.4 Caso studio C – Infrastruttura viaria

Contesto

Il terzo caso riguarda la realizzazione di una variante stradale con opere d'arte, reti tecnologiche e deviazioni della viabilità esistente.

Le principali criticità riguardano:

- traffico veicolare;
- sottoservizi;
- interferenze con reti di pubblica utilità;
- movimentazione di mezzi pesanti.

Pianificazione digitale

La progettazione viene supportata da:

- rilievi topografici digitali;
- modelli BIM infrastrutturali;
- sistemi GIS;
- simulazioni delle fasi costruttive.

Il Coordinatore della Sicurezza utilizza tali informazioni per definire:

- viabilità provvisoria;
- accessi;
- percorsi dei mezzi;
- aree di deposito;
- fasi di cantierizzazione.

7.5 Buone pratiche organizzative

L'analisi dei casi studio consente di individuare alcune pratiche ricorrenti.

Pianificazione anticipata

Le principali interferenze vengono affrontate durante la progettazione.

Riunioni periodiche

Le riunioni di coordinamento assumono un ruolo centrale nel mantenimento della coerenza tra cronoprogramma e PSC.

Aggiornamento continuo

La documentazione viene aggiornata attraverso il Common Data Environment.

Formazione

Le tecnologie digitali richiedono un costante aggiornamento delle competenze professionali.

Monitoraggio

L'impiego di dashboard e KPI consente di verificare l'efficacia delle misure adottate.

7.6 Il Modello DSE applicato

Nei casi illustrati emerge con chiarezza il funzionamento del **Digital Safety Engineering (DSE)**.

Il modello si sviluppa secondo sei fasi operative:

1. progettazione della sicurezza;
2. modellazione BIM;
3. condivisione delle informazioni nel CDE;
4. monitoraggio del cantiere;
5. analisi dei dati;
6. miglioramento continuo.

Ogni fase alimenta la successiva, creando un processo circolare nel quale progettazione ed esecuzione condividono lo stesso patrimonio informativo.

7.7 Benefici osservabili

L'integrazione tra Safety by Design, BIM e DSE produce benefici che interessano l'intero processo edilizio.

Tra i principali:

- migliore coordinamento interdisciplinare;
- riduzione delle interferenze;
- maggiore qualità del PSC;
- migliore tracciabilità delle decisioni;
- aggiornamento continuo della documentazione;
- maggiore trasparenza informativa.

È opportuno evidenziare che tali benefici dipendono dalla qualità dell'organizzazione e non esclusivamente dalla disponibilità delle tecnologie.

7.8 Il ruolo del Coordinatore della Sicurezza

In tutti gli scenari analizzati il Coordinatore mantiene un ruolo centrale.

Le nuove tecnologie ampliano le informazioni disponibili ma non modificano le responsabilità previste dal D.Lgs. 81/2008.

Il Coordinatore diventa progressivamente un gestore di processi informativi, capace di:

- interpretare modelli digitali;
- coordinare discipline differenti;
- valutare dati;
- pianificare le attività;
- aggiornare continuamente il PSC.

Questa evoluzione richiede competenze interdisciplinari che affiancano la tradizionale preparazione tecnica.

7.9 Considerazioni conclusive

I casi studio dimostrano come la sicurezza possa essere significativamente migliorata quando viene affrontata come parte integrante della progettazione e dell'organizzazione del cantiere.

Le tecnologie digitali non sostituiscono il professionista, ma ne rafforzano la capacità di analisi, coordinamento e controllo.

L'approccio proposto dal **Modello DSE** consente di integrare progettazione, gestione documentale, monitoraggio e miglioramento continuo in un unico processo metodologico.

La vera innovazione consiste quindi nella costruzione di un sistema collaborativo nel quale tutti gli attori condividono informazioni aggiornate, obiettivi comuni e responsabilità chiaramente definite.

PARTE IV

DALLA TEORIA ALLA PRATICA

CAPITOLO 8

LINEE GUIDA OPERATIVE PER IL COORDINATORE DELLA SICUREZZA NELL'ERA DIGITALE

Il Modello DSE – Digital Safety Engineering come metodologia integrata per la gestione della sicurezza

«La sicurezza non è un documento da produrre, ma un processo da governare. La trasformazione digitale rende questo processo più trasparente, collaborativo e misurabile.»

8.1 Introduzione

L'evoluzione della normativa, delle metodologie progettuali e delle tecnologie digitali impone una riflessione sul ruolo del Coordinatore della Sicurezza e, più in generale, sull'organizzazione del processo edilizio.

Nei capitoli precedenti è stato evidenziato come la prevenzione debba essere affrontata fin dalla progettazione, come il Building Information Modeling favorisca la condivisione delle informazioni e come l'Intelligenza Artificiale, i sistemi di monitoraggio e l'analisi dei dati possano supportare il processo decisionale.

Il presente capitolo raccoglie tali principi in un quadro metodologico unitario, proponendo un insieme di linee guida operative destinate ai professionisti che operano nei cantieri temporanei e mobili.

Le indicazioni riportate non sostituiscono gli obblighi previsti dal D.Lgs. 81/2008, ma costituiscono una metodologia organizzativa finalizzata a migliorare il coordinamento, la qualità delle informazioni e l'efficacia della prevenzione.

8.2 Il Modello DSE – Digital Safety Engineering

Gli autori propongono il **Digital Safety Engineering (DSE)** quale modello metodologico per la gestione integrata della sicurezza nei processi digitalizzati.

Il DSE non rappresenta una nuova figura professionale né un sistema normativo alternativo. Esso costituisce una metodologia che integra:

- Safety by Design;
- Building Information Modeling (BIM);
- Common Data Environment (CDE);
- Piano di Sicurezza e Coordinamento (PSC);
- monitoraggio digitale;
- analisi dei dati;
- miglioramento continuo.

Il principio fondamentale del modello è che **la sicurezza debba essere gestita come un processo informativo continuo**, nel quale ogni decisione sia supportata da dati aggiornati, condivisi e verificabili.

8.3 Le sei fasi del Modello DSE

Il processo proposto si articola in sei fasi principali.

Fase 1 – Pianificazione

Durante la progettazione vengono analizzati:

- caratteristiche dell'opera;
- organizzazione del cantiere;
- rischi prevedibili;
- interferenze;
- logistica.

In questa fase il Coordinatore partecipa attivamente allo sviluppo del progetto.

Fase 2 – Modellazione

Il progetto viene sviluppato mediante il Building Information Modeling.

Il modello informativo comprende:

- architettura;
- strutture;
- impianti;
- fasi costruttive;
- cronoprogramma;
- documentazione di sicurezza.

Fase 3 – Condivisione

Tutte le informazioni vengono organizzate nel Common Data Environment.

Il CDE contiene:

- modelli;
- PSC;
- POS;
- verbali;
- fotografie;
- report;
- cronoprogrammi;
- Fascicolo dell'Opera.

Ogni documento è disponibile nella versione aggiornata e condivisa.

Fase 4 – Monitoraggio

Durante l'esecuzione dei lavori il Coordinatore verifica:

- avanzamento;
- interferenze;
- non conformità;
- audit;
- formazione;
- condizioni ambientali.

I dati possono provenire da:

- sopralluoghi;
- sensori;
- fotografie;
- sistemi digitali;
- piattaforme collaborative.

Fase 5 – Analisi

Le informazioni raccolte vengono elaborate attraverso:

- KPI;
- dashboard;
- analisi dei Near Miss;
- cronologia delle verifiche;
- indicatori Leading e Lagging.

L'obiettivo è individuare tempestivamente eventuali criticità.

Fase 6 – Miglioramento continuo

Le decisioni assunte producono:

- aggiornamento del PSC;
- revisione delle procedure;
- nuove attività formative;
- aggiornamento della pianificazione;
- miglioramento del coordinamento.

Il ciclo ricomincia alimentando un processo continuo di prevenzione.

8.4 Workflow operativo del Coordinatore della Sicurezza

Il Coordinatore della Sicurezza digitale opera attraverso un processo ciclico.

Progettazione → Modellazione BIM → Pianificazione → Coordinamento → Monitoraggio → Analisi → Aggiornamento → Miglioramento continuo

Ogni fase produce nuove informazioni che alimentano il sistema.

La documentazione non rappresenta il fine del processo, ma il risultato del coordinamento.

8.5 Checklist operativa

Prima dell'avvio del cantiere il Coordinatore dovrebbe verificare:

□ completezza del progetto;

□ coerenza del PSC;

□ analisi delle interferenze;

□ cronoprogramma;

□ organizzazione della logistica;

□ accessi;

□ viabilità interna;

□ aree di deposito;

□ piano delle emergenze;

□ Fascicolo dell'Opera.

Durante l'esecuzione:

□ sopralluoghi;

□ aggiornamento PSC;

□ riunioni di coordinamento;

□ verifica POS;

□ formazione;

□ gestione Near Miss;

□ monitoraggio KPI.

8.6 Indicatori consigliati

Per una gestione evoluta della sicurezza gli autori propongono il monitoraggio dei seguenti indicatori.

Organizzazione

- numero riunioni;
- aggiornamenti PSC;
- audit.

Sicurezza

- Near Miss;
- non conformità;

- verifiche effettuate.

Formazione

- ore di formazione;
- addestramento;
- esercitazioni.

Documentazione

- aggiornamento elaborati;
- revisioni BIM;
- stato del Fascicolo.

8.7 Le competenze del Coordinatore della Sicurezza Digitale

Il Coordinatore del prossimo decennio dovrà integrare competenze tradizionali con nuove capacità.

Tra le principali:

- progettazione della sicurezza;
- normativa;
- BIM;
- gestione CDE;
- analisi dati;
- comunicazione;
- coordinamento interdisciplinare;
- gestione digitale dei documenti;
- principi di Intelligenza Artificiale;
- cybersecurity dei dati di progetto.

La tecnologia amplia gli strumenti disponibili ma non modifica le responsabilità professionali.

8.8 Formazione continua

La trasformazione digitale rende indispensabile un aggiornamento costante.

I percorsi formativi dovrebbero comprendere:

- BIM;

- ISO 19650;
- AI Act;
- sistemi digitali;
- Data Management;
- Digital Twin;
- sicurezza informatica;
- interoperabilità.

La formazione non riguarda soltanto il Coordinatore, ma tutti gli attori del processo edilizio.

8.9 Il futuro della sicurezza

Le costruzioni stanno entrando in una nuova fase evolutiva.

Nei prossimi anni assisteremo ad una crescente diffusione di:

- cantieri connessi;
- Digital Twin;
- robotica;
- sensori intelligenti;
- realtà aumentata;
- analisi predittiva;
- automazione documentale.

Queste innovazioni richiederanno professionisti capaci di integrare competenze tecniche, organizzative e digitali.

La sicurezza continuerà ad avere come riferimento la persona, ma disporrà di strumenti sempre più sofisticati per supportare la prevenzione.

8.10 Considerazioni conclusive

La sicurezza del futuro non dipenderà esclusivamente dall'evoluzione delle tecnologie digitali.

Essa dipenderà soprattutto dalla capacità dei professionisti di utilizzare tali strumenti per migliorare la qualità della progettazione, del coordinamento e dell'organizzazione del cantiere.

Il **Modello DSE – Digital Safety Engineering** proposto dagli autori rappresenta un contributo metodologico volto a integrare Safety by Design, Building Information Modeling, monitoraggio digitale e analisi dei dati in un unico processo collaborativo.

L'obiettivo non è sostituire il quadro normativo esistente, ma fornire ai professionisti uno schema operativo coerente con la trasformazione digitale del settore delle costruzioni.

La sicurezza rimane, oggi come ieri, una responsabilità dell'uomo.

La tecnologia ne amplia le possibilità.

La competenza ne garantisce l'efficacia.

Collana scientifica dedicata all'evoluzione dell'ingegneria, della sicurezza e della trasformazione digitale delle costruzioni.

Volumi previsti

Sicurezza, Prevenzione e Ingegneria Digitale

Building Information Modeling – Metodi e Applicazioni

Digital Twin nelle Costruzioni

Intelligenza Artificiale per l'Ingegneria

Direzione Lavori Digitale

Diagnostica e Monitoraggio Strutturale

Infrastrutture Intelligenti

Sostenibilità e Innovazione nelle Costruzioni