

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Edile e Resilienza del Costruito

Tesi di Laurea Magistrale

**Incidenti con apparecchi di sollevamento:
l'ingegneria forense come metodo di individuazione
di specifiche misure di sicurezza per il montaggio**



Relatore

Prof. Ing. Alberto Lauria

Candidato

Francesco Bellora

Aprile 2023

Abstract | IT

L'ingegneria forense è la pratica professionale che si avvale della conoscenza scientifica come strumento a supporto dell'attività giudiziaria, ricostruendo la dinamica di incidenti e guasti e determinandone le cause. In questa tesi si ripercorrono gli step del processo metodologico e investigativo, soffermandosi sui principali strumenti e metodi ingegneristici utilizzati dai professionisti.

Successivamente, la disciplina si vede applicata nell'ambito degli incidenti con apparecchi di sollevamento: prima tramite l'osservazione di alcuni eventi particolarmente rilevanti, poi attraverso l'analisi più attenta di un caso studio relativo al crollo di una gru a torre. Si pone l'accento sugli effetti che tali incidenti hanno provocato non solo sui lavoratori del cantiere, ma più in generale sulla totalità delle persone coinvolte.

A fronte di quanto emerso dall'osservazione di questi eventi, sono state analizzate la normativa e le linee guida esistenti in materia. Dall'analisi è risultato che le misure di sicurezza sui sollevamenti sono basate su disposizioni talvolta lacunose, quasi esclusivamente fondate sull'analisi del rischio. Tale condizione ha costituito il requisito di partenza per definire misure integrative alla normativa attuale in grado di limitare la magnitudo complessiva in caso di evento incidentale in fase di montaggio di una gru a torre. Le misure di prevenzione individuate sono state applicate ad alcuni casi studio, al fine di fornire degli schemi tipologici di applicazione costituenti la base di una linea guida sui sollevamenti.

Abstract | EN

Forensic Engineering is the professional practice that uses scientific knowledge as a tool to support judicial activity, reconstructing the dynamics of accidents and failures and determining their causes. In this thesis the methodological and investigative process steps are analysed, focusing on the main engineering tools and methods used by practitioners.

Subsequently, the discipline finds application in the context of accidents with lifting equipment: first through the observation of some particularly relevant events, then through a more accurate analysis of a case study related to the collapse of a tower crane. The emphasis is placed on the effects that these accidents have caused not only on construction site workers, but more generally on all the people involved.

Based on what emerged from the observation of these events, the existing regulations and guidelines on the matter have been examined. The analysis showed that the safety measures on lifting operations are grounded on provisions that are sometimes incomplete, almost exclusively based on risk analysis. This condition has constituted the starting requirement for defining supplementary measures to the current regulation capable of reducing the overall magnitude in the event of an accident during the assembly of a tower crane. The identified preventive measures have been applied to some case studies, in order to provide typological schemes constituting the basis of a guideline on lifting.

Sommario

1	Introduzione	1
2	L'ingegneria forense	5
2.1	La disciplina	5
2.1.1	L'ingegnere forense	8
2.2	Il processo metodologico	9
2.2.1	Orientamento.....	10
2.2.2	Raccolta dei dati.....	11
2.2.3	Generazione delle ipotesi.....	13
2.2.4	Verifica delle ipotesi.....	16
2.2.5	Presentazione dei risultati	17
2.2.6	Raccomandazioni.....	18
2.3	Gli strumenti di analisi.....	18
2.3.1	Metodi distruttivi	19
2.3.2	Metodi non distruttivi e semi distruttivi.....	21
2.3.3	Analisi geotecniche.....	24
2.3.4	Analisi strutturali	25
3	Incidenti con apparecchi di sollevamento.....	29
3.1	Panoramica.....	29
3.2	Casi storici.....	33
3.2.1	Crollo gru "Big Blue" a Milwaukee (USA, 1999).....	34
3.2.2	Crollo gru a Manhattan, New York (USA, 2008).....	38
3.2.3	Crollo gru a La Mecca (Arabia Saudita, 2015).....	43
3.2.4	Crollo gru a Trivolzio (Italia, 2022)	46
3.3	Caso studio: crollo gru in via Genova, Torino (Italia, 2021).....	50
3.3.1	Il contesto.....	50
3.3.2	L'incidente	52
3.3.3	Le conseguenze.....	58

4	Misure di sicurezza per il montaggio	61
4.1	Premessa	61
4.2	Fase di montaggio e successivo smontaggio	63
4.3	Fase di esercizio.....	69
4.3.1	Sicurezza dell'apparecchio	69
4.3.2	Sicurezza di utilizzo.....	73
4.4	Analisi della normativa e criticità individuate.....	79
4.5	Sviluppo delle misure integrative	86
4.5.1	Identificazione di un'area di cantiere a terra	86
4.5.2	Identificazione di un'area di sorvolo controllata.....	87
4.5.3	Identificazione di specifiche misure di coordinamento.....	90
4.6	Applicazione delle misure integrative	92
4.6.1	Primo caso studio: corso Luigi Einaudi.....	92
4.6.2	Secondo caso studio: via Maria Vittoria.....	99
4.6.3	Terzo caso studio: via Genova.....	102
4.6.4	Considerazioni	105
5	Conclusioni.....	109
	Riferimenti bibliografici	113
	Appendice A	121

Indice delle figure

Figura 1 - Settori dell'ingegneria legale [1]	6
Figura 2 - I sei step del <i>Delft approach</i> [8].....	10
Figura 3 - Fasi del ciclo vita di un sistema tecnico [8]	14
Figura 4 - Tree House of Failures [8]	14
Figura 5 - Fattori critici per la sicurezza strutturale [11]	16
Figura 6 - Confronto fra collasso reale e simulazioni AEM e FEM [20]	28
Figura 7 - Elementi di una gru a torre con rotazione alta [21].....	31
Figura 8 - Gru cingolata Lampson TransiLift III [24]	34
Figura 9 - Frames del crollo ripreso in video [25]	36
Figura 10 - Situazione a seguito del crollo [26].....	37
Figura 11 - Dettaglio del cedimento del perno fuso [24].....	38
Figura 12 - Gru autorampante Favelle Favco M440E [29].....	39
Figura 13 - Travi di collegamento gru-edificio [29].....	40
Figura 14 - Scatti della posizione finale della gru [29].....	41
Figura 15 - Posizione ideale ed effettiva delle fasce in poliestere [29]	42
Figura 16 - Gru cingolata Liebherr LR 11350 [32]	44
Figura 17 - Posizione finale della gru crollata [31]	45
Figura 18 - Gru a rotazione bassa Cattaneo CM 50S4 [34].....	46
Figura 19 - Gru crollata a terra	47
Figura 20 - Particolare del carro di base e zavorre	48
Figura 21 - Braccio della gru precipitato sul viale da pavimentare	48
Figura 22 - Particolare della punta del braccio	49
Figura 23 - Inquadramento del cantiere in via Genova [36]	51
Figura 24 - Perimetro dell'area di cantiere su via Genova [36]	52
Figura 25 - Gru a torre Soima SGT 85 [37].....	53
Figura 26 - Autogrù Liebherr LTM 1080/1 [38]	54
Figura 27 - Il crollo su via Genova [40].....	55

Figura 28 - Lo scatto di un drone su via Genova [41].....	56
Figura 29 - Dettaglio della gru a torre [39].....	56
Figura 30 - Dettaglio dell'autogrù [42].....	57
Figura 31 - I danni del crollo [42]	59
Figura 32 - Posizionamento autogrù e allestimento area di lavoro [45].....	64
Figura 33 - Carro di base in posizione con zavorre [45]	65
Figura 34 - Sollevamento di un elemento della torre [45].....	66
Figura 35 - Avvicinamento dell'elemento alla torre [45]	66
Figura 36 - Fissaggio dell'elemento alla torre [45].....	66
Figura 37 - Controbraccio posizionato con zavorre [45].....	68
Figura 38 - Montaggio a terra del braccio [45].....	68
Figura 39 - Installazione in quota del braccio e collegamento dei tiranti [45]	69
Figura 40 - Individuazione dei coni di decollo e atterraggio e aree di ostacolo [48]	73
Figura 41 - Franchi minimi gru nei confronti di ostacoli fissi [49].....	74
Figura 42 - Individuazione planimetrica delle aree di interferenza fra varie gru a torre.....	75
Figura 43 - Evidenziazione zone interdette [49].....	76
Figura 44 - Riduzione della portata delle brache in funzione dell'angolo di inclinazione [51].....	78
Figura 45 - Alcuni gesti convenzionali a confronto. Allegato XXXII a sinistra, ASME B30.3 a destra [46] [52].....	79
Figura 46 - Insufficiente segregazione dello spazio lavorativo e inadeguato metodo di recinzione (semplice nastro segnaletico biancorosso).....	81
Figura 47 - Possibilità di transito di persone estranee al cantiere in prossimità dell'area di carico/scarico materiali	81
Figura 48 - Montaggio a terra del braccio con assenza di recinzione e possibilità di transito di persone estranee al cantiere	82
Figura 49 - Sollevamento del braccio in prossimità di terzi, con mancata regolazione del transito pedonale	83

Figura 50 - Sollevamento e scarico di elementi della gru in prossimità di terzi, con mancata regolazione del transito pedonale	83
Figura 51 - Franchi di sicurezza per gru a torre di 30 metri	88
Figura 52 - Franchi di sicurezza proiettati a terra per gru a torre di 30 metri.....	88
Figura 53 - Franchi di sicurezza per gru a torre di 50 metri	89
Figura 54 - Franchi di sicurezza proiettati a terra per gru a torre di 50 metri.....	89
Figura 55 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su corso Einaudi	93
Figura 56 - Configurazione del cantiere su corso Einaudi.....	93
Figura 57 - Franchi di sicurezza per un modulo della torre (corso Einaudi)	95
Figura 58 - Franchi di sicurezza per il braccio (corso Einaudi).....	95
Figura 59 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su corso Mediterraneo	97
Figura 60 - Configurazione del cantiere su corso Mediterraneo.....	97
Figura 61 - Franchi di sicurezza per un modulo della torre (corso Mediterraneo)	98
Figura 62 - Franchi di sicurezza per il braccio (corso Mediterraneo).....	98
Figura 63 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su via Maria Vittoria	100
Figura 64 - Configurazione del cantiere su via Maria Vittoria.....	100
Figura 65 - Franchi di sicurezza per un modulo della torre (via Maria Vittoria)	101
Figura 66 - Franchi di sicurezza per il braccio (via Maria Vittoria).....	102
Figura 67 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su via Genova ..	103
Figura 68 - Configurazione del cantiere su via Genova	104
Figura 69 - Franchi di sicurezza per un modulo della torre (via Genova).....	104
Figura 70 - Franchi di sicurezza per il braccio (via Genova).....	105
Figura 71 - Franchi di sicurezza per il braccio sovrapposti a fotografia da drone [41]	107

Indice delle Tabelle

Tabella 1 - Modalità di guasto e analisi delle cause per incidenti con apparecchi di sollevamento [22].....	32
Tabella 2 - Crolli di gru edili fisse in Italia dal 2018 al 2022	121

1

Introduzione

Il settore delle costruzioni è da sempre annoverato come uno dei più rischiosi in materia di salute e sicurezza sul lavoro, data la natura delle attività svolte. Lo svolgimento delle mansioni edili, oltre alla richiesta di sforzo fisico, coinvolge l'impiego di strumenti e macchinari, i quali comportano diversi rischi insiti nel loro utilizzo. Gli incidenti generati dalle attrezzature non implicano necessariamente il verificarsi di infortuni, ma possono spesso comportare danni materiali, economici e di reputazione delle imprese. Qualunque siano le conseguenze le cause di tali eventi possono essere di diversa natura e spesso difficoltose da individuare: l'ingegneria forense ha il compito di identificarle, ricostruendo la dinamica degli incidenti attraverso l'impiego della conoscenza tecnico-scientifica, al fine di

dirimere le conseguenze di legge generate da questi eventi e prevenire incidenti futuri.

Nella presente tesi tratterò l'aspetto più tecnico dell'ingegneria forense, soffermandomi sul processo investigativo e metodologico e sugli strumenti ingegneristici utilizzati dagli esperti per verificare le ipotesi di guasto e incidente nel campo dell'ingegneria edile, civile e strutturale. Riguardo il metodo investigativo verrà evidenziata l'assenza di univocità, in quanto generalmente ogni professionista sceglie quello più funzionale al caso specifico. Tuttavia, prenderò come esempio un approccio che tenta di essere quanto più completo possibile, da me studiato ed applicato durante il mio periodo di studio all'Università tecnica di Delft, nei Paesi Bassi, nel corso *forensic structural engineering*. Verrà dunque omessa la trattazione relativa al lato forense della disciplina, in quanto facilmente rintracciabile nei contenuti propri dell'ordinamento giuridico e differente per ogni nazione.

L'approfondimento tematico sull'ingegneria forense risulta essere la necessaria introduzione al capitolo successivo, riguardante lo studio di incidenti con apparecchi di sollevamento. La scelta di affrontare questa particolare categoria di incidente è funzionale all'analisi di uno specifico caso studio, ovvero il crollo della gru di via Genova a Torino avvenuto nel 2021: un evento recente, di particolare rilevanza su scala nazionale per le sue gravi conseguenze ed a me vicino in quanto avvenuto nella medesima città dei miei studi. Prima di affrontare questo caso, esaminerò altri incidenti con apparecchi di sollevamento particolarmente rilevanti per i loro effetti in termini di danni a cose e persone.

L'analisi del caso studio di via Genova mi porterà a ragionare sulle misure di sicurezza adottate durante la fase di montaggio delle gru a torre e durante la fase di esercizio degli apparecchi di sollevamento. Tramite un'analisi della normativa e delle linee guida presenti in materia di sollevamenti, evidenzierò la presenza di disposizioni specifiche di questo ambito talvolta lacunose se non assenti, quasi

esclusivamente basate sull'analisi del rischio. Svilupperò quindi delle misure integrative per il montaggio delle gru a torre, focalizzandomi sul rischio di caduta dei carichi dall'alto durante la fase di sollevamento. Tali precauzioni, in grado di limitare la magnitudo degli effetti in caso di incidente, saranno elaborate sulla base di specifiche valutazioni. Infine, le misure saranno applicate a tre casi studio di montaggio, in modo tale da fornire degli schemi tipologici di applicazione che possano costituire la base di una futura linea guida sui sollevamenti.

2

L'ingegneria forense

2.1 La disciplina

L'ingegneria legale è la materia che fornisce risposte a problemi giuridicamente rilevanti mediante l'impiego della conoscenza tecnico-scientifica. Essa comprende, in modo distinto, l'*ingegneria giuridica* e l'*ingegneria forense* [1], come rappresentato in Figura 1. Questa distinzione, proposta da alcuni autori in letteratura, fornisce una panoramica sui diversi legami che sussistono fra la sfera ingegneristica e quella legale.



Figura 1 - Settori dell'ingegneria legale [1]

L'ingegneria giuridica ha lo scopo di contribuire alla creazione e all'aggiornamento delle leggi che regolano il panorama scientifico e ingegneristico. In questo campo ricadono le norme tecniche, ovvero quelle specifiche tecniche a carattere non obbligatorio che mirano a razionalizzare certe procedure ed incrementare la validità funzionale ed economica di un prodotto. Queste norme, talvolta elaborate come linee guida orientate alla “best practice”, sono formulate da organismi nazionali o internazionali (e.g. UNI, CEN, ISO) e possono prendere la nomenclatura di norma, specifica o rapporto tecnico, a seconda dei contenuti peculiari. Quando le specifiche diventano disposizioni regolamentari si parla di regole tecniche, emanate dalla Pubblica Amministrazione; queste sono a carattere obbligatorio e puntano a mitigare i rischi che derivano dal prodotto, materiale o procedura in esame. L'ingegneria giuridica include anche la standardizzazione (o normalizzazione) che, attraverso tabelle di unificazione, mira alla definizione di caratteristiche di materiali e componenti riconosciute ed accettate nel mondo ingegneristico. Possiamo ancora comprendere in questo ambito i certificati, le omologazioni, le dichiarazioni di conformità di un prodotto e la metrologia legale.

L'ingegneria forense, oggetto di questo capitolo, ha invece carattere applicativo, essendo la pratica professionale che si avvale della conoscenza scientifica come strumento a supporto dell'attività giudiziaria. Lo scopo della disciplina è quello di ricostruire la dinamica di un incidente o di un guasto e

determinarne le cause, utilizzando i metodi e i principi propri dell'ingegneria civile, meccanica, dei materiali, chimica ed elettrica [2]. I risultati ottenuti dalle indagini, oltre ad essere essenziali per il procedimento giudiziario, sono spesso utili per prevenire incidenti futuri. L'ingegneria forense può quindi essere applicata nei processi civili, penali ed amministrativi, ma anche nei momenti che preludono agli stessi o ancora in ambito extragiudiziale. Essa trova il suo campo d'applicazione sia nel mondo delle costruzioni (cedimenti, rotture e collassi) sia in quello industriale dei macchinari, impianti, strumenti e dei loro componenti; anche gli incidenti stradali possono essere oggetto di investigazioni forensi. Le cause scatenanti i guasti includono sempre un fattore umano; questi eventi non sono *acts of god*, ovvero situazioni imprevedibili e fuori dal controllo degli uomini, ma in misura variabile sono frutto dei loro errori. L'uomo, purtroppo, può essere coinvolto anche negli effetti degli incidenti, rischiando infortuni o la vita.

Le indagini statunitensi svolte sui disastri ferroviari del Dee Bridge e Tay Bridge, risalenti rispettivamente al 1847 e 1879, possono essere considerati i primi esempi di ingegneria forense [3]. A seguito di storici incidenti come questi, sono state inventate tecniche quali le prove di trazione o analisi frattografiche sui metalli per la conduzione delle indagini. Da quel momento la disciplina ha iniziato a svilupparsi nel tempo, unitamente all'evoluzione degli strumenti e dei metodi di analisi, andando a costituire una pratica professionale globalmente diffusa. Tuttavia, la sua delineazione fra le specializzazioni tecniche è recente; in Italia e nell'Europa continentale essa può essere fatta coincidere con l'istituzione del Master universitario di II livello in Ingegneria Forense da parte dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, il 6 agosto 2008 [4]. Ad oggi sono presenti varie opportunità di master, corsi e accademie in tutta Italia, che permettono di acquisire le competenze necessarie a svolgere al meglio questa professione.

2.1.1 L'ingegnere forense

L'ingegnere forense può assumere diversi ruoli, in relazione ai soggetti a cui fornisce consulenza tecnica. Egli può servire l'Autorità Giudiziaria o le Parti, assumendo nel primo caso il ruolo di Consulente Tecnico d'Ufficio (CTU) del magistrato civile o, se in campo penale, di consulente della magistratura inquirente o perito di quella giudicante. Nel secondo caso, egli assume il ruolo di Consulente Tecnico di Parte (CTP) per soggetti pubblici o privati. Inoltre, il professionista può anche operare in campo extragiudiziale come consulente nelle procedure atte a prevenire il contenzioso giudiziario [5]. L'ingegnere forense fornisce la sua competenza tecnica come strumento a supporto dell'attività di valutazione del giudice, senza mirare al suo convincimento in ordine della verità – nonostante la perizia tecnica sia il documento che condiziona maggiormente il processo. Inoltre, egli fornisce un supporto strategico per l'avvocato della difesa, fornendo dati tecnici spesso determinanti [6].

L'ingegnere forense applicherà le sue conoscenze specialistiche, ma anche quelle scientifiche di base, per dirimere le controversie legali; la varietà di casi che può trovarsi ad affrontare richiederanno dunque un certo livello di preparazione multidisciplinare. Per il singolo professionista è tuttavia impossibile padroneggiare la moltitudine di competenze tecniche richieste: in caso di necessità, egli dovrà appellarsi ad altre figure specializzate. La conoscenza interdisciplinare può essere più facilmente raggiunta dagli studi di ingegneria, che possono occuparsi di casi forensi impiegando più professionisti.

Per svolgere la sua attività tecnico-giudiziaria, l'esperto deve possedere altre qualità oltre a quelle specialistiche. Vinardi sostiene che l'ingegnere forense debba saper coniugare tre competenze fondamentali [7]:

- La *competenza tecnico-scientifica*, appena trattata, derivante dal percorso di studi e dalla pratica lavorativa;

- La *competenza procedurale-giudiziaria*, acquisita in corsi specializzati e dall'affiancamento a colleghi più esperti. Questo è il tassello di conoscenza che manca ai professionisti provenienti da corsi di studio ingegneristici, i quali non comprendono insegnamenti forensi.
- La *competenza comunicativo-relazionale*, anche in questo caso appresa in corsi e seminari per la parte generale, mentre per la parte specialistica questa è frutto dell'esperienza. Questa competenza è cruciale per trasmettere limpidamente il proprio pensiero alle figure coinvolte nel procedimento giudiziario, le quali avranno formazioni e abilità differenti: perciò il linguaggio da usare dovrà essere chiaro ed esplicito, tecnico e inequivocabile ed allo stesso tempo comprensibile da chiunque.

Infine, anche il personal branding può svolgere un ruolo chiave nel migliorare la percezione delle competenze del professionista, in questo caso agli occhi del mercato. Questa strategia consente di porsi come un professionista autorevole e credibile ai potenziali clienti applicando le tecniche e strategie di comunicazione dei grandi marchi aziendali.

2.2 Il processo metodologico

Un ingegnere forense, durante il suo percorso professionale, si troverà a dover risolvere casi molto eterogenei fra loro, dal crollo di una struttura al malfunzionamento di un macchinario, dalla flessione inattesa di una trave al deterioramento precoce dei materiali di un edificio. Data la vastità delle materie che un singolo caso può coinvolgere, è cruciale l'applicazione di un metodo di indagine strutturato, che permetta all'ingegnere forense di analizzare ogni aspetto in gioco, producendo un'analisi integrale ed esaustiva. In letteratura scientifica sono presenti diversi approcci sulla metodologia forense, ognuno organizzato su vari step consecutivi o ciclici a cui l'ingegnere fa riferimento. Terwel, Schuurman e Loeve

hanno raccolto ed incrociato nel loro *Delft approach* i passaggi salienti elaborati da diversi autori, creando un approccio investigativo quanto più esaustivo [8]. Il loro studio fa riferimento all'ingegneria strutturale forense, ma gli step sono applicabili anche alle altre discipline ingegneristiche. Le fasi principali sono sei, indicate in Figura 2: orientamento, raccolta dati, generazione delle ipotesi, verifica delle ipotesi, presentazione dei risultati e raccomandazioni.



Figura 2 - I sei step del *Delft approach* [8]

Come si evince dalla figura, il secondo e il terzo step sono iterabili, così come il terzo e il quarto. Nei paragrafi successivi verranno descritte le diverse fasi di un'indagine forense utilizzando la nomenclatura di questo approccio.

2.2.1 Orientamento

La fase di avviamento include la definizione degli obiettivi e dello scopo delle indagini, la strategia da seguire e l'individuazione di tutte le figure possibilmente coinvolte nel caso forense. Il Codice deontologico nazionale impone all'ingegnere l'accettazione degli incarichi per i quali predispone di "adeguata preparazione e competenza". Pertanto, il professionista forense – o lo studio di ingegneria – deve porsi alcune domande prima di affrontare un caso, in modo da capire se le

competenze da egli possedute sono necessarie per affrontare il caso e se vi siano conflitti di interesse. Ratay fornisce alcuni esempi di tali quesiti critici [9]:

- *“Sono il giusto esperto per questo caso?”*
- *“Ho la credibilità necessaria?”*
- *“Ho le risorse necessarie?”*
- *“Il compenso, il cliente e l’ubicazione del caso sono adeguati?”*

Sostanzialmente, l'ingegnere o lo studio deve sentirsi a proprio agio con tutti gli aspetti del caso prima di accettare l'incarico.

2.2.2 Raccolta dei dati

In questa seconda fase ha inizio il processo investigativo vero e proprio. In prima battuta l'ingegnere svolge un sopralluogo in sito, analizzando visivamente il tipo di incidente e l'entità del danno, documentando l'accaduto con foto e video. Nei casi più complessi, tecnologie come droni, laser scanner 3D e topografia classica tornano utili per mappare la “scena criminis” – la scelta di uno fra questi metodi è indirizzata dalla precisione richiesta e dalla velocità degli stessi. Per la maggior parte dei casi di ingegneria forense, l'elevata accuratezza della topografia è eccessiva, e la lentezza del metodo spinge a adottare quasi sempre i più moderni droni e laser scanner. Questa documentazione può venir raccolta dalle forze dell'ordine o dai vigili del fuoco, anche facendo uso di mezzi e apparecchiature speciali per raggiungere ogni punto dell'area. È importante menzionare che in questa fase il sito dell'incidente deve rimanere il più intatto possibile, ovvero nulla deve inquinare la scena, la quale dovrà essere adeguatamente delimitata e protetta. Le uniche cause di disturbo accettate sono quelle derivanti dalle operazioni di soccorso, tempestivamente necessarie. In una fase più avanzata delle indagini, verranno prelevati i campioni di materiale necessari per le analisi di laboratorio.

L'attenta osservazione dello stato dei fatti è importante per ipotizzare i meccanismi di rottura o di guasto, in quanto gli indizi investigativi risiedono nei dettagli, che non possono essere persi di vista. Anche le informazioni raccolte intervistando i testimoni visivi sono tasselli importanti per decifrare la dinamica dell'incidente: nei primi momenti a seguito dell'evento si dovranno individuare le persone che possono aver assistito alla scena ed interrogarle. Allo stesso modo le interviste alle diverse figure coinvolte nel caso, di ogni ruolo e grado di responsabilità, saranno step necessari del processo investigativo.

Un altro importante lato della raccolta dati è la ricerca documentale; il professionista dovrà collezionare disegni, progetti, permessi, piani di sicurezza, manuali, registri di dati ed in generale tutti i documenti rilevanti per il caso. Foto e video antecedenti al guasto possono essere di cruciale importanza: videocamere di sorveglianza e persone terze possono aver inquadrato l'oggetto di studio (anche strumenti come Google Maps possono rivelarsi proficui). Per tutti quei documenti digitali presenti su dispositivi elettronici è necessario fare copie dei files per evitare di trattenere i devices per lungo tempo – in questo modo non si crea disagio e danno economico alle persone coinvolte. Anche la ricerca storica è un metodo importante: ogni caso di ingegneria forense è certamente unico, ma un'indagine su casi simili a quello analizzato può fornire indicazioni sulla possibile causa, o indirizzare l'ingegnere verso un metodo d'analisi specifico.

In conclusione, è doveroso citare l'importanza del rilevare la scena nel modo più preciso ed accurato possibile, poiché una volta ripulita questa non esisterà più e molte delle informazioni in essa contenute saranno perse per sempre. A ciò si aggiunge la necessità di svolgere i rilievi rapidamente: il sito dell'incidente, nel periodo in cui è sotto sequestro, risulterà inaccessibile. Se questo giace su suolo pubblico, può recare un disturbo notevole alla popolazione, causando disagi e disservizi; se in proprietà privata, può impattare negativamente la produzione dell'azienda, danneggiandola economicamente. A questo si aggiunge il sequestro

di macchinari, mezzi e materiali coinvolti nell'incidente: così come menzionato precedentemente per i dispositivi elettronici, il sequestro di beni per le analisi forensi può causare notevoli disagi. Pertanto, esso non dovrebbe mai protrarsi a lungo nel tempo; ad esempio, nel caso di apparecchiature edili da centinaia di migliaia di euro, l'impatto economico provocato dal sequestro delle stesse per svariati mesi può infliggere duri colpi al bilancio delle imprese.

2.2.3 Generazione delle ipotesi

In questa fase il professionista si occupa di stilare la lista delle possibili cause dell'incidente. Per fare un'analisi quanto più completa egli può affidarsi ad alcune metodologie, come l'*analisi dei modi e degli effetti dei guasti (FMEA, Failure Mode and Effect Analysis)*, o l'*analisi dell'albero dei guasti (FTA, Fault Tree Analysis)*, che sono approcci sistematici e strutturati [10]. Questi consentono di analizzare le modalità di guasto o difetto di un prodotto o di un processo ed analizzarne le cause. Usati principalmente nei sistemi di gestione della qualità e ingegneria della sicurezza, possono essere impiegati in modo semplificato anche nelle investigazioni forensi, individuando tutti i possibili modi di guasto e per ognuno tutte le cause e gli effetti possibili. Risultano però essere metodi dispendiosi in termini di tempo, perché richiedono la presa in considerazione di tutti i guasti, e complessi, poiché includono la definizione di probabilità di accadimento, gravità dell'effetto e rilevabilità del guasto – fattori non strettamente legati alle investigazioni forensi.

Esistono metodi meno conosciuti in letteratura, ma specifici per le analisi forensi; uno di questi è quello proposto nel *Delft approach*. Questo prende in considerazione le diverse fasi del ciclo vita di un sistema tecnico, che sono quelle rappresentate in Figura 3. Esse possono essere tradotte e semplificate per il settore civile-edile, individuando le fasi di progetto, costruzione, uso e manutenzione, demolizione o recupero. Per ognuna delle fasi rilevanti da analizzare, lo studio olandese si serve di un diagramma ad albero (*Tree House of Failures*, Figura 4)

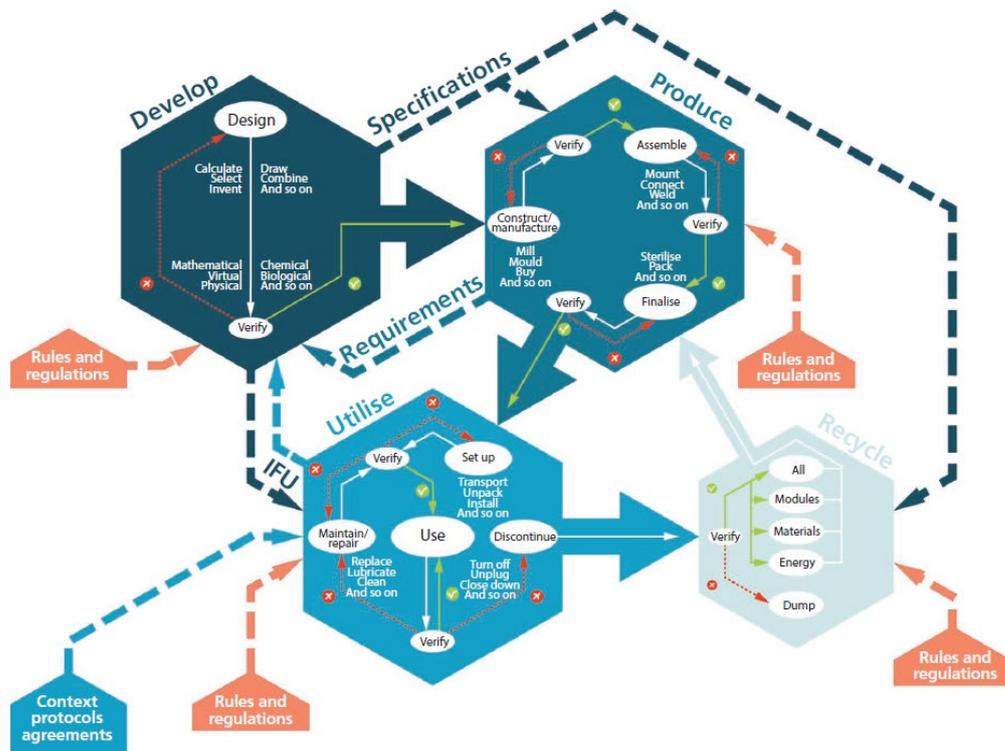


Figura 3 - Fasi del ciclo vita di un sistema tecnico [8]

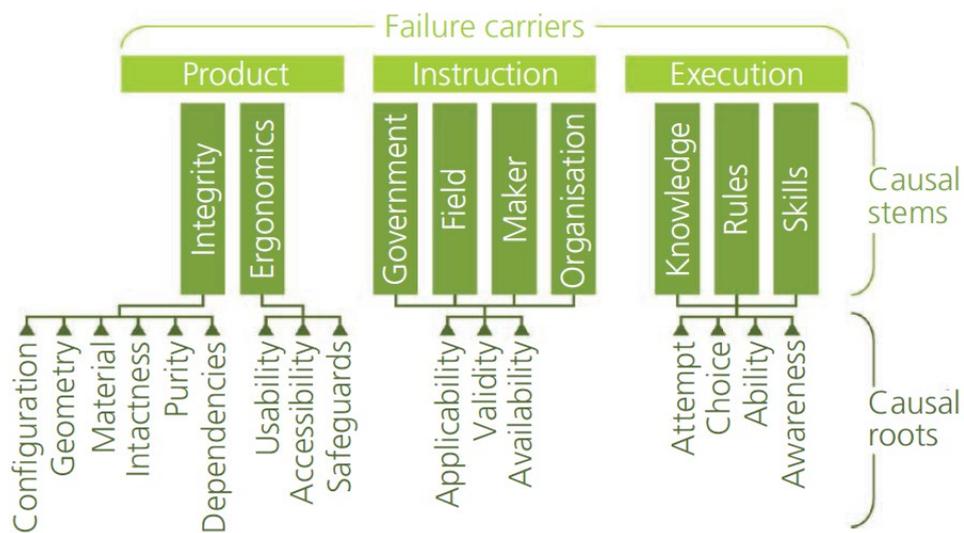


Figura 4 - Tree House of Failures [8]

che permette di individuare gli “steli” e le “radici” delle possibili cause. Le classi di guasto vengono divise fra: cause relative al prodotto, quelle relative alle indicazioni e procedimenti da seguire e cause relative all'esecuzione. Per ogni radice applicabile al caso, l'ingegnere forense dovrà pensare a tutte le possibili cause che possono aver scatenato l'incidente o che possano aver contribuito allo stesso. Questo processo a step può essere iterato più e più volte, andando a rianalizzare le fasi del ciclo vita necessarie.

Chiaramente il professionista può scegliere di utilizzare la metodologia che ad egli risulta più efficace, senza doversi necessariamente servire di metodi predefiniti. Il vantaggio di usare un metodo sistematico e strutturato risiede nel produrre un'investigazione oggettiva, ripetibile, verificabile, completa e corretta. Questi cinque elementi vanno a stabilire un alto grado di affidabilità del lavoro svolto.

Terwel, in una sua pubblicazione sui fattori critici per la sicurezza strutturale sviluppata insieme a Jansen, ha provato ad individuare quali di questi fossero i più rilevanti tramite un questionario proposto a diverse figure del settore delle costruzioni [11]. Vengono distinti in tre livelli: un livello *macro*, contenente quei fattori esterni, di contorno, difficilmente influenzabili dai singoli attori del processo di costruzione; un livello *meso*, che include cause relative al progetto e alle ditte involte; un livello *micro*, contenente i fattori riconducibili al comportamento umano. In Figura 5 possiamo visualizzare questi livelli, così come i singoli fattori in essi contenuti. Questo framework teorico può essere d'aiuto all'ingegnere per marcare tutti gli aspetti del progetto e della costruzione di un'opera durante il processo di generazione delle ipotesi.

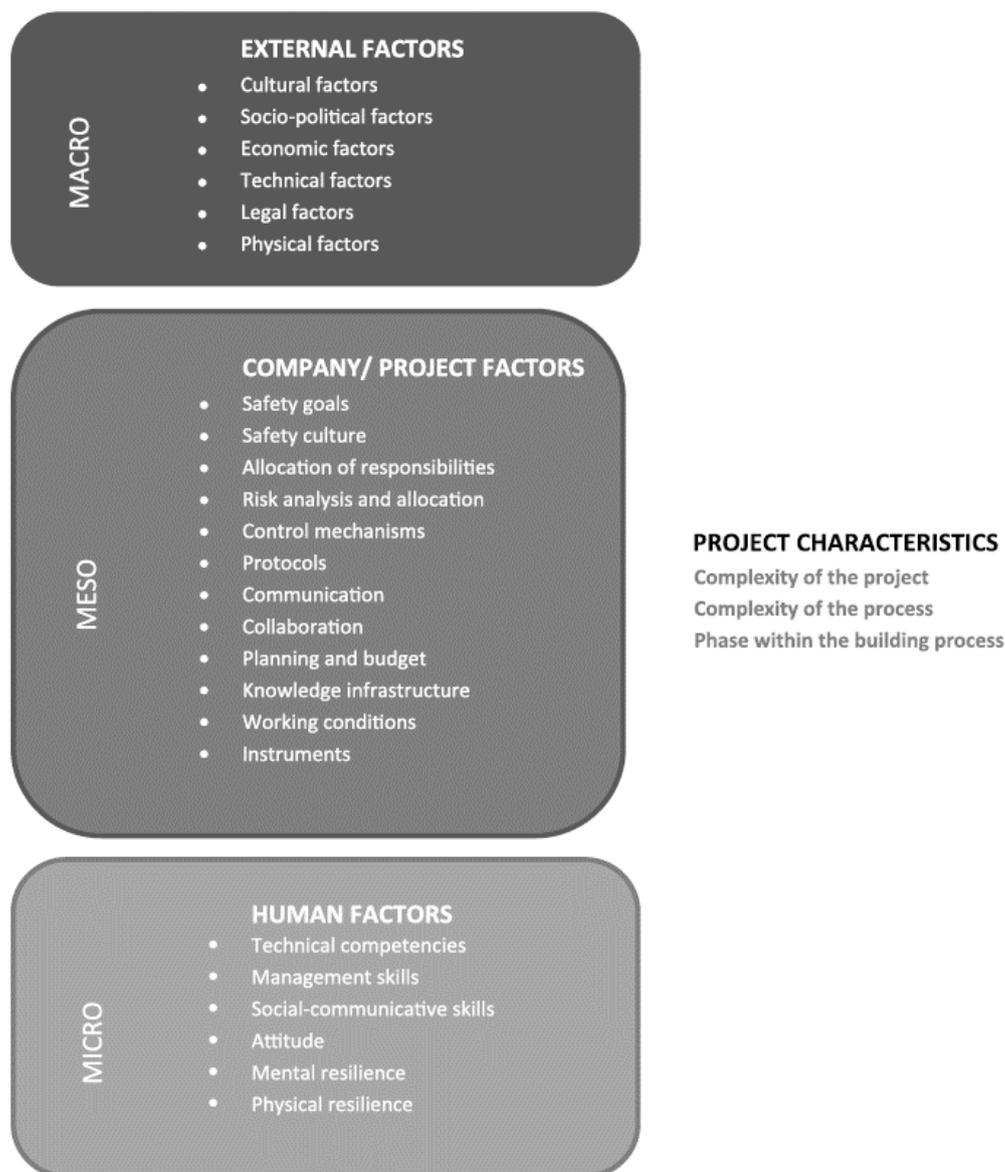


Figura 5 - Fattori critici per la sicurezza strutturale [11]

2.2.4 Verifica delle ipotesi

Le ipotesi elencate nella fase precedente vengono ora verificate e testate con ogni mezzo disponibile. L'ingegnere dovrà fare dei ragionamenti sull'effettiva probabilità che la causa in esame possa essere stata quella – o una di quelle – scatenante l'incidente, facendo uso del suo pensiero critico e delle sue competenze

tecniche e scientifiche. A supporto del pensiero del professionista, entrano in gioco i test sui materiali, sulle strutture, sul terreno e i diversi calcoli, analisi e simulazioni eseguibili; i principali strumenti utilizzabili dal professionista sono descritti nel capitolo 2.3. Nel caso in cui l'ingegnere non ottenga le risposte desiderate, può essere necessario raccogliere ulteriori dati o formulare nuove ipotesi.

2.2.5 Presentazione dei risultati

L'ingegnere forense redige la relazione di consulenza tecnica, in cui ripercorre tutti gli step d'investigazione, le metodologie seguite per la generazione e verifica delle ipotesi e le conclusioni sul caso. Questo report, più consuetamente chiamato perizia, è l'elemento che contribuisce in parte maggiore all'esito del processo; ritorna quindi importante citare l'importanza di una comunicazione efficace. L'esperto sarà tenuto ad esporre i suoi risultati in modo convincente e comprensibile, senza contraddirsi, per non lasciare spazio a contestazioni [7]. Una struttura del testo chiara ed organizzata sarà fondamentale, così come il giusto bilanciamento fra un'esposizione ricca di dettagli tecnici e la necessaria sintesi ed interpretazione degli stessi. Inoltre, sarà importante l'impiego di immagini, tabelle, grafici e altri supporti visivi al fine di esporre i contenuti in modo inequivocabile – come sostenuto da Vinardi.

Oltre alla presentazione scritta, il perito sarà chiamato a difendere la propria tesi in tribunale davanti al giudice, il quale punterà ad individuarne punti deboli e contraddizioni. A tal fine, nelle corti di giustizia viene impiegato il sistema processuale del controesame, o cross-examination, che ha l'obiettivo di smontare le posizioni e le argomentazioni delle parti, ponendo una serie di domande chiuse, chiare e decise. Il consulente tecnico dovrà esporre i suoi concetti in modo rigoroso e con un linguaggio comprensibile, senza eccessivi tecnicismi, sfruttando il potere della comunicazione paraverbale – un ausilio al professionista assente nella produzione scritta.

2.2.6 Raccomandazioni

Nella fase conclusiva di ogni indagine forense si dovrebbero delineare delle raccomandazioni di prevenzione, al fine di evitare incidenti simili in futuro. In alcuni casi le conclusioni del report sono sufficienti a comprendere il problema ed evitarlo; in altri, la definizione di linee guida preventive potrebbero essere utili per denunciare il fatto ed aumentarne la consapevolezza nel panorama ingegneristico. In molti casi si tende a non pubblicare i risultati delle investigazioni, per proteggere la reputazione dei soggetti responsabili – questo, tuttavia, è controproducente per la prevenzione degli incidenti. Vi sono tuttavia eccezioni, rappresentate da divulgazioni sempre più presenti nel panorama scientifico che raccolgono casi di ingegneria forense per documentarli e denunciarne le cause. Un esempio è rappresentato dal journal *Engineering Failure Analysis*, che raggruppa nei suoi volumi analisi critiche su incidenti e guasti e paper di ricerca sugli stessi, relativamente a casi studio, simulazioni numeriche e test di laboratorio [12].

2.3 Gli strumenti di analisi

Dopo aver generato diverse ipotesi di cause scatenanti l'incidente o il guasto, l'ingegnere ha a disposizione una varietà di strumenti di analisi per verificare quali di queste siano quelle probabili. Più metodi possono competere allo sviluppo delle indagini; il professionista sarà chiamato a sceglierne la combinazione più opportuna, a seconda del caso analizzato. Dinamiche dell'incidente, tipologia dei materiali coinvolti e possibilità di prelevare campioni sono solo alcuni dei fattori chiave per la definizione dei metodi da impiegare.

Si possono dividere gli strumenti di analisi in diverse categorie; nei paragrafi seguenti verranno analizzati quelli più rilevanti per i settori dell'ingegneria civile, edile e strutturale. In primis si considerano le prove sui materiali e sulle strutture, che possono scindersi fra metodi distruttivi e non-distruttivi e semi-distruttivi. Sono

tutte regolate da standard nazionali o internazionali, che indicano le procedure corrette da impiegare, al fine di giungere a risultati validi e confrontabili. Si vedranno poi le prove geotecniche, nel caso in cui il terreno possa aver influenzato le dinamiche dell'incidente. Infine, si analizzeranno i metodi di analisi strutturale utili a determinare le distribuzioni di sollecitazioni, spostamenti e meccanismi di collasso.

2.3.1 Metodi distruttivi

Le prove distruttive vengono definite tali in quanto recano un disturbo alla struttura in esame. Generalmente esse richiedono il prelievo di campioni, mediante carotaggio o taglio, destinati ad analisi di laboratorio. I metodi distruttivi sono spesso diretti, in quanto le grandezze da rilevare vengono ricavate senza ricorrere a curve di correlazione. Di seguito verranno menzionati alcune delle prove distruttive più utilizzate.

Prove meccaniche

A seguito del prelievo di campioni da una struttura, si possono effettuare prove meccaniche con i macchinari di laboratorio. Per il calcestruzzo ci si riferisce alla *prova di compressione* su provini cilindrici. Per le armature e per le strutture metalliche si citano le *prove di trazione*, *prove di piegamento*, *prove di resilienza meccanica* e *prove di durezza* con micro-durometro (quest'ultima eseguibile anche in sito in modo non-distruttivo, con l'adozione di uno strumento portatile). Per il legno, i campioni estratti possono essere analizzati per eseguire *prove frattometriche* su provini cilindrici, o per identificare la specie legnosa o la presenza di attacchi di funghi e di insetti. Infine, anche le murature possono essere oggetto di carotaggi; i campioni sono interessati da *prove meccaniche*, ma anche da stime di massa volumica, gelività o permeabilità [13]. Altri test distruttivi sulle murature, eseguibili in sito, includono le *prove a taglio*, o shove test, per verificare la resistenza a taglio del giunto in malta, così come le *prove a compressione*

diagonale, eseguita su un pannello di muratura per determinare la resistenza a trazione diagonale e quella a taglio. Un'altra prova eseguibile è quella con *martinetti piatti*, singolo o doppio; con la prima si determina lo stato di sollecitazione a compressione, con la seconda la resistenza a rottura e modulo elastico.

Grazie a questi test si determinano i parametri di resistenza meccanica dei materiali al momento dell'incidente, in modo da essere impiegati in successive analisi strutturali. Questi parametri residui possono essere confrontati con quelli previsti da progetto, per valutarne il degrado nel tempo.

Analisi petrografiche di laboratorio

La petrografia riguarda lo studio delle rocce come aggregati di minerali. In riferimento all'ingegneria forense, questa disciplina può essere utile per indagare la struttura microscopica dei materiali da costruzione, giudicandone la qualità e individuando possibili difetti o problematiche. Il materiale che si presta meglio a queste indagini è il calcestruzzo, per il quale si può valutare, attraverso *microscopia ottica ed elettronica*, la dimensione e forma degli aggregati, la distribuzione della matrice cementizia, l'indice dei vuoti, il contenuto d'acqua o la presenza di difetti superficiali e crepe [14]. Per fare ciò, sezioni di spessore inferiore a 0,05 mm vengono prodotte da provini estratti in sito. Altri metodi che ricadono nel campo delle analisi petrografiche utilizzano *diffrazione a raggi X* su materiale polverizzato, *analisi chimiche* e *spettroscopia di assorbimento*, solo per citarne alcuni. I risultati di queste indagini aiutano a stabilire la qualità del materiale ed eventuali processi di deterioramento (attacchi solfatici, reazioni alcali-aggregati, carbonatazione, etc.), e quindi individuare le azioni più opportune da compiere per proteggere la struttura.

Analisi chimico-fisiche

In questa categoria si può menzionare il *test colorimetrico con fenolftaleina*, usato per stabilire la profondità e il grado del processo di carbonatazione in atto nel calcestruzzo; deve essere eseguito sulle carote appena estratte, direttamente in sito. Il processo di carbonatazione inficia la protezione dei ferri di armatura, rendendoli più vulnerabili all'ossidazione. Per le murature si può effettuare una *prova chimica* su provini di malta, per determinarne i principali elementi costituenti.

2.3.2 Metodi non distruttivi e semi distruttivi

Al contrario dei precedenti, i metodi non distruttivi non apportano disturbi alla struttura, dato che non richiedono il prelievo di campioni. Nel caso questi provochino piccoli danni superficiali o estetici essi vengono definiti semi distruttivi. In entrambi i casi, le misure rilevate in sito devono essere spesso convertite con curve di correlazione per ottenere le grandezze d'interesse – vengono in tal caso definiti metodi indiretti [15].

Prove meccaniche

Tra le prove di carattere meccanico, le *prove sclerometriche* sono fra le più utilizzate tra i metodi non distruttivi, per merito della loro velocità e semplicità. Eseguite con uno strumento chiamato sclerometro, le prove restituiscono un indice di rimbalzo di una massa battente azionata da una molla, il quale viene elaborato con una curva di correlazione per ottenere un valore di resistenza meccanica del materiale – generalmente calcestruzzo, ma anche muratura e rocce.

L'ingegnere forense può anche fare uso di *prove penetrometriche* per la determinazione della resistenza del calcestruzzo; lo strumento usato in questo caso è la pistola di Windsor, che grazie ad una spinta balistica infigge una sonda d'acciaio nel materiale. La medesima pistola può essere impiegata per prove penetrometriche su malta, mentre per il legno si utilizza uno sclerometro a battuta

dotato di un ago. In modo simile si possono eseguire le *prove resistografiche*, mediante un resistografo con punta penetrante, con le quali si individuano le aree deteriorate del legno, specialmente quelle non ispezionabili ad occhio nudo. Le variazioni di densità del materiale individuano le zone sane e quelle decomposte.

Sul calcestruzzo nello specifico, si possono effettuare prove estrazione come le *prove di pull-out* e *di pull-off*, utili a stabilire la resistenza del materiale nel primo caso e il grado di adesione degli strati di finitura nel secondo. Il metodo pull-out impiega un tassello in acciaio, inserito e poi estratto misurando la forza di estrazione del cono di materiale; il pull-off, invece, richiede l'applicazione di un carico crescente su una porzione di superficie, fino a rottura dello strato.

Prove ultrasoniche

Le *prove ultrasoniche* stimano la resistenza meccanica del materiale mediante la misura della velocità ultrasonica di un treno di onde, generato da un trasduttore elettroacustico, che attraversa lo spessore del materiale. Nelle analisi sul calcestruzzo, queste prove vengono spesso abbinate alle prove sclerometriche per ottenere risultati di resistenza più accurati, andando a costituire il metodo SONREB (SONic REBound).

Le indagini con ultrasuoni possono essere applicate anche agli altri materiali: per gli elementi metallici, vengono usate per l'ispezione di saldature o componenti meccanici, oppure per la misura dello spessore di elementi interessati da corrosione. Se effettuate sulla muratura, oltre alle caratteristiche meccaniche si possono valutare le caratteristiche fisiche a seguito di interventi di consolidamento. Per il legno, infine, l'analisi con gli ultrasuoni permette di esaminare l'omogeneità dell'elemento o la sua densità.

Nel caso in cui si sfruttino frequenze minori, si parla di *prove soniche*; queste sono adatte ad elementi di grande spessore o molto eterogenei.

Prove elettromagnetiche

Fra queste indagini troviamo le *prove pacometriche*; esse sfruttano il pacometro, strumento basato sul principio dell'induzione magnetica, con il quale si riescono a rilevare nel calcestruzzo armato la posizione delle armature, il passo delle staffe o la presenza di elementi metallici in diversi materiali. Inoltre, queste prove sono necessarie prima di eseguire carotaggi o prove di pull-out che possono essere ostacolate o influenzate dalla presenza di armature.

Per i metalli si citano le *prove magnetoscopiche*, questi sono utilizzate per rilevare difetti superficiali e discontinuità. Si basano sulla proprietà di alcuni materiali di lasciarsi magnetizzare e di trasmettere il flusso magnetico: nelle zone di difetto si ha un addensamento della polvere magnetica, in corrispondenza del flusso disperso.

La *prova di corrosione* delle barre di armatura richiede invece la misura della differenza di potenziale elettrico fra due poli, rappresentati dal metallo dell'armatura e dal calcestruzzo. La mappatura di questo parametro viene poi correlata con il grado di corrosione. In modo complementare, spesso si associa anche la misura della resistività.

Infine, il *Ground Penetrating Radar* (GPR, o semplicemente georadar) costituisce un metodo di indagine non invasivo che si basa sul riflesso delle onde elettromagnetiche per individuare discontinuità nei materiali. Risulta utile per identificare fratture, cavità, strati di materiali diversi o per caratterizzare elementi strutturali, orditure e fondazioni.

Prove termografiche

Le *indagini termografiche* sono tecniche di telerilevamento non invasive, basate sull'acquisizione di immagini nell'infrarosso. In campo forense e edile può essere molto utile per individuare difetti, distacco di intonaci, ponti termici e

infiltrazioni in modo rapido. Sul legno si possono indagare anche omogeneità del materiale e punti colpiti dall'umidità.

Analisi chimico-fisiche

In questa categoria delle prove non distruttive si può citare la *prova con liquidi penetranti*. Specifica per il controllo delle saldature su materiali metallici, serve per identificare difetti superficiali e porosità. I liquidi utilizzati penetrano nelle discontinuità per capillarità e, a seguito dell'applicazione di liquido di contrasto, essi rendono visibili le imperfezioni.

Per il legno si menziona invece la *prova termoigrometrica*, con la quale si misura la temperatura e l'umidità del materiale con un termoigrometro, al fine di stabilirne il possibile degrado da parte di muffe e condense.

Esame visivo

Nella categoria dei metodi non distruttivi si possono includere anche le *indagini visive*. Esse rappresentano il primo metodo di analisi di un materiale; la conoscenza tecnica dell'ingegnere è in grado di individuare già in prima battuta eventuali deterioramenti o problemi di un materiale (ad esempio, molti degradi del calcestruzzo manifestano tratti distintivi visibili ad occhio nudo). Per indagini più ravvicinate si possono impiegare strumenti come lenti, endoscopi o fotocamere.

2.3.3 Analisi geotecniche

In campo di geotecnica forense, le analisi sui terreni sono utili per indagare casi di collasso o cedimento di una struttura che possono essere causati da problemi del suolo [16]. Nel caso di collasso si andrà a verificare le cause dell'incidente, mentre nel secondo si andranno a rilevare e valutare i cedimenti e le deformazioni subite dalla struttura.

Senza soffermarsi su ogni prova, le analisi geotecniche che si possono utilizzare includono:

- Accertamenti stratigrafici diretti ed indiretti per la caratterizzazione del terreno;
- Analisi piezometriche per la determinazione del livello di falda;
- Prove penetrometriche dinamiche (SPT) e statiche (CPT) per la valutazione di parametri meccanici;
- Prove scissometriche per la resistenza a taglio;
- Prove geofisiche per valutare la rigidità del terreno;
- Prove pressiometriche e dilatometriche relative allo stato tensionale.

2.3.4 Analisi strutturali

Dopo aver raccolto tutti i dati necessari a caratterizzare la struttura in esame, l'ingegnere forense ne analizza il comportamento strutturale, nei casi in cui questo sia necessario. Se il danno è limitato al rivestimento dell'edificio, o vi è un degrado isolato di un materiale, l'analisi strutturale è chiaramente superflua. In tutti gli altri casi, però, l'indagine sulla distribuzione delle sollecitazioni e degli spostamenti della struttura è il passaggio che permette di verificare in modo rigoroso le ipotesi di guasto. Nell'evento di un collasso strutturale può anche essere necessario analizzare la dinamica del crollo. Di seguito verranno evidenziati alcuni metodi analitici e numerici utili per il metodo ingegneristico forense.

Metodi analitici e metodi grafici

Il vantaggio di questi metodi risiede nella loro semplicità e velocità, in raffronto ai più complessi metodi numerici. In tale categoria possiamo includere tutte le metodologie eseguibili con un calcolo manuale, anche se questo può essere coadiuvato da un calcolatore elettronico. I metodi analitici e grafici conducono sia a soluzioni in forma chiusa, sia a soluzioni – in genere fortemente – approssimate. I risultati ottenuti possono fornire le risposte necessarie all'ingegnere, oppure

costituire una solida base per scartare alcune ipotesi e isolarne altre da analizzare con metodi più complessi.

La soluzione di schemi strutturali non complessi, isostatici o iperstatici, è ricavabile con alcuni metodi propri della scienza delle costruzioni (e.g. metodo delle forze, metodo degli spostamenti, equazione differenziale della linea elastica). Come fondamento teorico, la meccanica del continuo ed in particolare quella dei corpi rigidi è alla base delle analisi più semplici e consente di studiare sia la statica che la cinematica delle strutture.

Metodi numerici

Nel momento in cui le variabili da gestire crescono in numero e le approssimazioni dei metodi precedenti risultano troppo grossolane, diventano necessari modelli più complessi e che rappresentano meglio la realtà. Il calcolo numerico si rivela lo strumento per eccellenza dell'analisi strutturale, che nelle sue diverse vesti può gestire le richieste dei casi forensi.

Il metodo più diffuso è senz'altro il *metodo degli elementi finiti (FEM, Finite Element Method)*, che prende il nome dal numero limitato di elementi in cui la struttura viene discretizzata [17]. La possibilità di stimare le incognite statiche e cinematiche al di fuori dei nodi lo rende anche un metodo di interpolazione. Ogni elemento finito è caratterizzato da equazioni aventi la stessa forma; la risoluzione delle singole equazioni parziali permette di ottenere la matrice di rigidezza globale, dalla quale si risale alle sollecitazioni e deformazioni ai nodi. Le analisi FEM possono essere di diversi tipi: statiche, cinematiche, dinamiche, lineari e non; possono considerare carichi puntuali, distribuiti o inerziali. Questa varietà di simulazioni consente di analizzare pressoché ogni tipo di sollecitazione e tensione, in ogni fase di carico fino al collasso.

L'approccio FEM è un metodo al continuo, ovvero gli elementi discreti rimangono sempre in contatto reciproco anche durante la deformazione, dato che

hanno nodi e superfici comuni. Nel caso di collassi strutturali, può venire in aiuto il *metodo degli elementi discreti (DEM, Discrete Element Method)*, che è invece un metodo discontinuo: gli elementi sono distinti e interagiscono tra i loro punti di contatto. Ad ogni iterazione si avrà per ogni corpo discreto una determinata posizione ed un certo valore delle forze di contatto, che insieme definiscono il comportamento meccanico del mezzo [18]. A differenza delle analisi FEM, il DEM permette di indagare la risposta del sistema oltre la fase di carico, ovvero va a caratterizzare la rottura e il collasso, nel modo più vicino possibile alla realtà, con un approccio particellare.

Quando l'analisi di un collasso o di un cedimento richiede lo studio di tutte le fasi di carico, entrambi i modelli FEM e DEM possono risultare necessari; essi, tuttavia, lavorano in modo distinto e non interagiscono fra loro. Da oltre due decenni, la ricerca e lo sviluppo sulle analisi numeriche hanno portato alla creazione del *metodo degli elementi applicati (AEM, Applied Element Method)*, che supera questo limite combinando i tratti dei due metodi appena descritti [19]. L'approccio agli elementi applicati risulta ad oggi l'unico metodo in grado di percorrere tutte le fasi di carico di un collasso strutturale; partendo dal campo elastico, esso analizza la formazione di crepe e rotture, la loro propagazione, la separazione degli elementi e il loro contatto fino alla collisione con le strutture adiacenti ed il terreno. Risulta chiaro come in campo forense, per crolli parziali o totali e per cedimenti strutturali rilevanti, questo metodo permetta di ottenere risposte affidabili per le indagini. Si osserva in Figura 6, in modo qualitativo, un esempio di applicazione del metodo AEM e metodo FEM: è facilmente riconoscibile come il primo metodo permetta di simulare il collasso in modo più preciso e vicino alla realtà [20]. Questo risulta essere un metodo utile anche per la modellazione di demolizioni e per analisi strutturali con carichi eccezionali (sismici, esplosioni, vento).

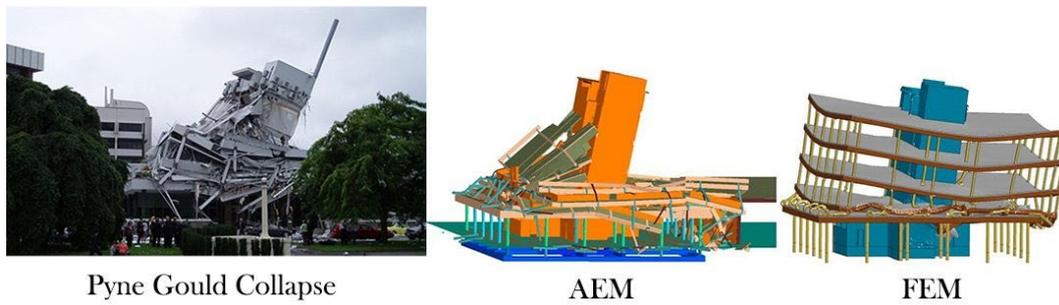


Figura 6 - Confronto fra collasso reale e simulazioni AEM e FEM [20]

3

Incidenti con apparecchi di sollevamento

3.1 Panoramica

Gli apparecchi di sollevamento sono strumenti essenziali per una grande varietà di industrie poiché consentono la movimentazione rapida di materiali pesanti fra punti più o meno distanti nello spazio, al fine di aumentare la produttività e colmare limiti tecnici. La varietà di apparecchiature esistenti consente di soddisfare le diverse esigenze di sollevamento, distinguendosi in termini di portata massima, altezza,

lunghezza dei bracci, zavorre, peso, metodi di manovra e possibilità di spostamento. Per il settore delle costruzioni, le più utilizzate sono le gru a torre, gru su autocarro, autogrù, gru cingolate tralicciate, sollevatori telescopici e carri da varo. Le operazioni di sollevamento vengono condotte da operai addestrati; la squadra di operatori sarà tanto più numerosa e con ruoli più specializzati tanto più la movimentazione dei carichi sarà complessa. Gli apparecchi sono costituiti da svariati componenti; i principali sono:

- La struttura principale, generalmente composta da travi in acciaio tralicciate, scatolate o ad elementi tubolari, può comprendere una struttura di elevazione, il braccio di sollevamento, il controbraccio di zavorra ed altri elementi strutturali per la stabilità come puntoni e cuspidi. Oltre alle travi, funi, stralli e tiranti contribuiscono all'equilibrio statico dell'apparecchio.
- Il sistema di sollevamento, composto da argani, funi, pulegge, nottolini, carrelli e ganci per il sollevamento.
- Il sistema di rotazione, costituito da ralla e porta ralla, alimentato da un motore.
- La base, comprendente zavorre e appoggi; può essere fissa o mobile: nel secondo caso può essere dotata di ruote o cingoli.
- Il sistema di manovra, presente sull'apparecchio e su sistemi telecomandati.
- Il sistema frenante ed altri dispositivi di sicurezza.

Si vedono in Figura 7 i principali elementi di una gru a torre edile, uno degli apparecchi di sollevamento più utilizzato in questo settore.

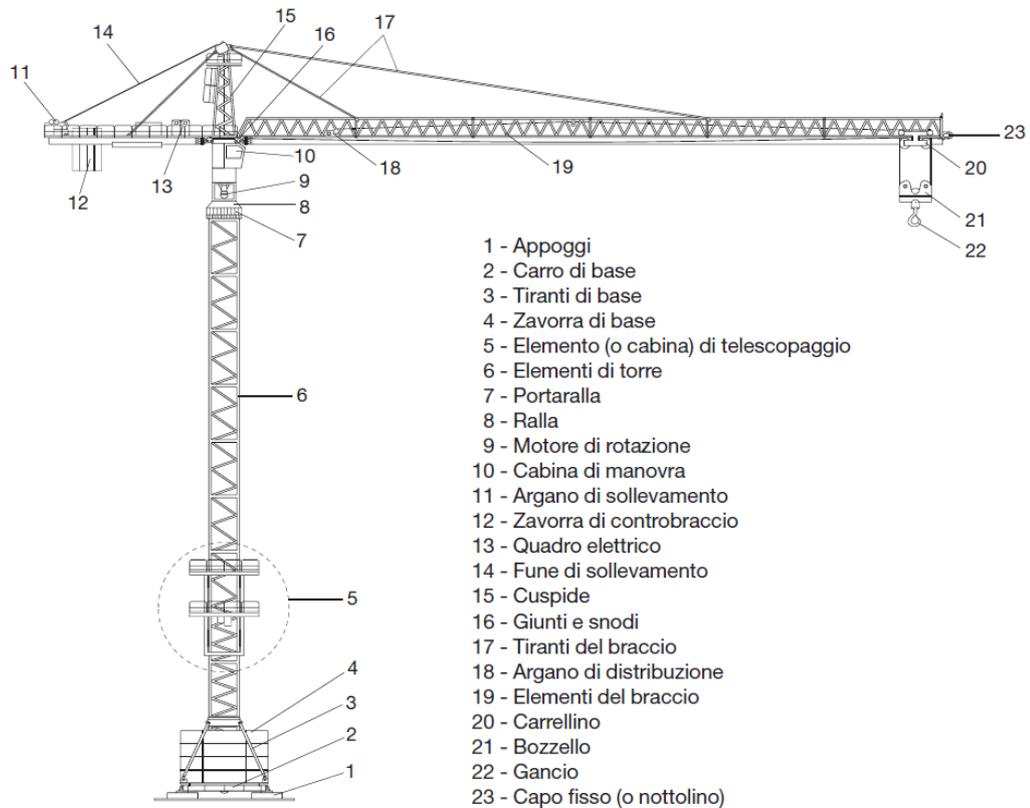


Figura 7 - Elementi di una gru a torre con rotazione alta [21]

Essendo gli apparecchi di sollevamento voluminosi e sovente utilizzati per operazioni complesse, gli incidenti che li coinvolgono possono comportare effetti catastrofici – sia in termini di danni economici, sia in termini di incolumità dei lavoratori. Yu distingue questi effetti in *tangibili* e *intangibili*; i primi sono relativi a danni agli apparecchi, ai carichi sollevati e all’ambiente circostante, i secondi includono ritardi nei lavori, compensazioni per gli infortuni o per le vittime e deterioramento della reputazione delle imprese [22]. Lo stesso autore, raccogliendo dati storici e di letteratura, ha riassunto le principali modalità di guasto degli apparecchi di sollevamento, le loro conseguenze, i meccanismi di rottura e le cause contribuenti al guasto; in Tabella 1 sono riportate queste conclusioni.

Tabella 1 - Modalità di guasto e analisi delle cause per incidenti con apparecchi di sollevamento [22]

Modalità di guasto	Conseguenze	Meccanismi di rottura	Cause principali e concause
Urti contro oggetti	Danni al contesto; danni a persone; elettrocuzione	Impatto, contatto con linee elettriche (conduzione)	Manovre errate, comunicazione errata, pianificazione inadeguata, gestione del rischio inadeguata, stanchezza degli operatori
Rottura o buckling del braccio	Danni al contesto e ai beni trasportati; danni a persone	Corrosione, fatica, overstress, tensocorrosione	Design scadente, difetti di manifattura, difetti dei materiali, manutenzione scorretta, ispezioni mal eseguite, sovraccarico, forte vento
Rovesciamento o ribaltamento	Danni al contesto e ai beni trasportati; danni a persone	Instabilità	Sovraccarico, condizioni meteo avverse (incluso forte vento), condizioni del suolo scadenti, estensione insufficiente degli stabilizzatori, contrappeso insufficiente, pianificazione inadeguata, malfunzionamento dei dispositivi, rottura degli stabilizzatori
Caduta del carico	Danni al contesto e ai beni trasportati; danni a persone	Corrosione, fatica, overstress, tensocorrosione, usura	Rottura cavo metallico o gancio, carico non saldo, manovre errate, dispositivi obsoleti, malfunzionamento del sistema frenante
Rottura del cavo metallico	Danni al contesto e ai beni trasportati; danni a persone	Corrosione, fatica, overstress, tensocorrosione, usura	Sovraccarico, difetti dei materiali, difetti di manifattura, manutenzione scadente, ispezioni mal eseguite, condizioni meteo avverse, dimensioni scorrette delle pulegge

Caduta o incastro di componente/i	Danni al contesto; danni a persone	Impatto	Operazioni di montaggio e smontaggio gru scorrette, comunicazione errata, pianificazione inadeguata, gestione del rischio inadeguata
Guasto di dispositivi elettrici	Inoperabilità; danni al contesto; danni a persone	Cortocircuito, circuito aperto, dispersione di corrente, corrosione elettrica	Sovraccarico elettrico, impurità, difetti di manifattura, manutenzione scadente, degrado
Danni ad altri componenti meccanici fondamentali	Inoperabilità; danni al contesto; danni a persone	Fatica, overstress, corrosione, tensocorrosione, usura	Sovraccarico, condizioni meteo avverse, condizioni del suolo scadenti, difetti dei materiali, difetti di manifattura, manutenzione scorretta

3.2 Casi storici

Innumerevoli casi di incidenti con apparecchi di sollevamento sono occorsi in passato, con conseguenze più o meno gravi. In letteratura sono presenti studi che tentano di stabilire quali cause concorrono in percentuale maggiore a questi imprevisti, ma spesso risultano essere discordanti fra loro. È difficoltoso risalire a statistiche di incidenti di varia natura e magnitudo; tuttavia, si può osservare il numero di casi più gravi: fra il 2000 e il 2010, uno studio ha raccolto un totale di 1125 crolli e collassi di apparecchi di sollevamento nel mondo, che hanno causato 780 vittime e innumerevoli feriti [23]. Un numero elevato, considerando che solo gli incidenti effettivamente documentati e relativi al settore delle costruzioni sono stati riportati. Altri studi più recenti, riferiti ad una finestra temporale più ristretta, presentano proporzionalmente lo stesso quantitativo di incidenti, evidenziando come il solo sviluppo delle tecnologie, dei materiali e dei dispositivi di sicurezza non possa ridurre in modo drastico questo numero. Di seguito vengono riportati

alcuni casi eclatanti di crolli di apparecchi di sollevamento, per la magnitudo dei danni economici ed umani.

3.2.1 Crollo gru “Big Blue” a Milwaukee (USA, 1999)

Questo caso statunitense è stato ritenuto da molti come il più grande incidente con apparecchi di sollevamento prima del nuovo millennio; Ross et al. hanno riportato in un paper ogni dettaglio della vicenda [24]. L'incidente ha coinvolto un'enorme Lampson TransiLift III: una gru cingolata tralicciata, denominata “Big Blue” per le

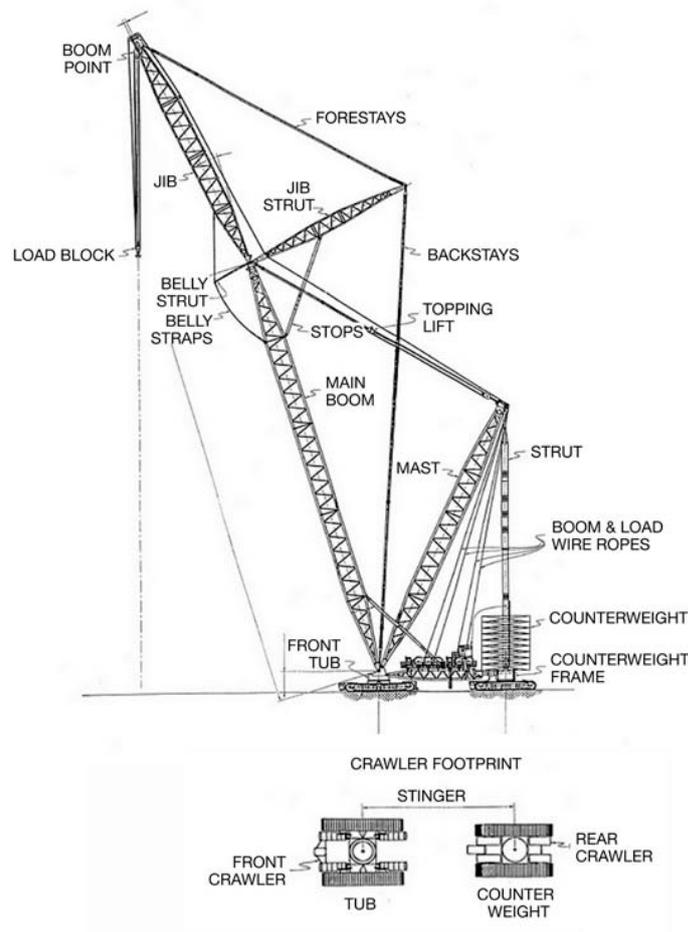


Figura 8 - Gru cingolata Lampson TransiLift III [24]

sue dimensioni e per la sua tinta. I due bracci principali della gru misuravano 104 e 61 metri, sostenuti da un sistema di cavi e travi tralicciate, bilanciate da un contrappeso di 1150 tonnellate, il tutto poggiante su due gruppi cingolati, per un totale di 2100 tonnellate (Figura 8).

Il crollo è occorso il 14 luglio 1999 a Milwaukee, Winsconsin, durante le operazioni di costruzione della copertura retrattile dello stadio da baseball “Miller Park”. Nel tardo pomeriggio, la gru era impegnata nel sollevamento di una sezione di copertura di quasi 500 tonnellate; quando il carico giunse in prossimità della posizione finale, due forti boati precedettero il collasso dell’apparecchio e del carico che impattarono la copertura adiacente, la struttura dello stadio e portò alla morte di tre operai e al ferimento di altri cinque. Il crollo è stato incredibilmente filmato nella sua interezza da una persona mediante videocamera, cosa che ha permesso di osservare con chiarezza la sequenza di collasso. Si riportano in Figura 9 alcuni frames della caduta, ed in Figura 10 una foto aerea della posizione finale dell’apparecchio e della struttura.



Figura 9 - Frames del crollo ripreso in video [25]



Figura 10 - Situazione a seguito del crollo [26]

Sono state condotte analisi in sito, prove sui materiali e sui componenti della gru, analisi e simulazioni software relativamente ai carichi sopportati. A seguito della generazione di diverse ipotesi, le investigazioni di ingegneria forense hanno portato ad individuare il forte vento (con raffiche fino a 42 km/h) come causa principale e come concause il piano stradale non piano e costituito da terreno cedevole. Le forze laterali del vento – pari al 250% del valore limite – hanno causato uno spostamento orizzontale del carico e dei bracci della gru, andando ad intensificare la sollecitazione di momento ribaltante sul perno fuso del gruppo cingolato anteriore, essendo l'unico elemento di collegamento fra la base e il corpo della macchina (Figura 11). In particolare, la rottura è avvenuta per fratture radiali sulla boccola a flangia del perno fuso. Ulteriori indagini hanno individuato problemi organizzativi, come il licenziamento di uno dei responsabili della gru, per aver rallentato i lavori esprimendo i suoi dubbi sulla stabilità del suolo; inoltre, non erano chiare responsabilità e procedure per il calcolo dei carichi del vento e la misura della sua velocità [27].

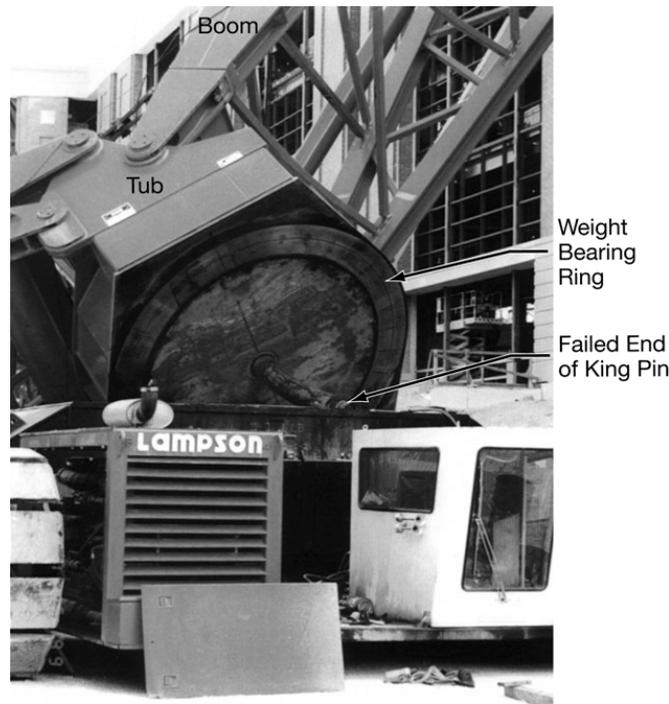


Figura 11 - Dettaglio del cedimento del perno fuso [24]

Le responsabilità dell'incidente sono state imputate per il 97% all'impresa di costruzione, colpevole di aver operato la gru in condizioni pericolose di forte vento, e solo il 3% alla compagnia Lampson International per aver fornito istruzioni di utilizzo apparentemente poco chiare. Nessuna persona fisica fu coinvolta nel verdetto, nemmeno il direttore dei lavori, colui che avrebbe avuto la maggiore responsabilità per l'accaduto [28]. I danni fisici risultati dal crollo sono stati stimati a 100 milioni di dollari, mentre le famiglie delle tre vittime sono state compensate per un totale di 99 milioni di dollari.

3.2.2 Crollo gru a Manhattan, New York (USA, 2008)

Il crollo della gru avvenuto nel 2008 a New York nel quartiere di Turtle Bay, distretto di Manhattan, venne definito dall'allora sindaco Michael Bloomberg come il peggiore incidente edile nella storia recente della città. L'apparecchio di sollevamento coinvolto fu una gru autorampante con braccio impennabile, modello

M440E prodotta dalla Favelle Favco, impiegata per la costruzione di un grattacielo che avrebbe raggiunto 154 metri di altezza [29]. Al momento del crollo, l'apparecchio toccava i 61 metri di elevazione, era ancorato sia al terreno (tramite un grigliato connesso ad un blocco di fondazione preesistente) sia al terzo e nono piano dell'edificio – già realizzati – mediante delle travi di collegamento d'acciaio. In Figura 12 e in Figura 13 si riportano la struttura della gru autorampante al momento del crollo e lo schema di collegamento ai piani del grattacielo.

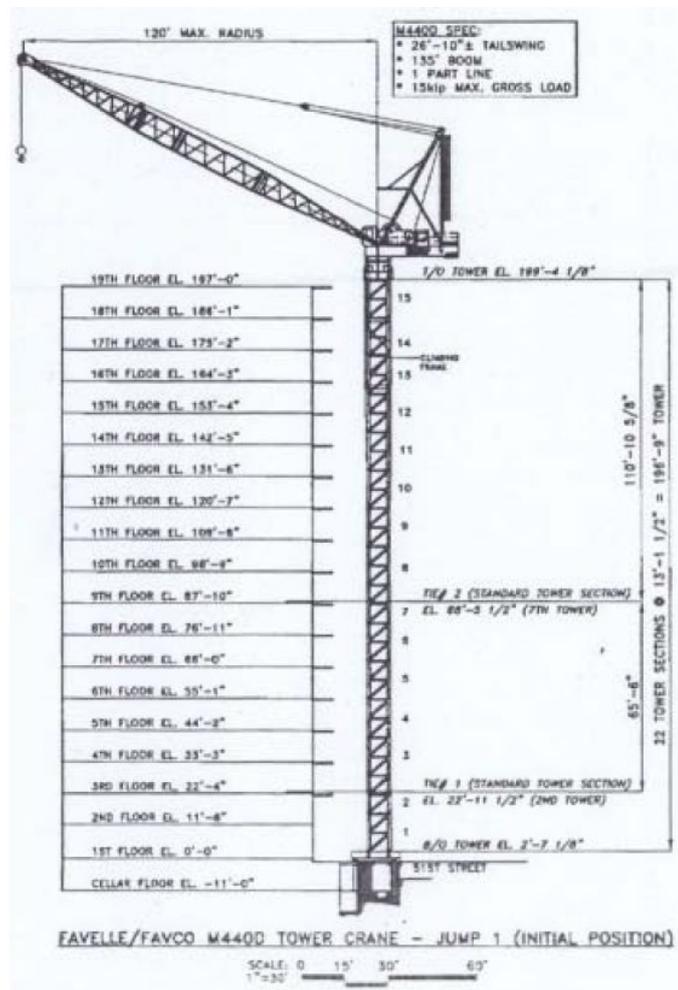


Figura 12 - Gru autorampante Favelle Favco M440E [29]

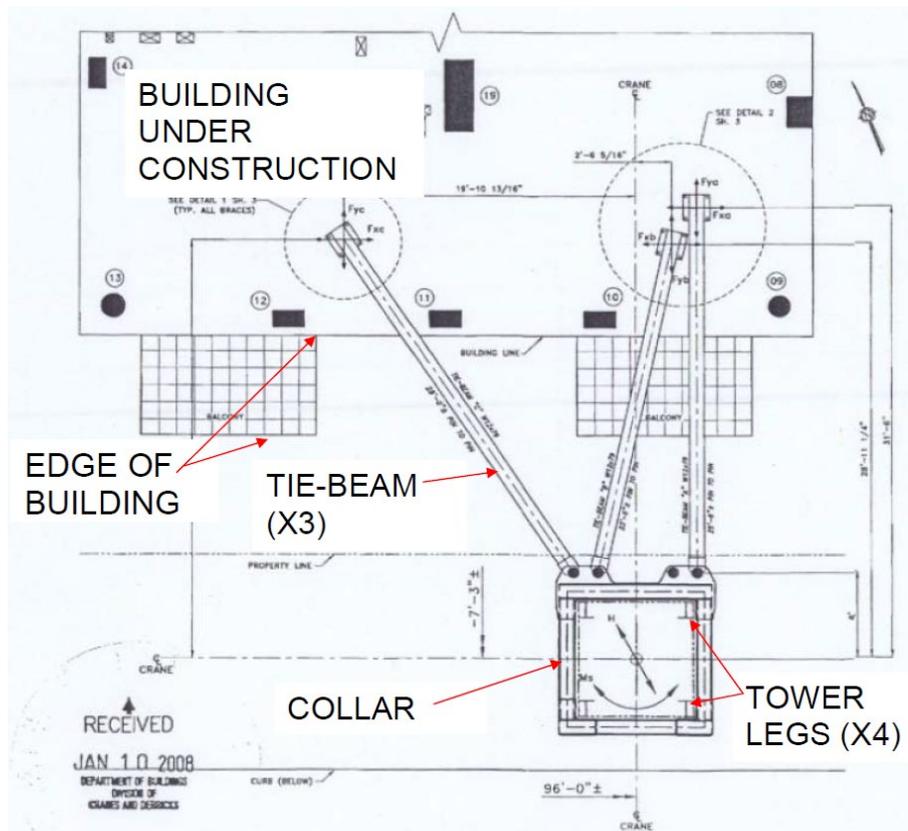


Figura 13 - Travi di collegamento gru-edificio [29]

Il sistema di autorampaggio della gru è chiamato dagli inglesi *external climbing*, per via della sospensione delle sezioni della torre a lato della stessa, prima di essere inserite in posizione finale. La procedura consiste di tre step: il modulo di struttura reticolare viene sollevato da una seconda gru ed ancorato in posizione laterale; successivamente la gru si innalza grazie a martinetti idraulici fino alla quota necessaria per l'inserimento della nuova sezione. A questo punto, il modulo viene spinto in posizione finale ed imbullonato alla torre.

Raggiunto il diciottesimo piano, un collare metallico (visibile in Figura 13) venne installato per permettere l'ancoraggio all'edificio tramite travi, nella stessa configurazione già adottata per il terzo e nono piano. In questa fase avvenne la caduta, nella giornata del 15 marzo. Il collare era formato da due metà connesse fra loro; esso si trovava in posizione finale, temporaneamente sospeso da fasce in

poliestere, prima di essere imbullonato alla torre. In questa configurazione la gru collassò: la base scivolò verso l'edificio in costruzione mentre la torre cadde in direzione opposta, verso gli edifici circostanti. L'incidente demolì un edificio di quattro piani e danneggiò più di dodici altre strutture del quartiere, causando la morte di sei lavoratori, di un civile ed il ferimento di altre 24 persone. In Figura 14 si riportano alcuni scatti della situazione post crollo.



Figura 14 - Scatti della posizione finale della gru [29]

Le investigazioni forensi coinvolsero ispezioni in sito, analisi sui materiali, analisi strutturali, esami microscopici sulle fasce in poliestere e revisione di documenti, norme e standard seguiti. La verifica di varie ipotesi ha portato a definire come causa principale la rottura di una delle fasce in poliestere che sostenevano il collare metallico: il guasto di questa causò il cedimento delle altre, provocando la caduta del collare ai piani inferiori. Il componente del diciottesimo piano impattò il collare del nono piano, distruggendo la connessione alla struttura tramite travi. I due pezzi proseguirono la caduta colpendo il collare del terzo piano, che non cedette ma si flesse; la resistenza laterale rimanente fu insufficiente per impedire la rotazione della torre, la cui base scivolò facilmente in quanto non era progettata per sviluppare attrito. Si concluse che la braga che cedette era deteriorata e non si sarebbe dovuta utilizzare; inoltre, solo quattro delle otto fasce previste vennero impiegate per la sospensione ed il pezzo venne imbracato in punti diversi da quelli previsti dal manifattore della gru. In più, i nastri utilizzati vennero legati impropriamente, assumendo una configurazione che sollecitava i bordi degli stessi, che non vennero ulteriormente protetti. In Figura 15 a destra si vede la posizione ideale delle fasce, in rosso, ed in blu i punti usati per il sollevamento in posizione del collare. A sinistra si notano le quattro fasce delle otto previste, installate in modo erroneo e negli ancoraggi sbagliati.

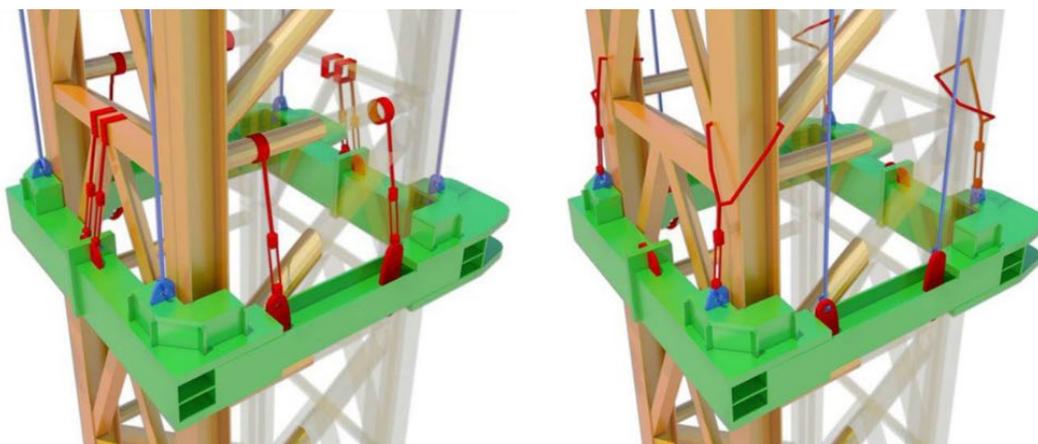


Figura 15 - Posizione ideale ed effettiva delle fasce in poliestere [29]

L'uso improprio delle fasce in poliestere venne dunque individuata come causa scatenante l'incidente. Vennero presentate accuse penali verso il proprietario della gru e verso il meccanico da lui assunto [30]. La prima figura venne assolto da ogni accusa (tra cui quella di omicidio colposo di secondo grado), mentre la seconda si dichiarò colpevole di omicidio per negligenza. Le querele di altri tre imputati vennero risolte col pagamento di un totale di 3,5 milioni di dollari durante il processo. Le famiglie delle vittime vennero invece ricompensate ciascuna con una somma di 24 milioni di dollari, incrementate di 15,5 e 31,5 milioni per due lavoratori che non morirono sul colpo, ma patirono sotto le macerie ed in ospedale, per un totale di 218,5 milioni di dollari.

3.2.3 Crollo gru a La Mecca (Arabia Saudita, 2015)

Il disastro avvenuto l'11 settembre 2015 alla Sacra Moschea della Mecca è ricordato come uno dei più gravi incidenti nel mondo delle costruzioni ed il più infausto tra quelli con apparecchi di sollevamento. A differenza dei casi precedenti, la gru non era operativa al momento del crollo, ma fuori servizio, in posizione stazionaria [31]. Il mezzo coinvolto fu una gru cingolata Liebherr LR 11350, di imponenti dimensioni: raggiungeva un'altezza di 200 metri e pesava oltre 1100 tonnellate. In Figura 16 si riporta lo schema strutturale della gru, il quale rappresenta anche la posizione in cui si trovava stazionata, con i bracci alzati alla massima angolazione possibile [32].

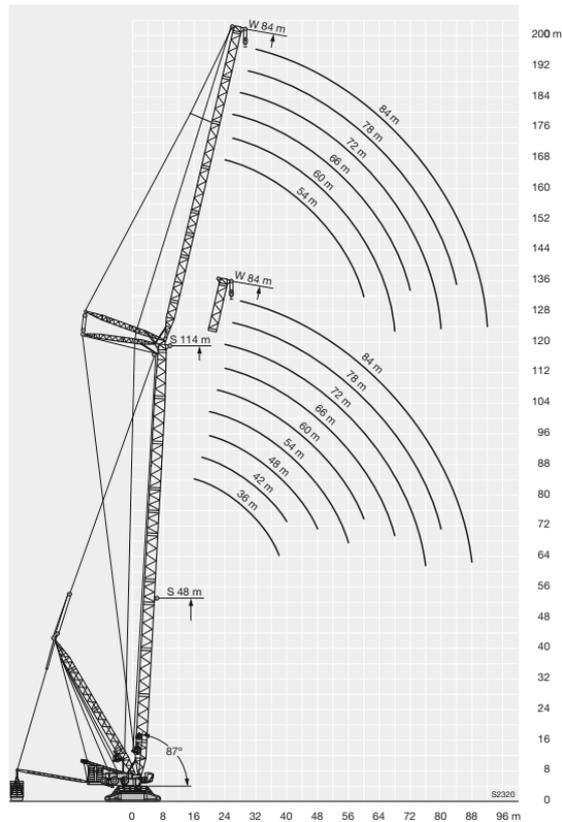


Figura 16 - Gru cingolata Liebherr LR 11350 [32]

Durante il mese di settembre la città si stava preparando per l’Hajj, il tradizionale pellegrinaggio verso la Sacra Moschea. Nelle settimane precedenti al crollo, tempeste di sabbia imperversavano sulla regione, con segnalazioni di venti superiori a 40 km/h. Date le condizioni climatiche avverse, l’emiro de La Mecca ordinò undici giorni prima della tragedia lo spostamento della gru in un luogo più sicuro, per salvaguardare la sicurezza pubblica. L’impresa di costruzione, anche proprietaria della gru, non ascoltò il comunicato e lasciò la gru incustodita nella posizione precedentemente descritta. Il giorno dell’incidente, la gru perse di stabilità e si ribaltò all’indietro, collassando sull’edificio affollato di pellegrini (Figura 17): 111 persero la vita e 394 subirono ferite non fatali.

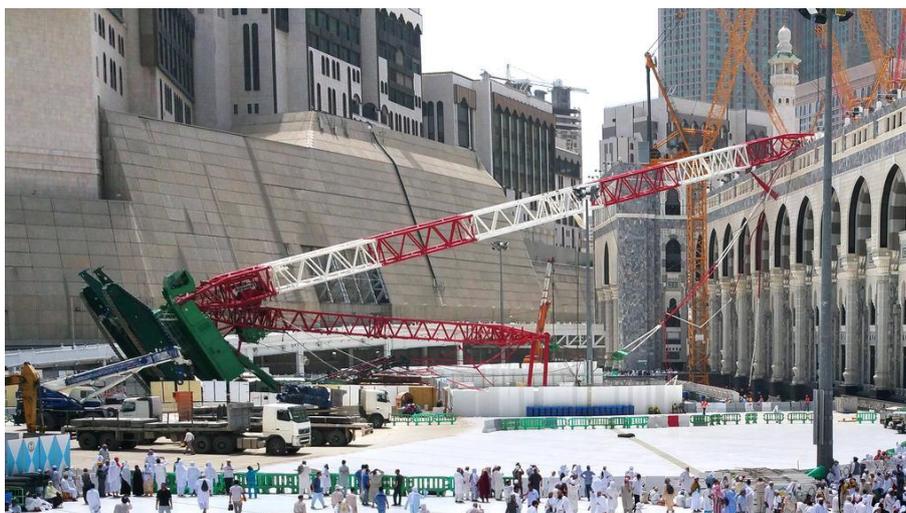


Figura 17 - Posizione finale della gru crollata [31]

Investigazioni di ingegneria forense analizzarono l'accaduto, focalizzandosi sull'azione del vento. Simulazioni numeriche e test con galleria del vento su modelli in scala fornirono i dati necessari a descrivere la risposta della gru sotto diverse condizioni di perturbazione: raffiche con velocità compresa fra 68 e 75 km/h in corrispondenza di un'elevazione di 10 metri sarebbero stati sufficienti al ribaltamento del macchinario. I venti registrati quel giorno, in un range compreso fra 80 e 105 km/h sarebbero dunque stati sufficienti a far impennare il braccio superiore della gru, spingendolo indietro. Il centro di gravità si spostò a tal punto da far perdere la stabilità della gru, che collassò sul tetto dell'ala est della moschea, attraversandolo e colpendo le persone che vi si trovavano al di sotto.

La causa principale del crollo venne identificata nella negligenza del costruttore nel lasciare l'apparecchio incustodito con i bracci alla massima angolazione – posizione imprudente, differente da quella indicata nelle istruzioni del manifattore della gru. Liebherr specificava infatti come, in situazioni di forte vento, il braccio della gru dovesse essere soppresso ed abbassato ad un'angolazione sicura, per precauzione. A fine del processo, tuttavia, i tredici imputati accusati di negligenza vennero tutti assolti. Il re dell'Arabia Saudita ordinò all'impresa la

compensazione alle famiglie delle vittime per un totale di 665.000 dollari, distribuiti in parti differenti fra le famiglie dei defunti e quelle dei feriti.

3.2.4 Crollo gru a Trivolzio (Italia, 2022)

Il crollo della gru avvenuto il 14 novembre 2022 a Trivolzio, nel Pavese, risulta essere l'incidente italiano con apparecchi di sollevamento più recente al momento della stesura di questa tesi. L'evento ha interessato una gru a rotazione bassa prodotta dalla ditta Cattaneo, modello CM 50S4, la cui torre raggiungeva un'altezza di quasi 28 metri, per una massa totale di 27 tonnellate. In Figura 18 si riporta lo schema strutturale dell'apparecchio di sollevamento. La gru era impiegata per lo spostamento di materiali destinati alla costruzione di un piccolo quartiere residenziale, costituito da villette plurifamiliari [33].

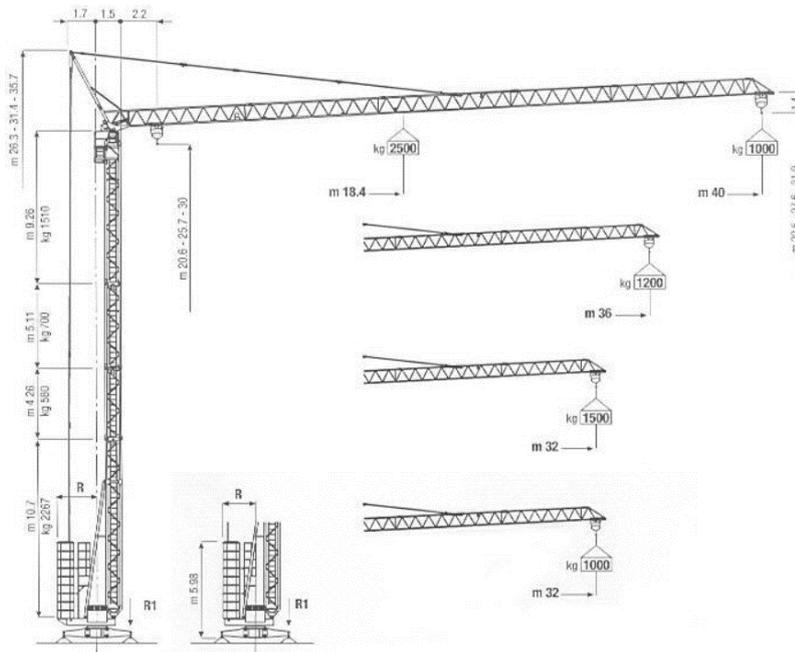


Figura 18 - Gru a rotazione bassa Cattaneo CM 50S4 [34]

Al momento del crollo, l'apparecchio di sollevamento era utilizzato per il sollevamento di bancali di masselli autobloccanti, destinati alla pavimentazione del

viale compreso tra gli edifici. Le cause e la dinamica dell'incidente sono ancora da appurare, in quanto le indagini di ingegneria forense sono, in data odierna, ancora in corso. Le testimonianze delle figure presenti durante la caduta – importante fonte di dati nel processo investigativo, come visto nel capitolo 2 – hanno riportato che l'evento si è svolto in due fasi [35]. Nella prima, la gru si trovava nella fase di sollevamento di un bancale di materiale, il quale sorvolava l'area di cantiere; improvvisamente, il carico perse il sostegno fornito dalla gru e cadde a terra, ancora imbracato alla fune dell'apparecchio. Il bancale di autobloccanti andò ad impattare un operaio, che rimase schiacciato sotto il peso del carico. Il gruista e gli altri operai, presumibilmente con una manovra della gru e lo smantellamento manuale del pacco di masselli, liberarono il lavoratore schiacciato: in questa operazione un secondo operaio si ferì. L'operazione, tuttavia, causò uno sbilanciamento ed un'oscillazione dell'apparecchio tale da provocarne il collasso a terra: ciò costituì la seconda fase dell'incidente. Durante la caduta la gru ferì il terzo operaio, abbattendosi lungo il viale in costruzione ed evitando le abitazioni adiacenti, scongiurando ulteriori danni.



Figura 19 - Gru crollata a terra



Figura 20 - Particolare del carro di base e zavorre



Figura 21 - Braccio della gru precipitato sul viale da pavimentare



Figura 22 - Particolare della punta del braccio

Le indagini di ingegneria forense, come menzionato, sono al momento della stesura di questa tesi ancora in corso. Ho avuto l'opportunità di poter partecipare alle perizie che si sarebbero svolte sul luogo dell'incidente, ancora sotto sequestro da parte della procura e pertanto con la gru collassata a terra. Tuttavia, questa opportunità è svanita a causa di complicità nelle prime fasi della procedura penale; per due volte mi sono trovato sul luogo dell'incidente ed in entrambi i casi le operazioni peritali furono ostacolate pochi minuti prima del loro inizio. Nella prima occasione, il 26 gennaio 2023, vennero interdetto dalla richiesta di una delle parti di attivare l'istituto processuale di incidente probatorio. Il 9 febbraio, la seconda data in cui le perizie vennero programmate, le operazioni vennero invece ostacolate dall'opposizione di una delle parti, la quale reclamò la mancata notifica delle stesse.

A fronte di quanto detto si può comprendere come, indipendentemente dalla difficoltà ingegneristica del caso da risolvere, la componente forense giochi un ruolo fondamentale nel dettare i tempi del procedimento e dunque nell'emissione del verdetto da parte del giudice. Ciò rallenta ed ostacola i cantieri interessati dagli incidenti, che possono rimanere bloccati per mesi come in questo caso, se non per anni. Oltre al cantiere, anche le attrezzature e i mezzi rimangono sotto sequestro,

comportando un danno economico alle imprese e ai soggetti coinvolti; ciò mi ha tuttavia permesso di osservare da vicino la gru a terra e scattare le foto sopra riportate. Anche soggetti esterni alla vicenda ne subiscono gli effetti: si pensi alle famiglie già residenti nelle villette appena edificate che trovano parte della loro dimora sotto sequestro, subendo un danno materiale e psicologico. Infine, il protrarsi del procedimento giudiziario rimanda il verdetto e dunque l'attribuzione delle responsabilità dell'incidente, le conseguenti pene o sanzioni e i risarcimenti per le parti danneggiate.

3.3 Caso studio: crollo gru in via Genova, Torino (Italia, 2021)

Il crollo della gru di via Genova, a Torino, rappresenta il più importante incidente con apparecchi di sollevamento avvenuti recentemente in Italia. La gravità delle conseguenze e il suo avvenimento nella medesima città dei miei studi l'hanno reso un evento per me rilevante, pertanto oggetto di caso studio. La caduta avvenne durante la fase di montaggio della gru a torre, caratteristica peculiare dell'incidente e punto di partenza per lo sviluppo del capitolo 4, focalizzato proprio su questa fase.

3.3.1 Il contesto

Sabato 18 dicembre 2021, sul tratto di strada compreso fra i civici 114 e 120 di via Genova, era in atto il montaggio della gru a torre destinata all'esecuzione di lavori per l'efficientamento energetico di una palazzina di sette piani. Localizzata nel quartiere di Nizza Millefonti, circoscrizione 8 della città di Torino, la strada è a senso unico di circolazione, con una corsia riservata al transito di bus, tram e taxi sulla destra, al centro una corsia di circolazione e lo spazio restante, a sinistra, è adibito a parcheggi. Sul tratto di via interessato dal cantiere è presente, su entrambi i lati della via, un marciapiede per un tratto raddoppiato da una porzione porticata

ed una non; sotto i portici si alternano le attività commerciali e gli ingressi delle palazzine residenziali. In Figura 23 si riporta l'inquadratura di via Genova nel quartiere e l'indicazione del tratto di strada interessato dal cantiere. In Figura 24 si notano invece le corsie ed i marciapiedi della via, così come la superficie in cui sarà montata la gru.

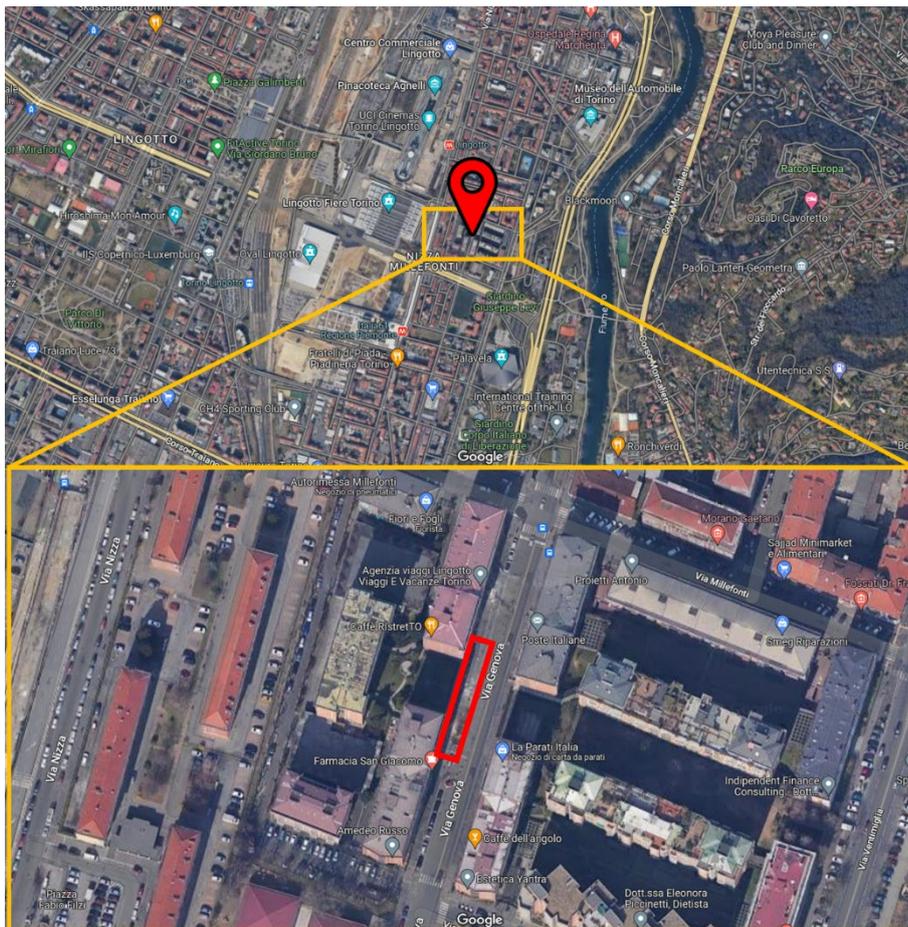


Figura 23 - Inquadratura del cantiere in via Genova [36]



Figura 24 - Perimetro dell'area di cantiere su via Genova [36]

3.3.2 L'incidente

Come menzionato, l'incidente si è svolto durante la fase di montaggio della gru, che avvenne mediante l'impiego di un'autogrù anch'essa coinvolta nel crollo. La gru a torre era una SGT 85 prodotta dalla Soima; nella configurazione di via Genova il carro di base poggiava direttamente a terra, senza plinto di fondazione. Con un braccio di 55 metri ed un'altezza sotto gancio di 36 metri, la gru scaricava al suolo una massa complessiva di 50 tonnellate. In Figura 25 si riporta lo schema strutturale dell'apparecchio.

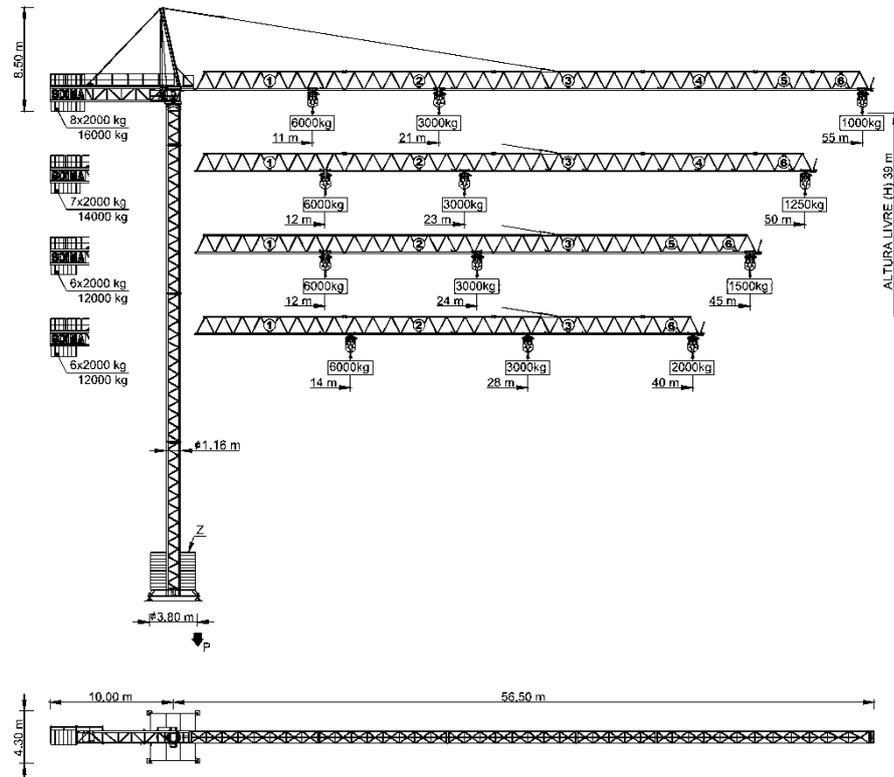


Figura 25 - Gru a torre Soima SGT 85 [37]

L'autogrù destinata al suo montaggio, invece, era una Liebherr LTM 1080/1, con portata nominale di 80 tonnellate, peso operativo di 48 tonnellate e braccio estensibile fino a 48 metri, rappresentata in Figura 26.

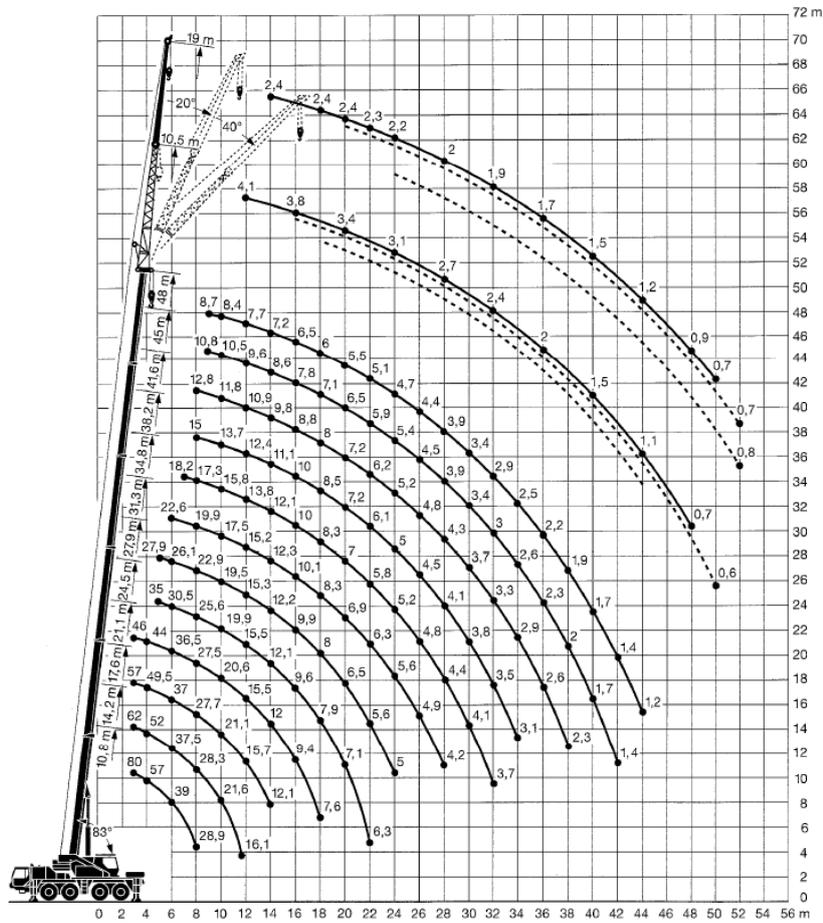


Figura 26 - Autogrù Liebherr LTM 1080/1 [38]

Il crollo avvenne durante la fase di montaggio del braccio della gru, mentre questo era imbracato e tenuto in posizione dall'autogrù [39]. La fase di sollevamento – come più specificatamente definito nel capitolo successivo – inizia quando il materiale si solleva da terra e termina quando ha raggiunto la sua destinazione finale e le funi o catene di sollevamento vengono sciolte. Si può dunque affermare come l'incidente si sia svolto durante il sollevamento, precisamente quando gru e autogrù erano collegate reciprocamente tramite la catena che sosteneva il braccio. L'apparecchio di sollevamento fisso era stato quasi interamente assemblato: la torre, la ralla (ovvero l'elemento rotante), il controbraccio e la cuspide erano fissati in posizione. Negli istanti precedenti al

crollo, tre montatori in quota stavano ultimando i collegamenti del braccio al corpo della torre: i due perni che fissavano l'elemento orizzontale alla ralla erano stati completati, mentre mancava il terzo ed ultimo perno che connetteva il braccio alla cuspide. In questo momento si verificò un'instabilità che causò la caduta della gru a terra, unitamente al braccio estensibile dell'autogrù, che si piegò alla base; i due apparecchi rovinarono sulla strada aperta al transito, urtando un edificio frontista. In Figura 27 e Figura 28 si riportano due fotografie che ritraggono dall'alto gli apparecchi crollati al suolo. In Figura 29 e Figura 30 si notano invece i dettagli del braccio della gru spezzato al suolo, e quello dell'autogrù flesso a terra.



Figura 27 - Il crollo su via Genova [40]

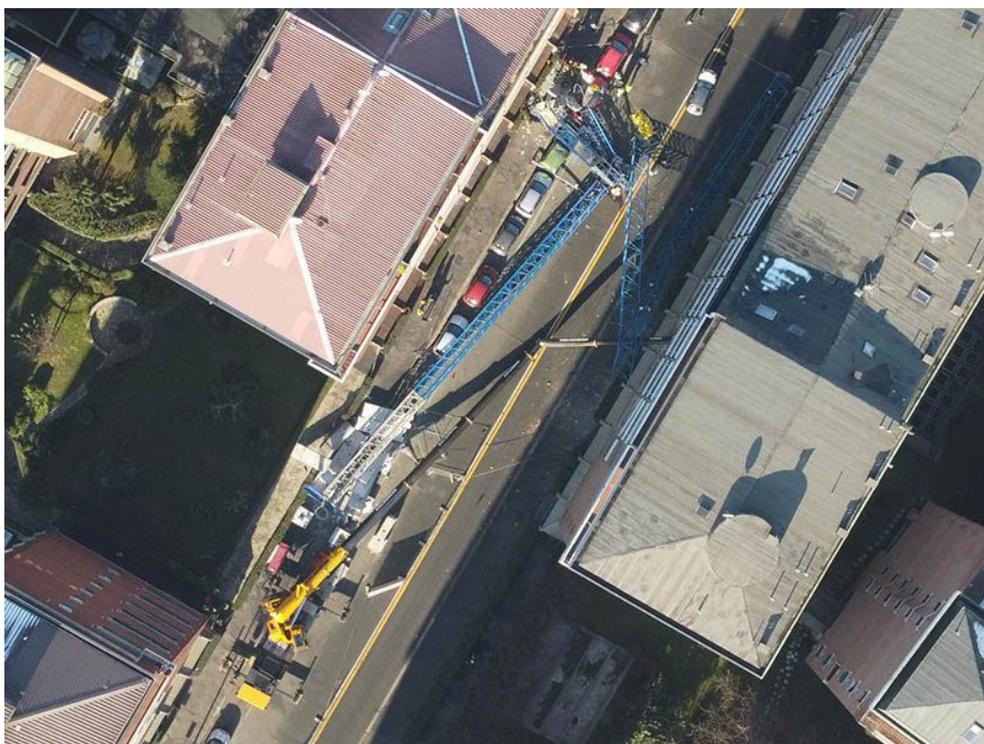


Figura 28 - Lo scatto di un drone su via Genova [41]

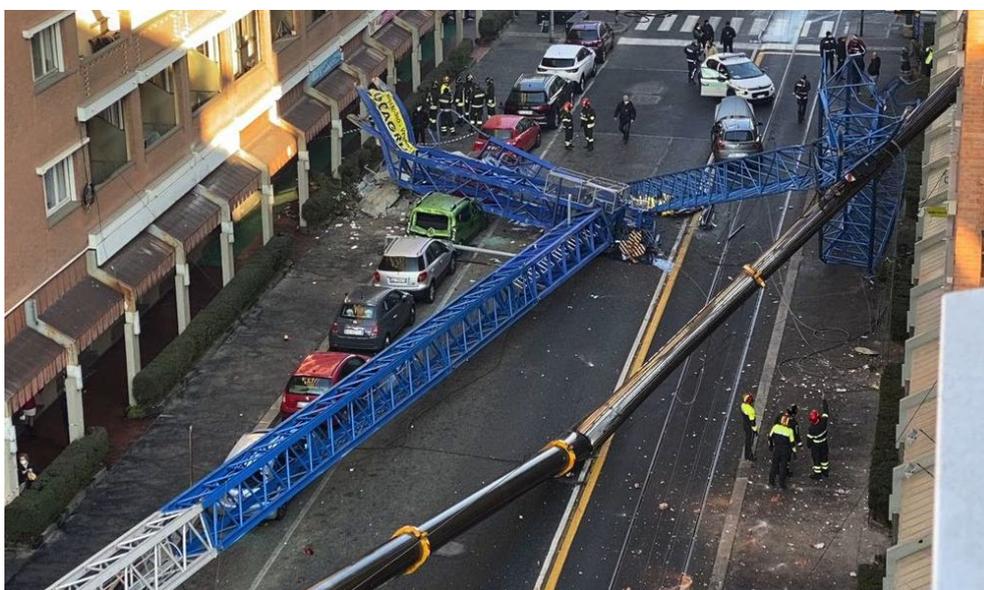


Figura 29 - Dettaglio della gru a torre [39]



Figura 30 - Dettaglio dell'autogrù [42]

Al momento della stesura di questa tesi non si conoscono con certezza le cause del crollo, in quanto le indagini sono ancora in corso. Varie ipotesi furono formulate in un primo momento: un cedimento del suolo, un guasto meccanico dell'autogrù, un errore di manovra o una rotazione involontaria della ralla furono le principali cause analizzate dai periti. Tuttavia, da quanto emerso dalle relazioni tecniche, la procura di Torino ha recentemente individuato come ipotesi più probabile una serie di omissioni e superficialità nei controlli di sicurezza, che hanno contribuito al crollo della gru [43]. Nell'insieme delle cause, quella identificata come principale risulta essere stata l'impiego di un'autogrù non adatta al montaggio di quel tipo di gru a torre "Soima SGT 85". Come riportato dal libretto d'uso e manutenzione della gru a torre, per il montaggio dell'apparecchio si richiede l'utilizzo di un'autogrù con capacità di carico di 5000 kg, raggio d'azione minimo di 5 metri e altezza pari alla torre a montare più 15 metri. Se i primi due requisiti risultavano essere soddisfatti, il terzo non lo era: l'insufficiente altezza raggiunta dal braccio dell'autogrù avrebbe causato un effetto di tiro obliquo, andando a generare delle forze orizzontali tali da piegare il braccio estensibile, far cadere

l'elemento sospeso e di conseguenza l'intero corpo della gru. Al parere dei consulenti, questo deficit poteva essere superato adottando specifici accorgimenti, ma ciò non fu eseguito. Qualora tale causa dovesse essere confermata la mancata verifica circa l'adeguatezza dell'autogrù adoperata assumerebbe un aspetto determinante circa il motivo del crollo. Diverso è invece l'aspetto riguardante le misure di sicurezza a terra atte a limitare le eventuali conseguenze di una caduta parziale di elementi sospesi.

3.3.3 Le conseguenze

Non è intento di questa tesi indagare ulteriormente sulle cause del crollo, ma ci si vuole soffermare su quelle che sono stati gli effetti, analizzando ciò che è successo nell'insieme di tutti i possibili effetti che l'incidente avrebbe potuto generare. L'incidente ha registrato tre vittime (i tre montatori che operavano in quota precipitati insieme alla gru) e tre feriti: un operaio a terra, una passante che subì un trauma cranico ed un automobilista la cui auto venne colpita dall'apparecchio, riportando un trauma vertebrale [41]. Un pesante bilancio, che poteva aggravarsi ulteriormente stante la quantità di traffico, pedonale ed automobilistico, generalmente molto più intenso sulla via interessata.

Per quanto concerne i danni materiali, sono state schiacciate dal peso del metallo e delle zavorre varie autovetture posteggiate sulla via, mentre un edificio residenziale ha subito un danno in corrispondenza di un balcone al secondo piano, contro il quale il braccio estensibile dell'autogrù ha fermato la sua caduta (Figura 31). Oltre i danni a terzi, vi è chiaramente la perdita della gru e di parte dell'autogrù danneggiata, di proprietà di due diversi noleggiatori. Dato il processo ancora in corso, non si conosce ancora la quantificazione economica dei danni ed i risarcimenti complessivi per le vittime e feriti.

Al momento presente, gli indagati sono cinque e sono accusati di omicidio colposo: il manovratore dell'autogrù, il responsabile della ditta appaltatrice, il

coordinatore per l'esecuzione e progettazione dei lavori, l'ex titolare della ditta di noleggio dell'autogrù e il legale rappresentante di quella della gru [43].



Figura 31 - I danni del crollo [42]

3 | Incidenti con apparecchi di sollevamento

4

Misure di sicurezza per il montaggio

4.1 Premessa

In questo capitolo si vuole affrontare il tema della gestione della sicurezza durante le operazioni di sollevamento e di montaggio. Gli incidenti analizzati nel capitolo 3, oltre ad aver rimarcato la gravità degli effetti di un possibile crollo degli apparecchi di sollevamento, hanno evidenziato le cause scatenanti gli eventi. Queste sono state individuate grazie ai metodi dell'ingegneria forense, che

permettono di rispondere ai “perché” di certi incidenti, andando di conseguenza a denunciare gli errori commessi e tentando di prevenire quelli futuri, oltre ad attribuire le responsabilità dei fatti e dirimere le controversie legali. I casi analizzati hanno portato a domandarmi se le misure di sicurezza normalmente utilizzate in queste operazioni siano sufficienti a garantire l’incolumità di cose e persone presenti nel cantiere, considerando i rischi più probabili come la caduta di materiale dall’alto, trascurando il rischio di caduta dell’apparecchio di sollevamento perché statisticamente improbabile. Su questo tema, in Appendice A ho riportato un elenco dei crolli di gru edili fisse in Italia nell’arco temporale compreso fra il 2018 e 2022. Come risultato di questa analisi statistica, per quanto qualitativa e non esaustiva, ho ricavato una media di 2,2 crolli di apparecchi di sollevamento all’anno: rispetto alle migliaia di gru installate, questo numero risulta troppo basso per rendere il rischio di caduta della gru statisticamente rilevante e dunque da valutare nei piani di gestione della sicurezza sui cantieri. Il rischio di caduta di gravi dall’alto, invece, è assai più probabile: nel quinquennio 2008-2012, il 16,8% degli infortuni mortali sul lavoro in Italia ricade in tale categoria [44]. Di questi, il 35,1% è relativo al settore delle costruzioni e la tipologia d’incidente predominante riguarda proprio la movimentazione e sollevamento dei carichi (54,1%).

A fronte di un’analisi della normativa e della letteratura inerente a questo tema, si è appurata la presenza di disposizioni lacunose in materia di sollevamenti. Le criticità indicate in questo capitolo sono riferite alle operazioni di montaggio (e dunque smontaggio) di apparecchiature di sollevamento fisse, come le gru a torre. Tali attività risultano essere brevi e temporanee; per tale motivo possono non godere dello stesso livello di sicurezza e attenzione generalmente prestato alle altre lavorazioni. In primo luogo, si analizzeranno le fasi di montaggio di una gru a torre includendo le principali precauzioni di sicurezza da attuare, per poi fare una panoramica di quelle che sono le misure di prevenzione da adottare durante la fase di utilizzo dell’apparecchio. Di conseguenza, verrà analizzata la normativa e le sue criticità e si proporranno delle misure di sicurezza integrative. Queste verranno

applicate ad alcuni casi studio tramite una rappresentazione semplice e di chiara interpretazione, che possa servire da linea guida pratica.

4.2 Fase di montaggio e successivo smontaggio

La fase di montaggio di un apparecchio di sollevamento fisso risulta essere assai delicata, sia per lo svolgimento delle operazioni di allestimento in sé, sia perché da essa dipende la stabilità e solidità della gru durante il suo utilizzo. Le sequenze di montaggio di ogni apparecchio, ripetitive per loro natura, dovranno essere eseguite meticolosamente da personale specializzato, prestando attenzione a possibili variazioni per adattarsi allo specifico cantiere. La maggioranza delle operazioni saranno svolte in quota, perciò, oltre a scarpe antinfortunistiche e casco, i lavoratori dovranno essere muniti di adeguati sistemi di arresto caduta. Inoltre, gli elementi delle gru a torre più importanti sono dotati di dispositivi anticaduta quali parapetti o reti, che riducono o eliminano il rischio di caduta dall'alto.

Di seguito verranno riassunte le principali fasi di montaggio di una gru a torre semplice, l'apparecchio di sollevamento fisso più comune e diffuso nei cantieri edili. Le fasi di smontaggio sono pressoché analoghe, ma svolte in ordine inverso.

Posizionamento autogrù e allestimento area di lavoro

L'autogrù è il mezzo di sollevamento mobile necessario per il montaggio degli elementi della gru a torre; a seconda della grandezza degli elementi da sollevare e delle distanze da coprire, le dimensioni di questo apparecchio mobile possono variare e può risultare necessario l'impiego di più di un'autogrù. Il posizionamento dell'automezzo andrà scelto accuratamente, in modo tale da poter raggiungere ogni punto necessario al montaggio col minor sbraccio possibile e al contempo permettere lo scarico delle sezioni della gru – dagli autocarri a terra – senza compromettere la viabilità di cantiere. La postazione dovrà essere determinata anche in base alle condizioni del suolo, il quale dovrà essere piano e

sufficientemente solido, tale da supportare il peso del mezzo tramite gli stabilizzatori. Risulterà opportuno verificare la presenza di tubazioni o cavità nel sottosuolo, per evitare cedimenti imprevisti. L'area di lavoro dovrà essere adeguatamente recintata, per contenere l'ingombro degli automezzi (Figura 32).



Figura 32 - Posizionamento autogrù e allestimento area di lavoro [45]

Approvvigionamento e assemblaggio del carro di base e zavorre

Il carro di base è il primo componente della gru ad essere installato; dato il suo ingombro, i suoi pezzi vengono trasportati e poi assemblati in sito nella posizione finale. Esso può poggiare direttamente su un piano cementizio o sul terreno, se questi dispongono delle caratteristiche sufficienti al sostenimento del carico, oppure su fondazioni appositamente create – alcune considerazioni sulle verifiche strutturali sul basamento sono riportate nel capitolo 4.3.1. Quando il carro di base risulta essere pronto ad accogliere le zavorre, esse vengono approvvigionate tramite autocarro e poste in posizione (Figura 33). L'imbracatura dei blocchi avviene tramite appositi occhielli d'acciaio predisposti dal manifattore, che facilitano l'aggancio e lo sgancio. Il sollevamento delle zavorre, così come di ogni altro elemento della gru, andrà eseguito lentamente nei primi istanti per assicurare il corretto dispiegamento delle brache e l'equilibrio del pezzo; successivamente, la

movimentazione potrà procedere più speditamente. Infine, il tiro andrà allentato gradualmente prima dello sgancio della zavorra.



Figura 33 - Carro di base in posizione con zavorre [45]

Approvvigionamento degli elementi della torre e montaggio

A differenza del carro di base, gli elementi della torre della gru giungono sugli autocarri pronti per essere montati. Dopo essere scaricati a terra in posizione orizzontale, i moduli della torre vengono imbracati nei punti predisposti e si procede con il sollevamento di un'estremità, mentre l'altra striscia a terra. Raggiunta la posizione verticale, il pezzo viene trasportato nella posizione finale, dove i montatori in quota eseguono l'innesto e liberano l'imbraco (Figura 34, Figura 35 e Figura 36). Infine, il modulo viene fissato tramite bulloni o spinotti e si procede con il montaggio del pezzo successivo. Gli elementi della ralla e dell'eventuale cuspide vengono assemblati con la medesima procedura, se questi non sono già inclusi in altri moduli (della torre o dei bracci).

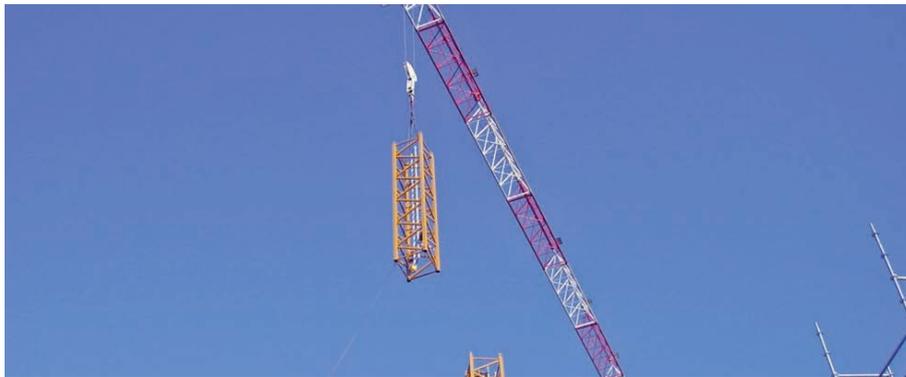


Figura 34 - Sollevamento di un elemento della torre [45]



Figura 35 - Avvicinamento dell'elemento alla torre [45]



Figura 36 - Fissaggio dell'elemento alla torre [45]

Approvvigionamento controbraccio e montaggio

Il controbraccio (o controfrecchia) è il primo elemento orizzontale ad essere montato dopo il completamento della torre, il quale permetterà l'alloggiamento delle zavorre che andranno a bilanciare il carico del braccio principale. Il modulo, poggiato a terra, andrà preparato con la messa in posizione dei tiranti, già incernierati in una delle estremità. Verrà poi imbracato negli occhielli predisposti a garantire l'equilibrio e sollevato in posizione, incastrandolo nelle cerniere collocate sulla struttura della torre. Con il controbraccio ancora trattenuto dall'autogrù, si completeranno i collegamenti dei tiranti, prima di abbassare l'elemento, che rimarrà in posizione.

Approvvigionamento zavorra e montaggio

La massa del controbraccio andrà incrementata per garantire l'equilibrio al ribaltamento della gru a torre; ciò viene realizzato posizionando nell'estremità libera alcune zavorre in calcestruzzo opportunamente sagomate (Figura 37). Queste verranno sollevate in modo analogo agli elementi verticali della torre della gru, in quanto si troveranno in posizione orizzontale a terra e andranno verticalizzate. Per evitare il ribaltamento della torre in questa fase, può essere necessaria l'installazione di un numero ridotto di zavorre, che sarà poi incrementato non appena il braccio verrà montato.



Figura 37 - Controbraccio posizionato con zavorre [45]

Approvvigionamento, assemblaggio a terra del braccio e installazione

L'installazione del braccio della gru avviene in modo simile a quanto visto per il controbraccio; essendo il primo elemento più lungo del secondo, però, può richiedere il montaggio di più moduli che andranno a comporlo. Questo assemblaggio viene generalmente svolto a terra, per facilitare e velocizzare le operazioni di connessione degli elementi di innesto (Figura 38). Non appena i moduli e i tiranti sono connessi e pronti all'installazione, il pezzo viene sollevato in posizione e fissato come visto per il controbraccio (Figura 39).



Figura 38 - Montaggio a terra del braccio [45]



Figura 39 - Installazione in quota del braccio e collegamento dei tiranti [45]

Completamenti in quota

Terminato l'assemblaggio dei componenti strutturali, occorre eseguire alcuni completamenti in quota per ultimare il montaggio della gru. Queste operazioni riguardano i collegamenti elettrici definitivi e meccanici necessari al funzionamento dell'apparecchio. Dopo questa fase tutti i meccanismi della gru risulteranno operativi, sia i motori, sia i comandi elettrici, sia i dispositivi di sicurezza.

4.3 Fase di esercizio

L'accurato montaggio e posizionamento degli apparecchi di sollevamento non è condizione sufficiente a garantire la sicurezza degli stessi. Durante la fase di esercizio, ed in generale durante la vita utile dei macchinari, numerosi controlli, verifiche ed accorgimenti devono essere adottati per eliminare o ridurre al minimo i rischi, che possono essere relativi agli apparecchi stessi o relativi alla fase di utilizzo.

4.3.1 Sicurezza dell'apparecchio

Nel D.Lgs. 81/2008 (Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro), l'art.71 comma 8 sancisce che dopo la prima installazione e messa in esercizio, il datore di

lavoro deve sottoporre l'apparecchio di sollevamento ad un certo numero di verifiche e controlli iniziali, ripetendo alcune procedure in seguito ad ogni installazione in un nuovo cantiere [46]. Oltre a queste, controlli periodici e straordinari saranno necessari per assicurare la buona conservazione e l'efficienza dei mezzi di sollevamento durante la loro vita, e dovranno essere svolti da persona competente. I risultati dei controlli, riportati per iscritto, devono essere conservati e tenuti a disposizione degli organi di vigilanza, insieme al resto della necessaria documentazione.

In primo luogo, si considera la *manutenzione prevista dal fabbricante*: il manifattore della gru, infatti, prevede una serie di verifiche periodiche, contenute nel libretto d'uso e manutenzione dell'apparecchio. Queste possono includere controlli e ispezioni visive, sostituzioni o pulizia di componenti e ingrassamento di parti meccaniche, per citarne alcuni. Dovranno essere eseguiti dopo un certo numero di ore di utilizzo o dopo un dato tempo di vita dell'apparecchio e svolti, a seconda del tipo di verifica, dal gruista, dal responsabile della sicurezza o da officine autorizzate alla manutenzione. Nel caso le frequenze dei controlli non siano specificate, ci si può riferire a norme tecniche o codici di buona prassi. Il libretto d'uso e manutenzione deve essere rilasciato dal produttore, così come il libretto di registrazione degli interventi effettuati. Ciò risulta obbligatorio dall'emissione della direttiva macchine del 1996, la quale ha imposto la marcatura CE per gli apparecchi di sollevamento, ovvero alla dichiarazione di conformità.

L'art. 71 del D.Lgs. 81/08, comma 11, sancisce l'obbligo della *verifica periodica* di determinate attrezzature per il datore di lavoro, al fine di mantenerne lo stato di conservazione ed efficienza. La lista delle attrezzature è riportata nell'Allegato VII e include gli apparecchi di sollevamento da cantiere con portata superiore a 200 kg e non azionati a mano; nel medesimo allegato è indicata anche la frequenza delle ispezioni, che per tali mezzi è annuale. La prima verifica è svolta

dall'INAIL; le successive sono svolte o dallo stesso ente, o dall'ARPA, o da soggetti abilitati il cui elenco è contenuto nel D.D.G. n.62.

Vi è un altro controllo, imposto dal D.M. 11 aprile 2011 e contenuto nel Testo Unico, da eseguire sugli apparecchi di sollevamento messi in esercizio da più di vent'anni. Chiamata *indagine supplementare, verifica ventennale o calcolo dei cicli vita residui*, mira a individuare vizi, difetti e anomalie negli apparecchi. L'ingegnere esperto – così come definito nelle norme UNI, perché dotato di specifiche qualifiche – svolge un'indagine strutturale approfondita e redige una relazione in cui stabilisce la vita residua dell'apparecchio. Il controllo della solidità delle saldature metalliche e componenti strutturali viene eseguito tramite ispezioni visive e controlli non-disruttivi (prove con liquidi penetranti o prove magnetoscopiche); inoltre saranno richieste prove funzionali e di funzionamento. Se le verifiche periodiche sono mirate a controllare il corretto funzionamento della macchina, l'indagine supplementare è volta a verificare anche l'efficienza strutturale dell'apparecchio.

Oltre ai controlli diretti sulla macchina, sono fondamentali le *ispezioni degli accessori di sollevamento*. Ganci, funi, catene e simili richiedono verifiche periodiche trimestrali; il datore di lavoro deve far sì che vengano svolte entro i termini di legge e deve annotarle nel registro di controllo [47]. I metodi di ispezione possono essere semplici controlli visivi, test non-distruittivi, test funzionali (per i dispositivi elettronici e meccanici) e test operativi, come prove di sollevamento con e senza carico. Altri accessori, come le fasce in poliestere, richiedono invece ispezioni visive giornaliere prima del loro utilizzo, per individuare deterioramenti pericolosi (che possono essere causa di incidenti catastrofici, come quello riportato nel capitolo 3.2.2).

Vi sono alcuni controlli da svolgersi antecedentemente al montaggio per garantire la sicurezza dell'apparecchio, come la *verifica strutturale del basamento*. L'ingegnere strutturista sarà incaricato di verificare se le caratteristiche di

resistenza del terreno sono sufficienti a garantire il supporto e la stabilità del mezzo di sollevamento e se vi è necessità di compattare lo strato su cui poggia. Le informazioni sul terreno verranno desunte dalla relazione geotecnica relativa al terreno di cantiere. Dunque, si valuterà se le zavorre richieste per l'equilibrio dell'apparecchio possano essere supportate dal terreno; nel caso in cui questo non sia possibile, sarà necessaria la progettazione di una fondazione di base, per mezzi di sollevamento fissi. A seconda della tipologia del suolo, solette o plinti, eventualmente poggiati su pali o micropali, dovranno essere previsti e dimensionati dall'ingegnere. Un'altra verifica da svolgersi prima del montaggio è riguarda le *interferenze con il traffico aereo*, nel caso di cantieri collocati in prossimità di aerovie. Si dovranno analizzare i coni di decollo e atterraggio di eventuali aerovie di avvicinamento aeroportuale (Figura 40), i quali potranno limitare lo sviluppo in altezza della gru, portare all'installazione di luci di segnalazione in sommità e alla colorazione – in tonalità di bianco e rosso – delle sezioni più elevate della torre e dei bracci. Inoltre, è obbligatoria la denuncia per l'utilizzo di comandi a radiofrequenza, che possono interferire con gli strumenti di aviazione.

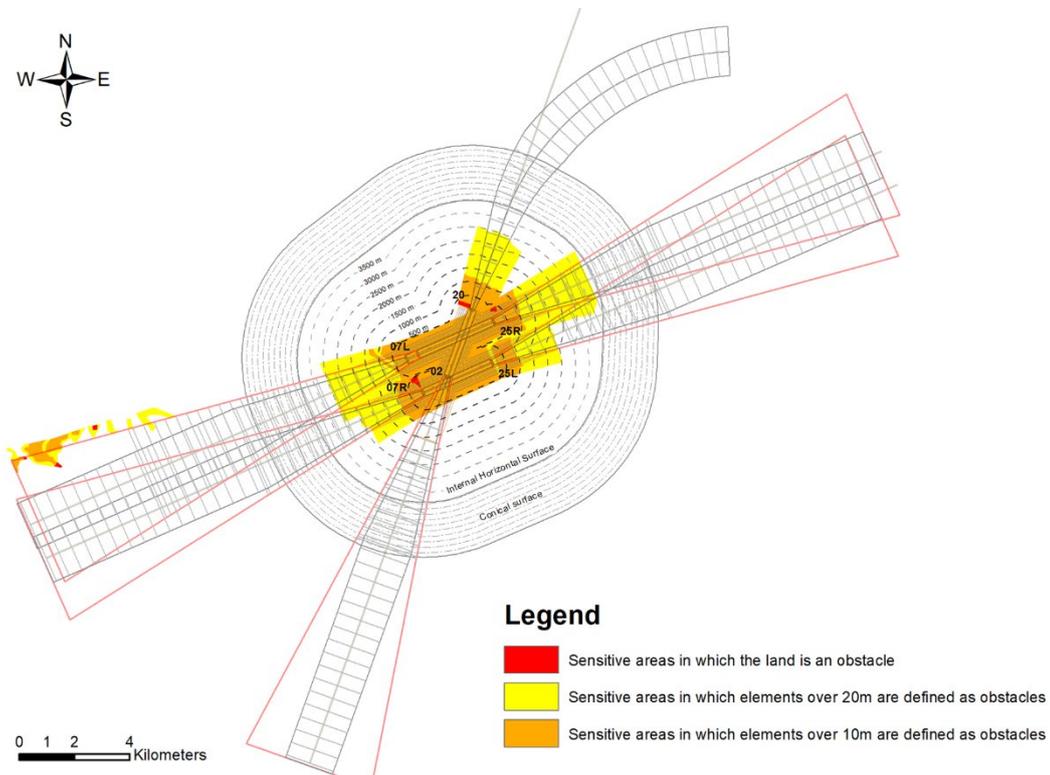


Figura 40 - Individuazione dei coni di decollo e atterraggio e aree di ostacolo [48]

4.3.2 Sicurezza di utilizzo

In questo capitolo si analizzeranno alcune precauzioni da adottare al fine di ridurre i rischi propri dalla fase di utilizzo degli apparecchi di sollevamento. Avendo dimensioni considerevoli e muovendo carichi in un ampio spazio tridimensionale, questi mezzi generano interferenze con l'ambiente circostante, comportando pericoli per la sicurezza. In primis si analizzano le possibili *interferenze con ostacoli fissi*; la linea guida 359/99 dell'ISPESL (ora INAIL) fornisce un utile schema che racchiude i principali franchi di sicurezza da rispettare nei confronti di edifici o altri ingombri fissi (Figura 41) [49]. Le distanze devono necessariamente tenere conto della flessibilità delle strutture e degli ingombri dei carichi trasportati; questi franchi di sicurezza possono variare a seconda della norma tecnica e linea guida osservata.

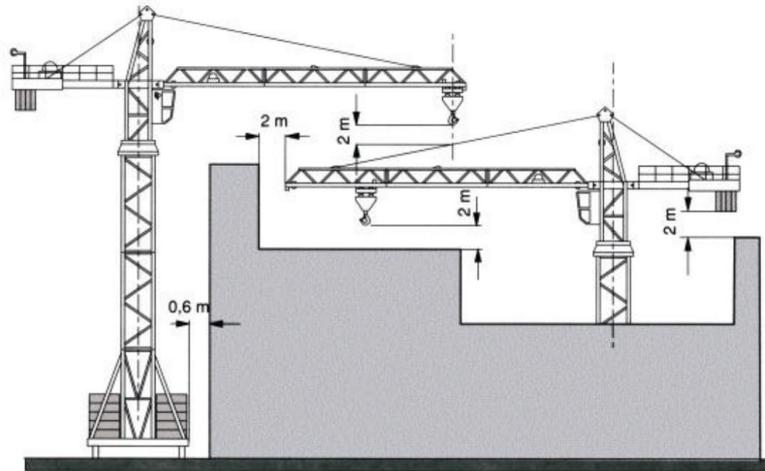


Figura 41 - Franchi minimi gru nei confronti di ostacoli fissi [49]

L'art. 117 del D.Lgs. 81/08 prescrive di mantenere a distanza di sicurezza gli apparecchi di sollevamento in prossimità di linee elettriche o parti attive non protette, nel caso in cui queste non possano essere messe fuori servizio o fisicamente protette. In questi casi, data la pericolosità della situazione, il franco di sicurezza aumenta fino a 6 metri [50].

Le interferenze con altri apparecchi di sollevamento fissi sono più difficili da gestire, data la possibile contemporaneità di utilizzo. L'area di interferenza è quella in cui vi è la possibilità che i bracci, le funi e i controbracci delle gru possano intersecarsi. È opportuno stabilire le precedenze tra i mezzi, le quote assolute e gli ingombri, le aree di sorvolo comuni e specificare le modalità e i sistemi di comunicazione tra gruisti; inoltre, devono essere identificate le figure responsabili ed i loro compiti. La difficoltà nel gestire la contemporaneità delle operazioni incrementa qualora vi siano più imprese a manovrare più apparecchi di sollevamento nella stessa area; in questi casi è necessario redigere un piano delle interferenze in cui si riportano le misure sopra citate, le quali verranno comunicate tramite apposita riunione di coordinamento. La precauzione principale è di rispettare le precedenze assegnate e ciò viene eseguito mediante un'adeguata comunicazione fra i gruisti, che dovranno accertarsi dell'avvenuta comprensione

dei reciproci messaggi. In Figura 42 si riporta un esempio di rappresentazione planimetrica delle aree di interferenza di numerose gru a torre, sia interferenti nello stesso cantiere, sia con un altro sito di costruzione.

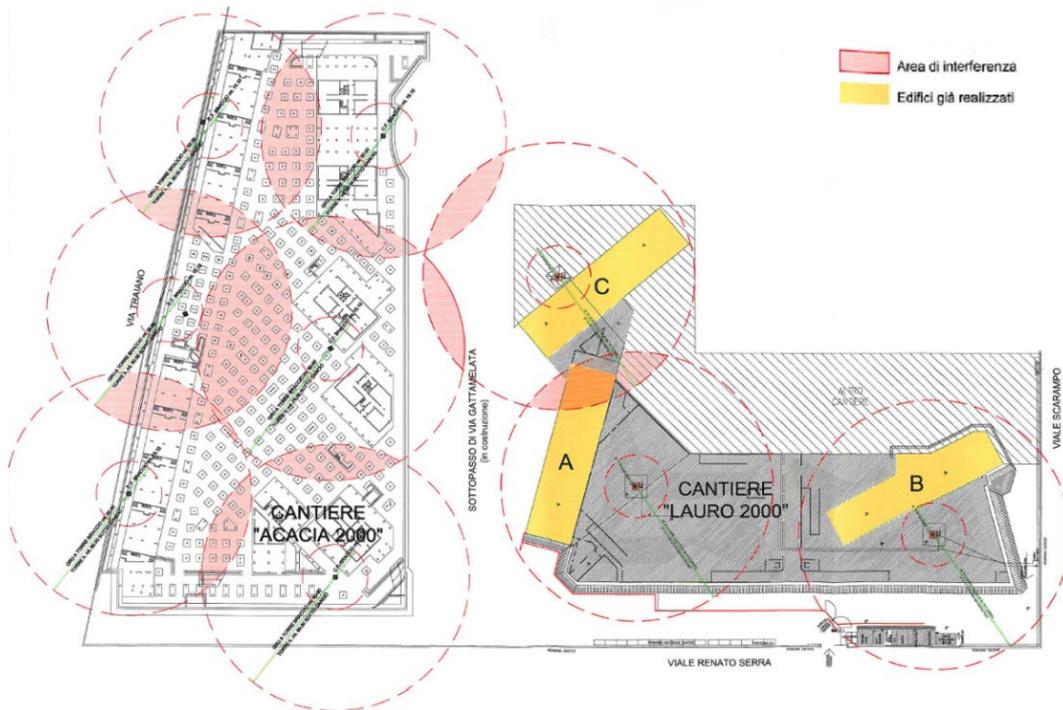


Figura 42 - Individuazione planimetrica delle aree di interferenza fra varie gru a torre

La gestione delle *interferenze a radiofrequenza*, fra i comandi radio dei vari apparecchi di sollevamento ed altri macchinari o attrezzature presenti in cantiere, deve essere pianificata accuratamente. Le frequenze dei telecomandi non devono mai sovrapporsi: nel caso ciò accada, i rispettivi segnali salterebbero causando il blocco improvviso delle apparecchiature. Questa misura automatica è atta a prevenire il rischioso ed involontario controllo di un mezzo mediante un radiocomando non proprio. Il pericolo di questa situazione di stallo raggiunta in modo brusco risiede nella mancata attivazione dei freni di sicurezza e blocchi dinamici; nel caso della gru a torre, questo comporta la rotazione libera del braccio ed in caso di vento esso può muoversi ed impattare il contesto circostante. Prima

del recupero di una nuova frequenza tramite il pulsante di emergenza possono passare diversi minuti, protraendo la situazione di pericolo.

L'area proiettata a terra dai bracci dei mezzi di sollevamento è circolare e spesso eccede l'area di cantiere. È necessario sviluppare una planimetria in cui si definiscono le *aree di sorvolo dei carichi sospesi*, al fine di stabilire le zone a terra su cui possono transitare i carichi in sospensione: queste aree devono essere contenute all'interno di quella di cantiere, ma possono anche essere limitate ad alcuni settori, per lasciare delle zone sicure all'interno dello stesso sito di costruzione (Figura 43). Operativamente questi limiti sono rispettati tramite le operazioni manuali del gruista, oppure possono essere imposti automaticamente all'apparecchio tramite dei dispositivi elettronici di anticollisione – programmati per lo specifico cantiere e automaticamente disattivati a gru spenta. In ogni caso, al passaggio dei carichi sospesi, lo stazionamento e il transito dei lavoratori deve essere interdetto nelle zone soggette al pericolo di caduta materiali dall'alto.

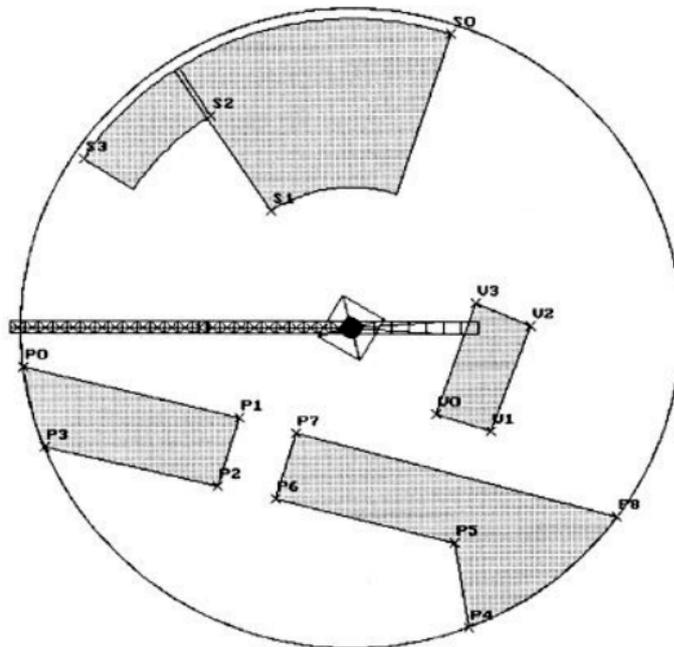


Figura 43 - Evidenziazione zone interdette [49]

Un altro tipo di zone da definire sono le *aree di carico e scarico*, specificate in planimetria. Nei pressi di queste, se sono presenti delle postazioni fisse di lavoro dovranno essere adeguatamente protette, ad esempio con tettoie. Durante le operazioni di imbracatura e sgancio dei carichi, sarà inoltre necessario gestire le interferenze con la movimentazione dei materiali, che può essere sia manuale, sia effettuata con altre attrezzature o apparecchi di sollevamento mobili.

Il personale incaricato ad operare i mezzi di sollevamento ricopre un ruolo fondamentale per la sicurezza nella fase di utilizzo. Come da normativa, il datore di lavoro deve fornire sufficiente *informazione, formazione ed addestramento* sui rischi derivanti dall'utilizzo dell'attrezzatura ai lavoratori (art. 36 e art. 37). Essendo apparecchi che richiedono conoscenze e responsabilità particolari, la formazione degli incaricati ad operare i mezzi di sollevamento dovrà essere adeguata e specifica (art. 73). Per la gru a torre, contenuta nell'accordo per l'individuazione delle attrezzature di lavoro per le quali è richiesta una specifica abilitazione degli operatori, vengono specificati i contenuti del corso di formazione, comprendente un modulo giuridico normativo, un modulo tecnico, un modulo uno pratico ed una prova di valutazione. Al gruista ed agli operatori a terra – imbracatori ed eventuale segnalatore di manovre – sarà richiesta, di volta in volta, una formazione specifica per ogni nuovo cantiere nel quale vengono illustrate le peculiarità dello stesso. Ai lavoratori dovranno inoltre essere forniti adeguati dispositivi di protezione individuale e la necessaria sorveglianza sanitaria.

Prima dello svolgersi delle operazioni di sollevamento, è buona prassi *individuare le posizioni e il numero* di imbracatori a terra e segnalatori, oltre alla definizione precisa delle mansioni di ognuno. Anche la postazione del gruista, se non operante in cabina, dovrà essere determinata, in base alla migliore visibilità e controllo delle operazioni. Durante lo sviluppo del cantiere, è probabile che questa posizione cambi nel tempo: ciò può generare problemi nella gestione dei mezzi di sollevamento. Sarebbe opportuno individuare le postazioni del gruista in anticipo,

così da ridurre le possibili interferenze, eventualmente creando degli spazi appositi per l'operatore.

Alcune delle procedure svolte durante le operazioni di sollevamento necessitano di particolare attenzione, affinché sia garantita la sicurezza in cantiere: una di queste è la corretta *imbracatura dei carichi*. In base al tipo di materiale da sollevare dovranno essere impiegati opportuni sistemi di imbraco; funi, fasce o catene dovranno essere installate garantendo sia la stabilità e l'equilibrio del carico, sia l'integrità e la solidità delle stesse brache. In particolare, si dovrà evitare che le fasce entrino in contatto con spigoli vivi e che le funi subiscano piegature con raggi di curvatura troppo stretti. La portata delle brache si riduce anche in relazione all'angolo di inclinazione formato fra le funi e la verticale; in Figura 44 si riporta un'illustrazione esemplificativa di questa situazione e della riduzione percentuale della portata. Tutti gli accessori di sollevamento, ganci compresi, dovranno recare alcuni dati fondamentali, tra cui la marcatura *ce* ed il carico massimo di utilizzazione.

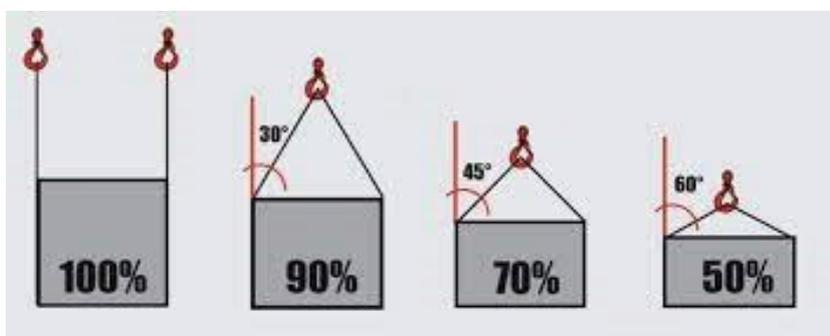


Figura 44 - Riduzione della portata delle brache in funzione dell'angolo di inclinazione [51]

Un'altra procedura fondamentale è la comunicazione tramite *segnali di manovra*, i quali vengono trasmessi dal segnalatore a terra al gruista, per facilitare una precisa movimentazione dei carichi o per superare limiti di visibilità. I gesti convenzionali, contenuti nell'allegato XXXII della normativa, dovranno essere conosciuti dai lavoratori ed eseguiti in modo preciso, al fine di non creare situazioni

di incomprensione. Questi segnali possono comunque subire variazioni o possono anche essere utilizzati altri sistemi di codici, impiegati internazionalmente. In Figura 45 si riportano a titolo esemplificativo alcuni gesti convenzionali a confronto: a sinistra quelli indicati nell'allegato XXXII, a destra quelli contenuti nella linea guida americana ASME B30.3 sulle gru a torre [52]. Si nota come alcuni gesti differiscano, o addirittura il medesimo segnale indichi due comandi diametralmente opposti.

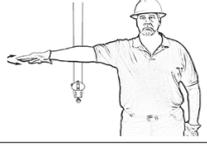
INIZIO DELLE OPERAZIONI / PRESA DI COMANDO		<i>NON SPECIFICATO</i>
PERICOLO / ARRESTO DI EMERGENZA		
STOP / FINE DELLE OPERAZIONI		
SOLLEVARE IL CARICO		

Figura 45 - Alcuni gesti convenzionali a confronto. Allegato XXXII a sinistra, ASME B30.3 a destra [46] [52]

4.4 Analisi della normativa e criticità individuate

Nel presente capitolo mi soffermerò su quelle che sono le criticità presenti nella normativa sulla sicurezza per quanto riguarda le operazioni di montaggio degli apparecchi fissi di sollevamento come le gru a torre. Il termine criticità qui intende la mancanza di alcune prescrizioni atte a garantire un adeguato livello di sicurezza sull'area di cantiere, oppure l'inapplicabilità di alcune disposizioni durante

operazioni di montaggio. Queste zone grigie della normativa sono state messe in luce grazie all'analisi di incidenti avvenuti con apparecchi di sollevamento – tra cui quelli riportati nel capitolo 3 – e basandosi sull'esperienza e sull'osservazione dei cantieri di installazione di gru.

Un primo punto da trattare riguarda l'art. 109 del Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro; questa sezione del decreto riguarda le disposizioni di carattere generale e l'articolo analizzato concerne le recinzioni di cantiere. Il testo riporta [46]:

1. Il cantiere, in relazione al tipo di lavori effettuati, deve essere dotato di recinzione avente caratteristiche idonee ad impedire l'accesso agli estranei alle lavorazioni.

L'articolo implica che tutta l'area in cui ho attività operativa dovrà essere recintata, con opportune barriere atte a impedire l'accesso a terzi nell'area di cantiere. Quando vengono svolte le operazioni di montaggio della gru, è probabile che l'area di cantiere si estenda rispetto a quella prevista per le normali operazioni di costruzione: gli ingombri dell'autogrù e degli autocarri non sempre riescono ad essere contenuti nel perimetro del cantiere. Di conseguenza, durante la fase di montaggio la recinzione dovrà essere temporaneamente ampliata, tale da contenere totalmente gli ingombri degli automezzi. Sovente, però, questa delimitazione viene realizzata creando una semplice segnalazione con nastri segnaletici bianchi e rossi o coni poggiati a terra: ciò non costituisce un'effettiva segregazione dello spazio di lavoro, e dunque le richieste dell'articolo 109 non sono soddisfatte. In Figura 46 e in Figura 47 si riportano esempi di insufficiente e inadeguata recinzione. Nel momento in cui si installa una recinzione adeguata, non è sempre garantita la totale segregazione: la criticità sta nel continuo ingresso e uscita dei mezzi dal cantiere, che implica la costante chiusura ed apertura degli accessi. Inoltre, in luoghi ristretti e su suolo pubblico, spesso la strada diventa l'area di cantiere, e le manovre dei mezzi pesanti risultano problematiche; per permettere dunque il transito e lo scorrimento degli autocarri la recinzione può risultare aperta su più lati quasi

costantemente, per garantire il susseguirsi degli approvvigionamenti. In tali casi, per garantire la continua segregazione, sarebbe necessario avere un operatore addetto al controllo del traffico degli automezzi e alla chiusura ed apertura delle recinzioni.



Figura 46 - Insufficiente segregazione dello spazio lavorativo e inadeguato metodo di recinzione (semplice nastro segnaletico biancorosso)



Figura 47 - Possibilità di transito di persone estranee al cantiere in prossimità dell'area di carico/scarico materiali

La corretta applicazione dell'articolo 109 del D.Lgs. 81/08 non va comunque a garantire la delimitazione delle aree di suolo pubblico su cui possono sorvolare i materiali sollevati durante le operazioni di montaggio. In questi casi, ovvero quando vi è l'impossibilità di garantire il divieto di sorvolo di aree accessibili a terzi, diventa necessaria la definizione preventiva di aree in cui limitare temporaneamente l'accesso a persone estranee al cantiere. In fase di progetto, questa zona andrà definita nel Piano di Sicurezza e Coordinamento considerando la proiezione a terra degli elementi sollevati, con i dovuti margini di sicurezza individuati tenendo conto delle possibili dinamiche di caduta dei pezzi. In fase di esecuzione, dovranno essere presenti movieri a terra che regoleranno il traffico pedonale e veicolare, e dunque limiteranno temporaneamente l'area indicata sulle planimetrie del PSC. In Figura 48, Figura 49 e Figura 50 in si riportano esempi di sollevamento e montaggio a terra di parti di una gru che avvengono senza adeguata recinzione e pericolosamente prossimi a persone estranee al cantiere.



Figura 48 - Montaggio a terra del braccio con assenza di recinzione e possibilità di transito di persone estranee al cantiere



Figura 49 - Sollevamento del braccio in prossimità di terzi, con mancata regolazione del transito pedonale



Figura 50 - Sollevamento e scarico di elementi della gru in prossimità di terzi, con mancata regolazione del transito pedonale

Si vuole ora fare un inciso su quella che è la definizione della fase di sollevamento: essa inizia quando il materiale si stacca dalla posizione di presa – sia essa a terra o in quota – e termina quando ha raggiunto la posizione finale e viene sganciato dall'apparecchio. Di conseguenza, le fasi di imbracatura fanno parte del sollevamento fin tanto che vi è il collegamento fra il materiale e il macchinario utilizzato per la movimentazione. I rischi propri della fase di sollevamento si ripercuotono dunque a tutto ciò che risulta connesso all'apparecchio: nel montaggio di una gru a torre, vi sono momenti in cui gli elementi di questa risultano collegati sia alla gru, strutturalmente, sia all'autogrù, tramite imbraco. Nel caso di incidenti, la magnitudo degli effetti risulta amplificata, in quanto le eventuali sollecitazioni di uno si ripercuotono anche all'altro mezzo: si pensi a quanto accaduto nell'incidente del caso studio. Al fine di definire e rendere note all'interno del cantiere l'inizio e la fine della fase di sollevamento, sarà necessario stabilire un'efficace comunicazione tra il gruista, i movieri e i segnalatori. La cooperazione e il dialogo fra i lavoratori costituirà la base per una movimentazione sicura dei carichi e per la gestione delle aree di sorvolo.

Consideriamo ora, nello specifico, i casi di montaggio di gru a torre che avvengono su suolo pubblico, in particolare su vie interessate da traffico veicolare e/o pedonale. A fronte di quanto trattato nei punti precedenti si potrebbe pensare che, per garantire un grado di sicurezza più elevato, possa essere necessario chiudere al traffico l'intera via per la durata delle lavorazioni. Di conseguenza la segregazione dell'area operativa risulterebbe molto più ampia e comprenderebbe ogni margine di sicurezza per l'eventuale caduta di materiale dall'alto. La presenza a terra di movieri che regoleranno il traffico non sarebbe più necessaria, se non per la gestione del traffico di cantiere e per la chiusura ed apertura della recinzione. Inoltre, una chiusura totale del suolo pubblico potrebbe garantire un'ulteriore protezione da eventi catastrofici come il crollo della gru, riducendo l'impatto su terzi. Tuttavia, bisogna chiedersi quando e se questa sia una misura necessaria, dal momento che recherebbe un'interferenza non trascurabile al traffico cittadino; ciò

dovrà essere valutato anche in relazione all'importanza della via, alla sua dimensione e alla possibilità di utilizzare strade secondarie. Inoltre, mentre la caduta di materiale dall'alto è un rischio che deve essere preso in considerazione, la caduta dell'intera gru risulta statisticamente improbabile, per quanto i suoi effetti possano rivelarsi disastrosi. Se tale evento fosse preso in considerazione risulterebbe necessaria, oltre la chiusura del suolo pubblico, anche l'evacuazione dell'intero vicinato e delle abitazioni: una misura inopportuna e eccessiva.

A fronte di quanto trattato finora, le **criticità individuate** per le operazioni di installazione di una gru a torre e dunque le **specifiche misure di sicurezza per il montaggio e il sollevamento** sono:

1. **L'identificazione di un'area di cantiere a terra:** la superficie interessata da qualsivoglia lavorazione dovrà essere opportunamente recintata, rispettando le disposizioni dell'articolo 109.
2. **L'identificazione di un'area di sorvolo controllata:** la superficie, esterna all'area di lavorazione, sulla quale transitano carichi sospesi dovrà essere opportunamente gestita per garantire la sicurezza delle persone esterne al cantiere e proteggerle dal rischio di caduta materiale dall'alto, considerando i franchi di sicurezza minimi.
3. **L'identificazione di specifiche misure di coordinamento:** si dovrà definire a priori la sequenza operativa, includendo accuratamente ogni fase atta al montaggio della gru. Sarà necessario stabilire un registro comunicativo impiegato dai lavoratori per la coordinazione delle loro mansioni e per gestire le operazioni in modo rigoroso.

4.5 Sviluppo delle misure integrative

Si analizzeranno ora le misure integrative identificate nel capitolo precedente, sviluppandone i contenuti e proponendo delle prescrizioni concretamente applicabili.

4.5.1 Identificazione di un'area di cantiere a terra

La superficie interessata da qualsivoglia lavorazione dovrà essere opportunamente recintata, rispettando le disposizioni dell'articolo 109.

L'area di carico e scarico, spesso non soggetta ad opportuna segregazione, dovrà essere contenuta nel perimetro della recinzione in quanto interessata dal transito di mezzi di cantiere, la loro sosta e l'approvvigionamento del materiale. Dunque, oltre ad essere interessata dalla movimentazione degli elementi della torre, l'area a terra sarà oggetto di stoccaggio dei pezzi, il loro montaggio (si consideri la superficie necessaria per l'assemblaggio del braccio della torre) e la loro imbracatura. L'area verrà dunque determinata in relazione a questi specifici fattori, ed essa varierà da cantiere a cantiere in quanto strettamente dipendente dalla conformazione del contesto e dalla disposizione prevista per l'autogrù, gli automezzi e le zone di stoccaggio e montaggio. La segregazione dovrà, come da articolo 109, impedire l'accesso a terzi; quindi, coni di segnalazione a terra non saranno sufficienti, così come nastri segnaletici bianchi e rossi. Le recinzioni più adeguate allo scopo risultano essere le reti zincate, che con la loro leggerezza sono rapidamente installabili e facilmente manovrabili. Quest'ultima caratteristica appare importante nel momento in cui i movieri debbano aprire e chiudere gli ingressi all'area per consentire gli approvvigionamenti da autocarri.

4.5.2 Identificazione di un'area di sorvolo controllata

La superficie, esterna all'area di lavorazione, sulla quale transitano carichi sospesi dovrà essere opportunamente gestita per garantire la sicurezza delle persone esterne al cantiere e proteggerle dal rischio di caduta materiale dall'alto, considerando i franchi di sicurezza minimi.

Su tali aree non si potrà prescrivere il divieto di sorvolo poiché il montaggio, nei casi in cui avvenga su suolo pubblico, richiede necessariamente il transito degli elementi su zone a rischio. Non si potrà neanche recintare l'intera area di sorvolo come da articolo 109, dal momento che questa non è un'area di lavorazione. Inoltre, questo comporterebbe un notevole disagio al pubblico e vorrebbe dire, nella maggior parte dei casi, chiudere ampie zone di strade e bloccare totalmente il traffico veicolare e pedonale per l'intera durata delle operazioni di montaggio. Dovrà dunque essere indicata nel PSC o POS l'area interessata dal sorvolo dei carichi, considerando gli opportuni franchi di sicurezza. Tale area viene stabilita considerando innanzitutto gli ingombri degli elementi da sollevare e rappresentando a terra la superficie da loro attraversata, dall'inizio della fase di sollevamento alla fine della stessa. Poi, questa superficie verrà incrementata del dovuto margine di sicurezza che tiene conto di una caduta del carico non verticale, a causa di possibili oscillazioni o meccanismi di rottura tali da sbilanciare il materiale sollevato. A fronte di ciò, saranno necessari movieri a terra che gestiranno l'area indicata, fermando il traffico veicolare e pedonale all'inizio della fase di sollevamento e ripristinandolo nel momento della sua conclusione.

Il franco di sicurezza può essere determinato considerando le verticali di caduta del carico in corrispondenza delle estremità e inclinandole di un certo angolo, al fine di creare una fascia conica sul piano verticale che si tradurrà in una superficie a terra. In Figura 51 si fornisce una rappresentazione schematica della campana: ho considerato il sollevamento di un elemento della torre, a sinistra, e del braccio, a destra. Le quote sono relative ad una gru a torre con altezza sotto gancio

di 30 metri e moduli della torre di 8 metri sollevati ad una quota di 26 metri. Per il braccio si è applicato un angolo di 15° , sufficiente a garantire un adeguato margine di sicurezza; per i moduli della torre, invece, si è incrementato l'angolo a 30° in quanto la verticalità del pezzo, in caso di caduta, comporta il suo ribaltamento e quindi la possibile interferenza su un'area maggiore. Come si può notare, per il modulo della torre il franco di sicurezza di 13 metri è sufficiente a contenere l'intera lunghezza del pezzo, compreso un margine per l'eventuale suo ribalzamento o scivolamento. In Figura 52, invece, si rappresenta l'area di sorvolo a terra e il margine di sicurezza.

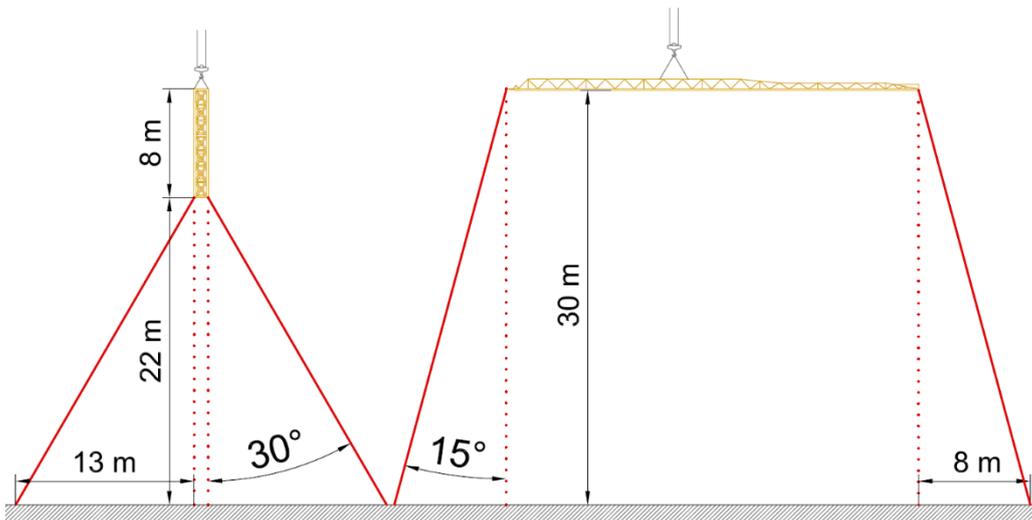


Figura 51 - Franchi di sicurezza per gru a torre di 30 metri

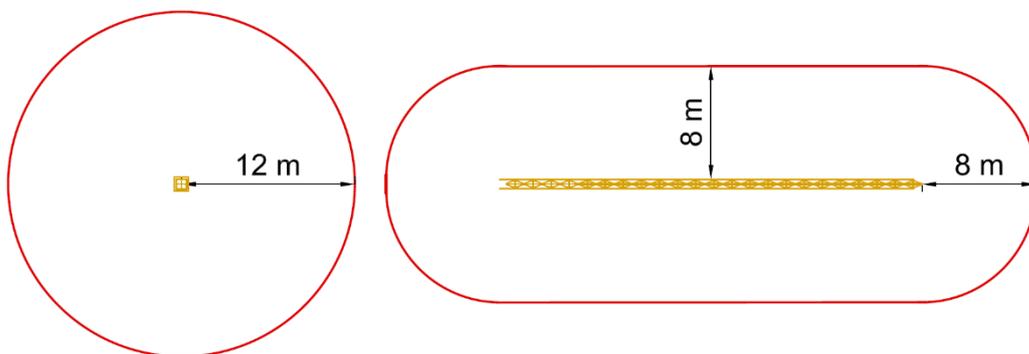


Figura 52 - Franchi di sicurezza proiettati a terra per gru a torre di 30 metri

Lo stesso ragionamento è stato applicato ad una gru a torre con altezza sotto gancio di 50 metri e moduli della torre di lunghezza 12 metri, sollevati a 38 metri. Gli angoli della campana sono sempre 30° per gli elementi verticali e 15° per quelli orizzontali. In Figura 53 e in Figura 54 si riportano i margini di sicurezza sul piano verticale ed orizzontale. L'incremento dei franchi rispetto al caso precedente è coerente con l'aumento delle dimensioni degli elementi.

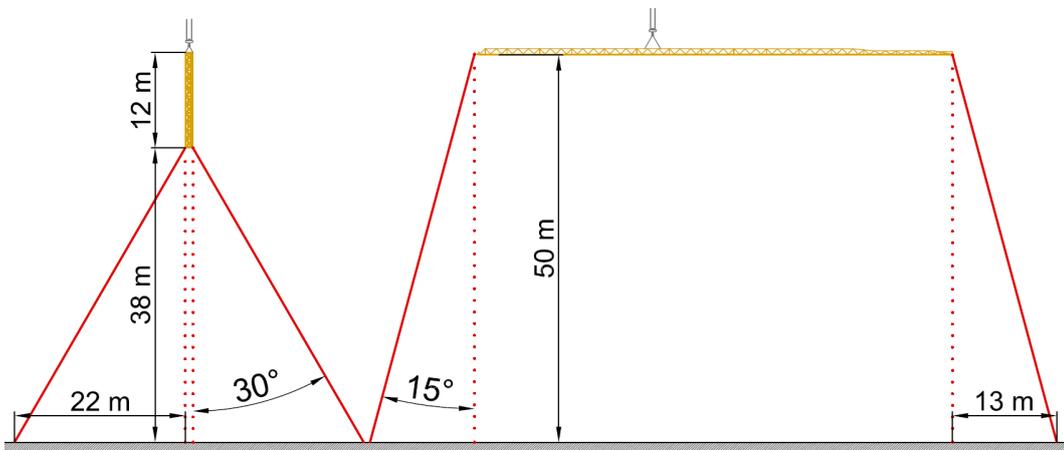


Figura 53 - Franchi di sicurezza per gru a torre di 50 metri

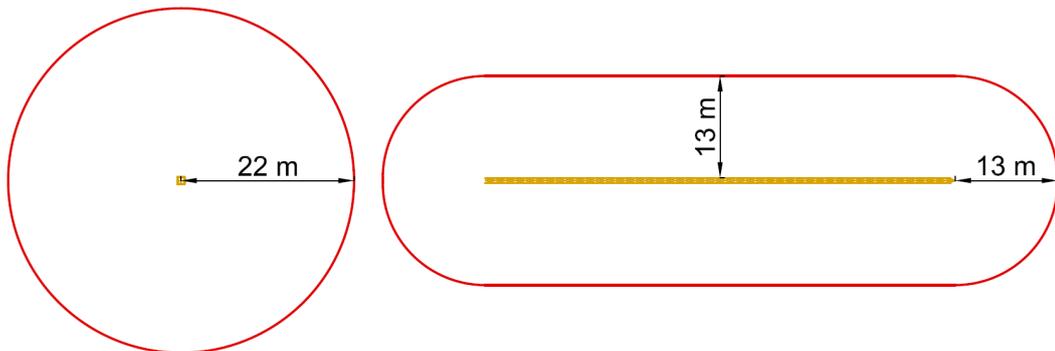


Figura 54 - Franchi di sicurezza proiettati a terra per gru a torre di 50 metri

Si vuole precisare come, a seconda delle dimensioni degli elementi e delle quote massime di sollevamento, gli angoli della campana e dunque i franchi di sicurezza a terra possano variare al fine di garantire un'adeguata protezione dal rischio di caduta dei carichi. Inoltre, i moduli della torre e il braccio sono due degli

elementi più critici per il sollevamento, in quanto le loro dimensioni e quote di montaggio determinano dei franchi considerevoli, mentre per altri elementi possono essere sufficienti angoli della campana – e dunque margini a terra – minori.

4.5.3 Identificazione di specifiche misure di coordinamento

Si dovrà definire a priori la sequenza operativa, includendo accuratamente ogni fase atta al montaggio della gru. Sarà necessario stabilire un registro comunicativo impiegato dai lavoratori per la coordinazione delle loro mansioni e per gestire le operazioni in modo rigoroso.

Nello specifico, si dovrà individuare la sequenza operativa relativa alla fase di sollevamento, da riportarsi nel PSC o POS. I vari step necessari al montaggio degli elementi consistono in: imbraco, inizio del sollevamento e guida del pezzo, fase di sorvolo, ricezione in quota, fissaggio alla struttura, fine del sollevamento con sgancio delle brache. La squadra operativa è composta da: gruista dell'autogrù, segnalatori di manovra, imbracatori a terra, montatori in quota, movieri per la gestione delle aree di sorvolo. Al fine di gestire rigorosamente le operazioni di sollevamento e permettere il coordinamento dei lavoratori e i loro incarichi, sarà necessario adottare un chiaro ed univoco registro comunicativo. Lo scambio di informazioni avverrà via radio e dovrà esserci un feedback tra i lavoratori per confermare la ricezione del messaggio (e.g. "ricevuto"). Di seguito si riporta uno schema di sequenza comunicativa, considerando coinvolti e responsabili del passaggio di informazioni il gruista, un imbracatore, un montatore in quota e tre movieri. Si considera anche un eventuale preposto (capocantiere), incaricato di fermare il transito sulla superficie interessata dal sorvolo dei carichi all'interno del cantiere. Oltre al registro comunicativo verbale, si definiranno i precisi segnali di manovra con cui i segnalatori forniranno le corrette indicazioni di sollevamento al gruista; come indicato nel capitolo 4.3.2, questi possono essere tratti da normativa o linee guida ed eventualmente modificati.

Imbracatura del pezzo da parte dei lavoratori a terra

IMBRACATORE : « *Elemento imbracato. Pronto per il sollevamento. »*

MOVIERE 1 : « *Moviere 1. Ricevuto. »*

MOVIERE 2 : « *Moviere 2. Ricevuto. »*

MOVIERE 3 : « *Moviere 3. Ricevuto. »*

PREPOSTO : « *Capocantiere. Ricevuto. »*

Blocco del transito sulle aree di sorvolo esterne al cantiere da parte dei movieri e blocco del transito interno al cantiere da parte del preposto

MOVIERE 1 : « *Moviere 1. Pronto per il sorvolo. »*

MOVIERE 2 : « *Moviere 2. Pronto per il sorvolo. »*

MOVIERE 3 : « *Moviere 3. Pronto per il sorvolo. »*

PREPOSTO : « *Capocantiere. Pronto per il sorvolo. »*

GRUISTA : « *Inizio del sollevamento. »*

Inizio fase di sollevamento e movimentazione del carico verso la posizione finale

Ricezione da parte dei montatori in quota, fissaggio e sgancio delle brache

MONTATORE : « *Elemento fissato. Brache sganciate. »*

GRUISTA : « *Fine del sollevamento. »*

MOVIERE 1 : « *Moviere 1. Ricevuto. »*

MOVIERE 2 : « *Moviere 2. Ricevuto. »*

MOVIERE 3 : « *Moviere 3. Ricevuto. »*

PREPOSTO : « *Capocantiere. Ricevuto. »*

Ripristino del traffico sulle aree di sorvolo da parte dei movieri e del preposto

Imbracatura del pezzo seguente da parte dei lavoratori a terra

4.6 Applicazione delle misure integrative

Le misure di sicurezza integrative per il montaggio di gru a torre, individuate nei paragrafi precedenti, si vedranno qui applicate a tre casi studio localizzati nella città di Torino. I primi due sono esempi di cantiere con cui mi sono interfacciato durante il mio percorso di studi, il terzo coincide con il caso del crollo di via Genova, descritto nel capitolo 3.3.

4.6.1 Primo caso studio: corso Luigi Einaudi

Il primo caso studio che affronto riguarda il montaggio di una gru a torre in un'area pedonale situata sull'incrocio fra corso Luigi Einaudi e corso Mediterraneo. L'apparecchio di sollevamento è destinato a lavorazioni sui civici 63 e 65 di corso Einaudi, di 8 e 9 piani fuori terra rispettivamente. Si è scelto di analizzare questo caso in una duplice configurazione del cantiere, con diversa collocazione dell'autogrù, in modo tale da valutarne l'impatto sulla viabilità circostante. Le dimensioni della gru che determinano i franchi di sicurezza più critici, ovvero quelli che implicano una superficie di sorvolo maggiore, sono:

- Modulo della torre, di altezza 12 metri e quota massima di sollevamento di 33 metri, corrispondente ad un franco di 19 metri;
- Braccio, di lunghezza 50 metri e quota massima di sollevamento di 45 metri, corrispondente ad un franco di 12 metri.

Configurazione n. 1

La prima configurazione vede l'autogrù posizionata sul controviale di corso Einaudi: in Figura 55 i due mezzi di sollevamento sono inseriti nel contesto tridimensionale, con una rappresentazione qualitativa. Nella planimetria di Figura 56, in modo più preciso, ho indicato la disposizione della recinzione che va a definire l'area di lavorazione a terra, ovvero l'area di cantiere: questa è tratteggiata

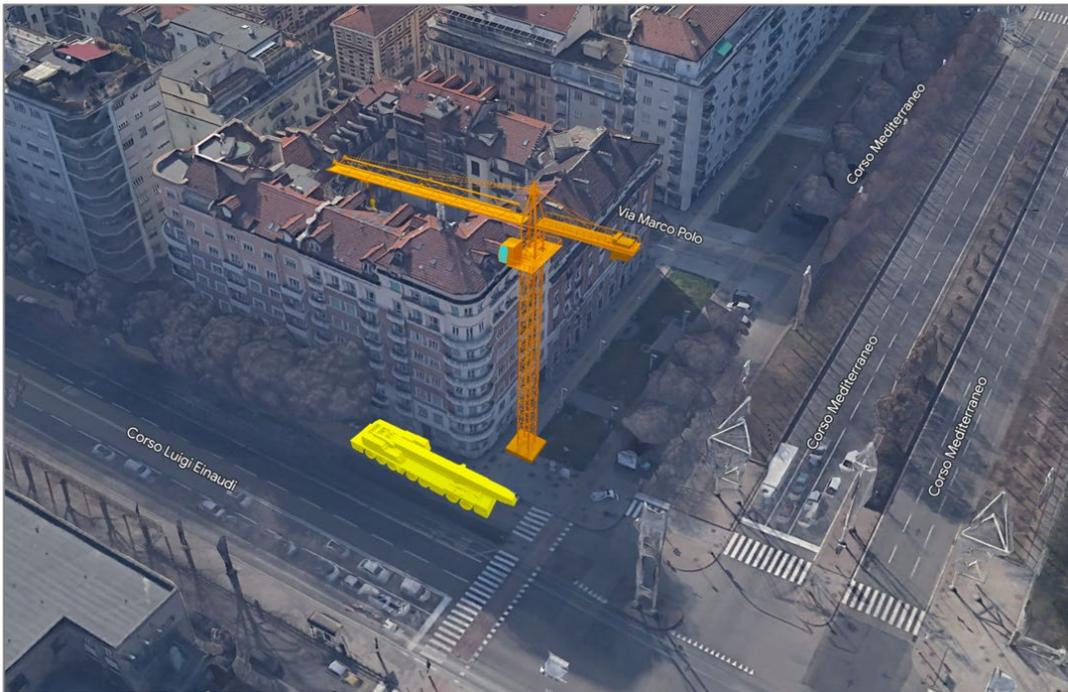


Figura 55 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su corso Einaudi



Figura 56 - Configurazione del cantiere su corso Einaudi

in verde e comprende anche il cortile interno dei civici 63-65, utilizzato per lavori non relativi al montaggio della gru. A sud si evidenzia una zona di cantiere stretta e lunga, destinata al montaggio del braccio della gru e posizionata in modo da non interferire con gli accessi pedonali alle abitazioni. A nord si collocano l'ingresso e l'uscita al cantiere per gli automezzi; queste sono coincidenti e sono rappresentate dalle frecce verdi. L'ingombro dell'autotreno per gli approvvigionamenti, quello dell'autogrù e quello delle aree di stoccaggio vanno a definire la restante superficie di cantiere, che blocca il transito sul controviale di corso Einaudi. Vengono inoltre indicati i sensi di percorrenza e il numero di corsie dei viali e controviai.

Si vedono ora applicati, in planimetria, i franchi di sicurezza critici che vanno a definire le aree di sorvolo che dovranno essere gestite dai movieri a terra. Con un tratteggio rosso pieno ho indicato le aree di sorvolo su pubblica via, con un tratteggio a righe biancorosse quelle su superfici private (cortili interni di abitazioni). In Figura 57 ho rappresentato i margini necessari al sollevamento di un modulo della gru a torre: il raggio di 19 metri va a interferire con il controviale di corso Mediterraneo e due corsie di corso Einaudi, tra cui quella dotata di binari del tram. In questo caso, il traffico viene deviato sulla terza corsia libera, come indicato dal segnale di obbligo di passaggio a sinistra. Vengono ostacolati anche alcuni passaggi pedonali con cui si raggiungono gli ingressi del civico 65 ed un'ampia area a sud-ovest. Le zone interdette al transito sono indicate da un segnale di lavori in corso, ed i movieri necessari sono rappresentati da un'icona simbolica. In Figura 58 ho invece indicato le aree di sorvolo per il braccio della gru: a nord risultano ancora bloccate le due corsie di corso Einaudi, ad est si chiude tutta la zona pedonale antistante gli edifici e ad ovest si blocca il controviale. Vengono in questo caso interessati dal sorvolo anche i cortili interni: nel capitolo 4.6.4 farò alcune considerazioni su come queste zone possano essere gestite senza impiegare altri movieri e dunque un elevato numero di maestranze.

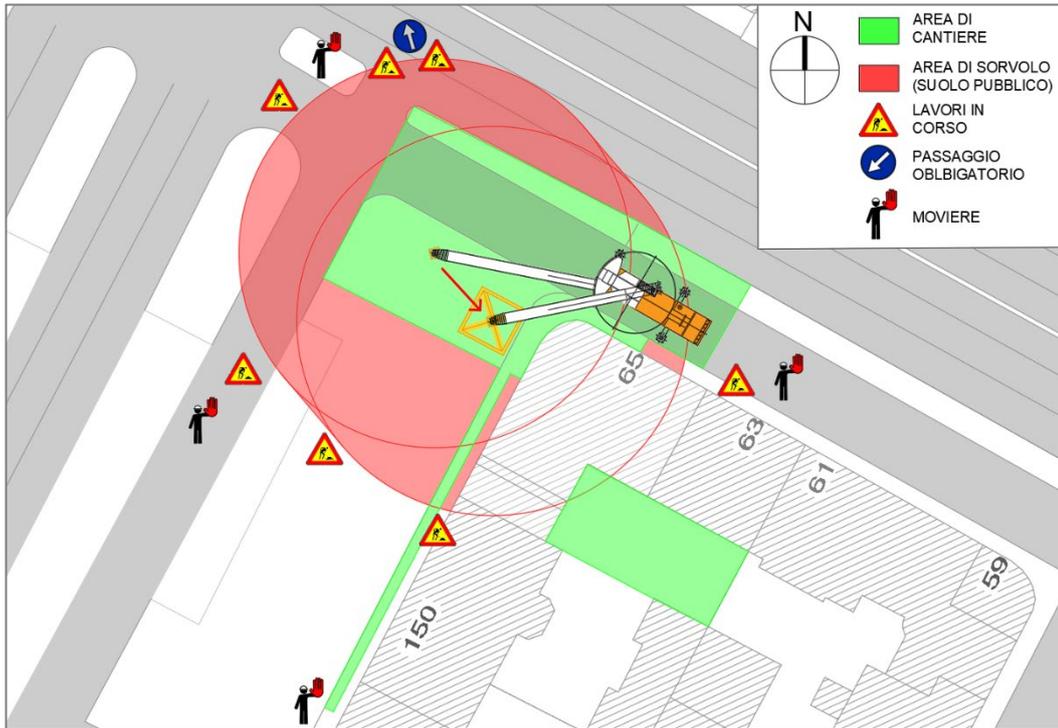


Figura 57 - Franchi di sicurezza per un modulo della torre (corso Einaudi)

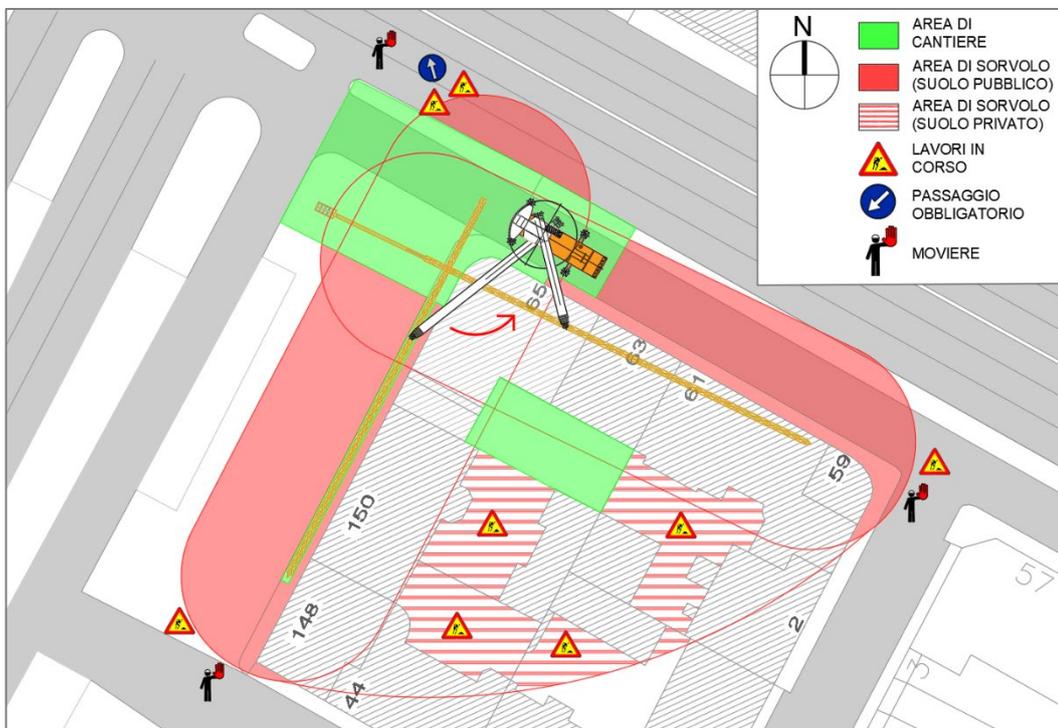


Figura 58 - Franchi di sicurezza per il braccio (corso Einaudi)

Configurazione n. 2

Nella seconda configurazione l'autogrù è posizionata sul controviale di corso Mediterraneo. In Figura 59 e Figura 60 si ha, rispettivamente, la rappresentazione qualitativa tridimensionale dei mezzi di sollevamento nel contesto e l'organizzazione planimetrica del cantiere. In questo caso, è il controviale di corso Mediterraneo ad essere bloccato dall'autogrù, mentre la corsia dei parcheggi di quello di corso Einaudi è destinata al transito e sosta degli automezzi di cantiere, così come al montaggio del braccio della gru. L'ingresso e l'uscita dal cantiere in questo caso non sono coincidenti: gli autotreni possono entrare a nord-ovest ed uscire a sud-est, evitando le altrimenti necessarie manovre.

In Figura 61 ho indicato le zone di sorvolo per il modulo della torre: le considerazioni sono analoghe al caso precedente, ad eccezione del traffico che non viene più bloccato sul controviale di corso Mediterraneo ma su quello di corso Einaudi. Nella Figura 62 si osserva invece come il sollevamento e la necessaria rotazione del braccio della gru vadano ad interferire su di una vasta superficie pubblica: non vi è più il problema dei cortili interni, ma in questo caso il transito in entrambe le direzioni di corso Einaudi viene ostacolato. In direzione nord-sud questo è totalmente bloccato, mentre in quella opposta vi resta una corsia libera.

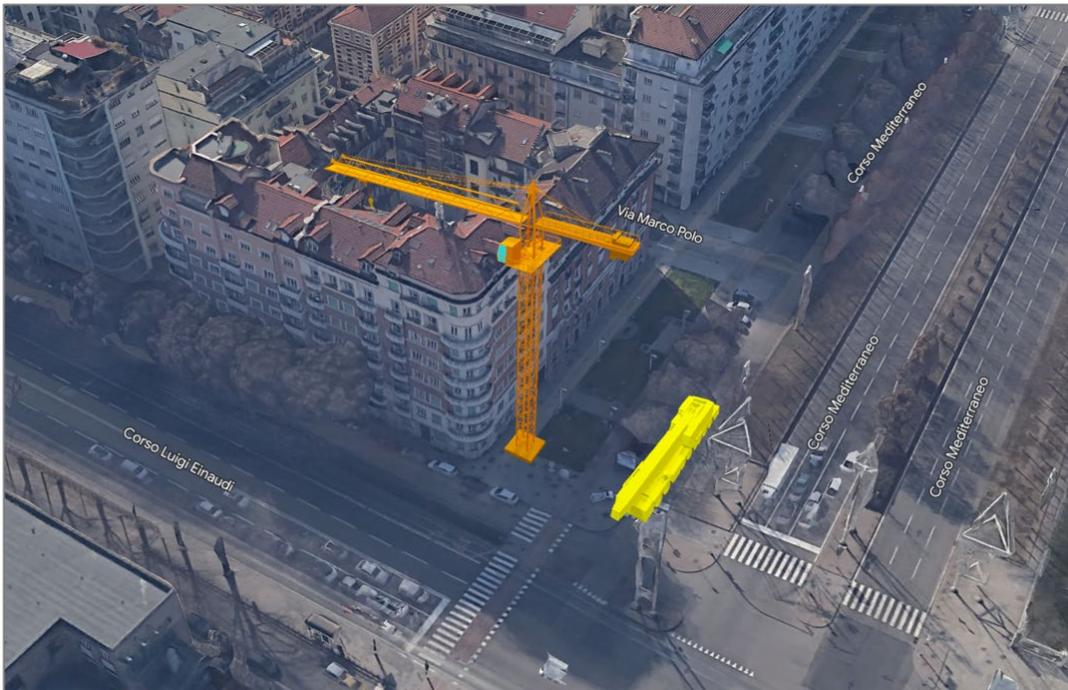


Figura 59 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su corso Mediterraneo

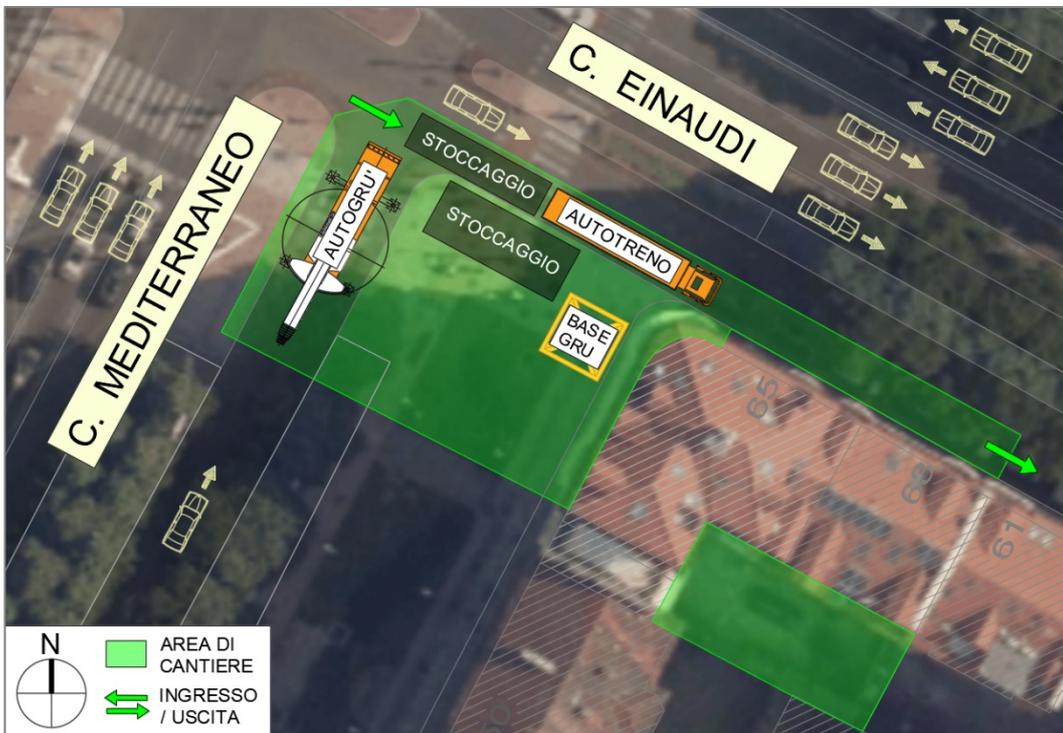


Figura 60 - Configurazione del cantiere su corso Mediterraneo

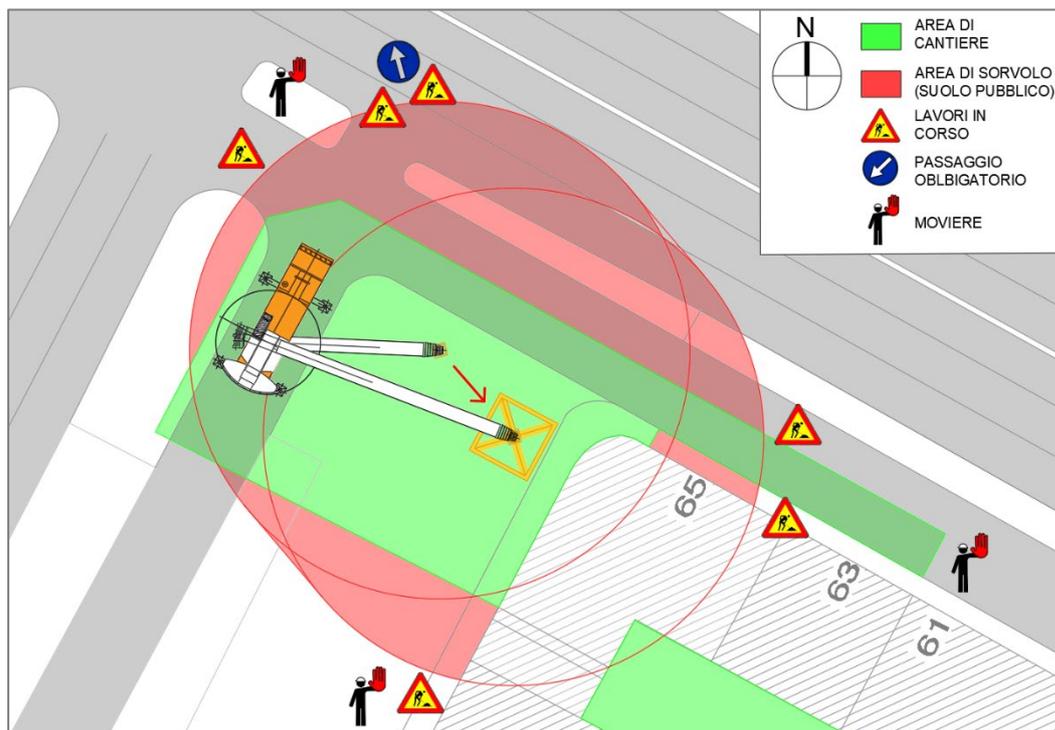


Figura 61 - Franchi di sicurezza per un modulo della torre (corso Mediterraneo)

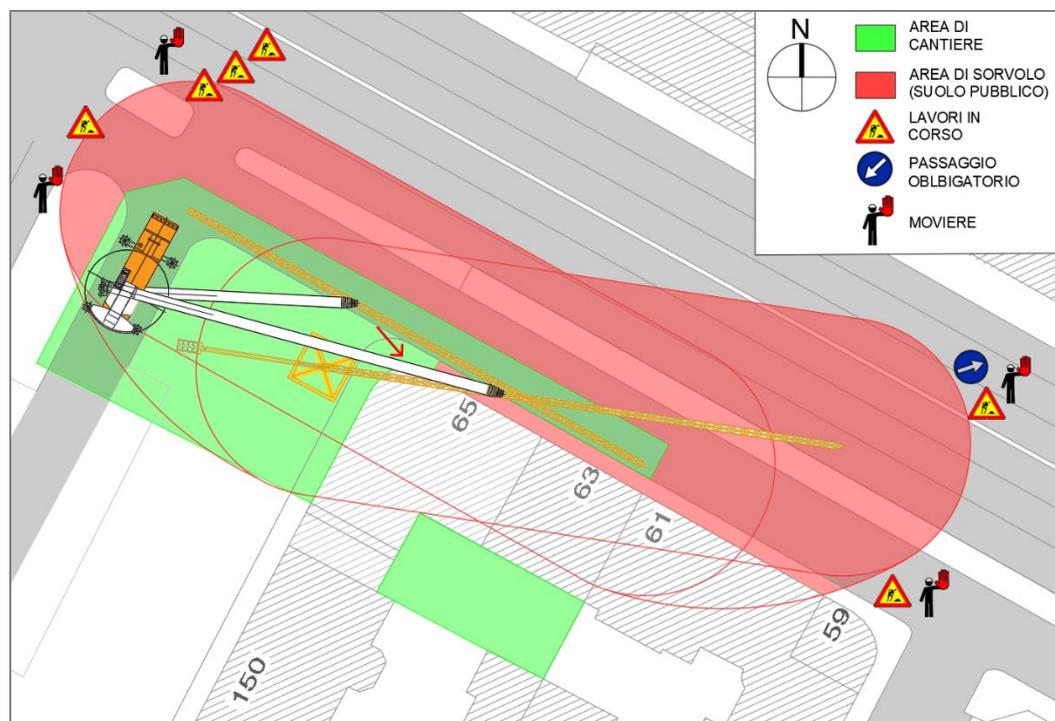


Figura 62 - Franchi di sicurezza per il braccio (corso Mediterraneo)

4.6.2 Secondo caso studio: via Maria Vittoria

Il secondo caso studio è riferito al montaggio di una gru a torre nel cortile condominiale del civico 18 di via Maria Vittoria, all'angolo con via Gianbattista Bogino. Le dimensioni critiche della gru a torre adottata in questo caso sono influenzate dall'altezza dell'edificio, che deve essere oltrepassata da ogni elemento della gru, al fine di raggiungere il cortile interno. In particolare, l'altezza massima di sollevamento dei moduli della torre dovrà essere incrementata per superare il palazzo di 23 metri, anche laddove questi vengano montati a quote inferiori. I franchi di sicurezza, considerando un margine di 5 metri oltre la copertura dell'edificio, risulteranno quindi essere:

- Modulo della torre, di altezza 10 metri e quota massima di sollevamento di 28 metri, corrispondente ad un franco di 16 metri;
- Braccio, di lunghezza 50 metri e quota massima di sollevamento di 35 metri, corrispondente ad un franco di 9 metri.

In Figura 63 si vede la rappresentazione qualitativa di gru e autogrù; in Figura 64 ho indicato la planimetria di cantiere. L'area recintata va ad occupare per intero la corsia di via Maria Vittoria compresa fra via Bogino, a nord-ovest, e via S. Francesco da Paola a sud-est, comprendendo le superfici destinate ai parcheggi, che dovranno essere sgombrare. I marciapiedi vengono lasciati accessibili sia a nord che a sud della recinzione per garantire gli accessi pedonali alle abitazioni. L'area di cantiere comprende due cortili interni: quello destinato al montaggio della gru ed un altro, più grande, destinato ad altre lavorazioni. L'ingresso e l'uscita per gli automezzi è posto a sud est, in posizione opposta all'autogrù, per permettere il raggiungimento dell'area di stoccaggio in centro.



Figura 63 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su via Maria Vittoria

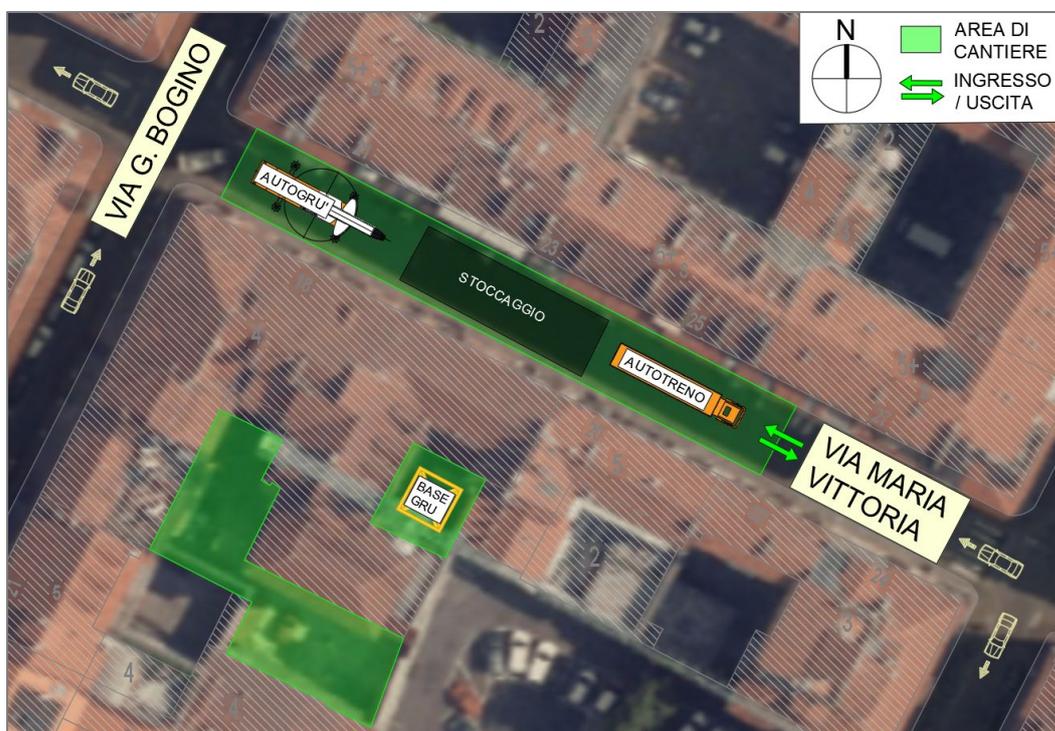


Figura 64 - Configurazione del cantiere su via Maria Vittoria

Osservando ora le planimetrie di Figura 65 e Figura 66, si nota che sia per il modulo della torre sia per il braccio della gru, le aree di sorvolo ricadono su suolo pubblico e privato. Oltre alla gestione dei cortili interni, saranno richiesti due movieri in entrambi i casi, che vadano a bloccare il transito pedonale su via Maria Vittoria; la viabilità veicolare non risulta essere ostacolata in questo cantiere. Si nota come una parte di area di sorvolo del braccio, localizzata a sud-est, non sia tratteggiata in rosso: ciò deriva dall'impossibilità di caduta del materiale in quella zona, dal momento che l'altezza degli edifici non lo permetterebbe. Infatti, se si traccia sul piano verticale la campana del franco di sicurezza, questa risulterebbe interrotta proprio dalla copertura degli edifici.

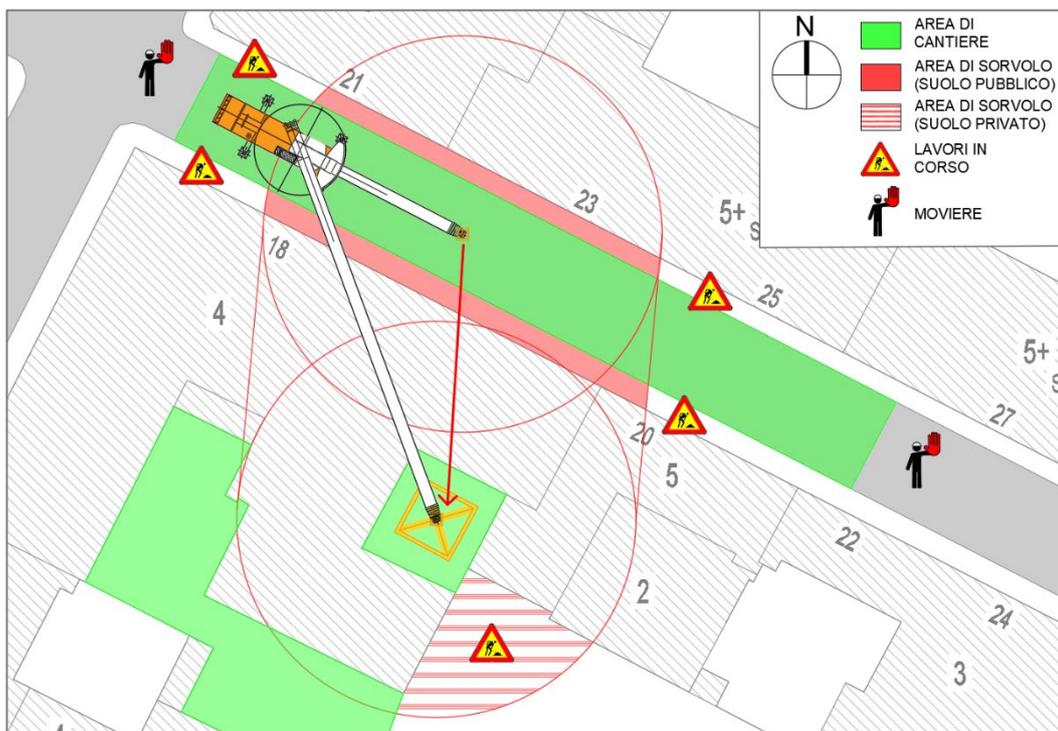


Figura 65 - Franconi di sicurezza per un modulo della torre (via Maria Vittoria)

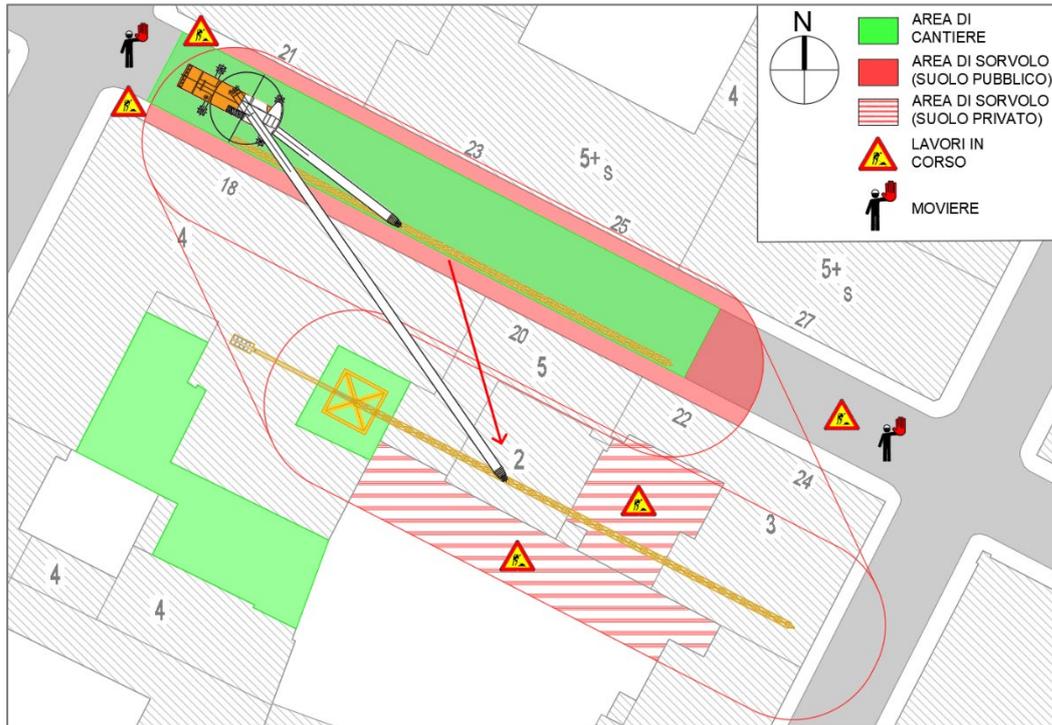


Figura 66 - Franchi di sicurezza per il braccio (via Maria Vittoria)

4.6.3 Terzo caso studio: via Genova

Il terzo ed ultimo caso riguarda il montaggio della gru su via Genova, già analizzato nel capitolo 3 come incidente con apparecchi di sollevamento. In questo caso la gru a torre è posizionata sulla strada, in corrispondenza della corsia adibita a parcheggi. Le dimensioni critiche della gru a torre ed i corrispondenti franchi di sicurezza risultano essere:

- Modulo della torre, di altezza 12 metri e quota massima di sollevamento di 27 metri, corrispondente ad un franco di 15 metri;
- Braccio, di lunghezza 55 metri e quota massima di sollevamento di 39 metri, corrispondente ad un franco di 10 metri.

In Figura 67 si vede la rappresentazione 3D qualitativa, ed in Figura 68 quella planimetrica del cantiere. La recinzione confina un'area che racchiude parte della carreggiata di via Genova, la corsia dei parcheggi ad ovest e parte del marciapiede.

L'ingresso per gli automezzi è posto a nord, e vi sono due zone di stoccaggio poste in modo tale da facilitare il sollevamento degli elementi della torre e del montaggio braccio a terra.

In Figura 69 e Figura 70 si osservano i franchi di sicurezza per il modulo della torre e per il braccio, che interessano sia il suolo pubblico, sia dei cortili privati. In entrambi i casi, tre movieri sono sufficienti per gestire queste aree di sorvolo.

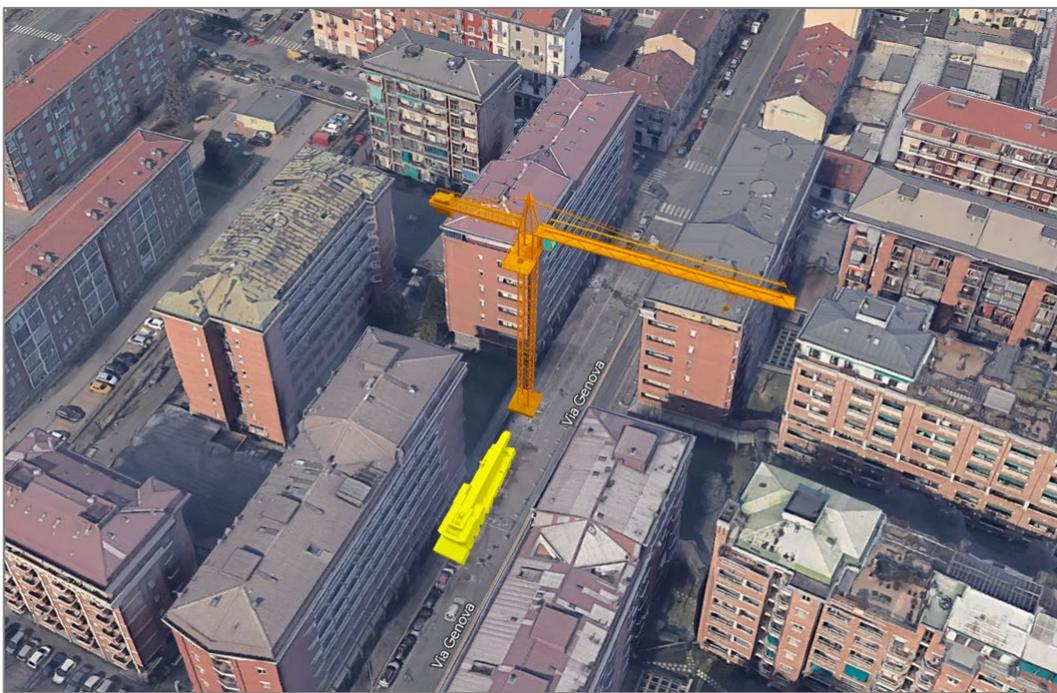


Figura 67 - Rappresentazione tridimensionale di gru e autogrù su via Genova

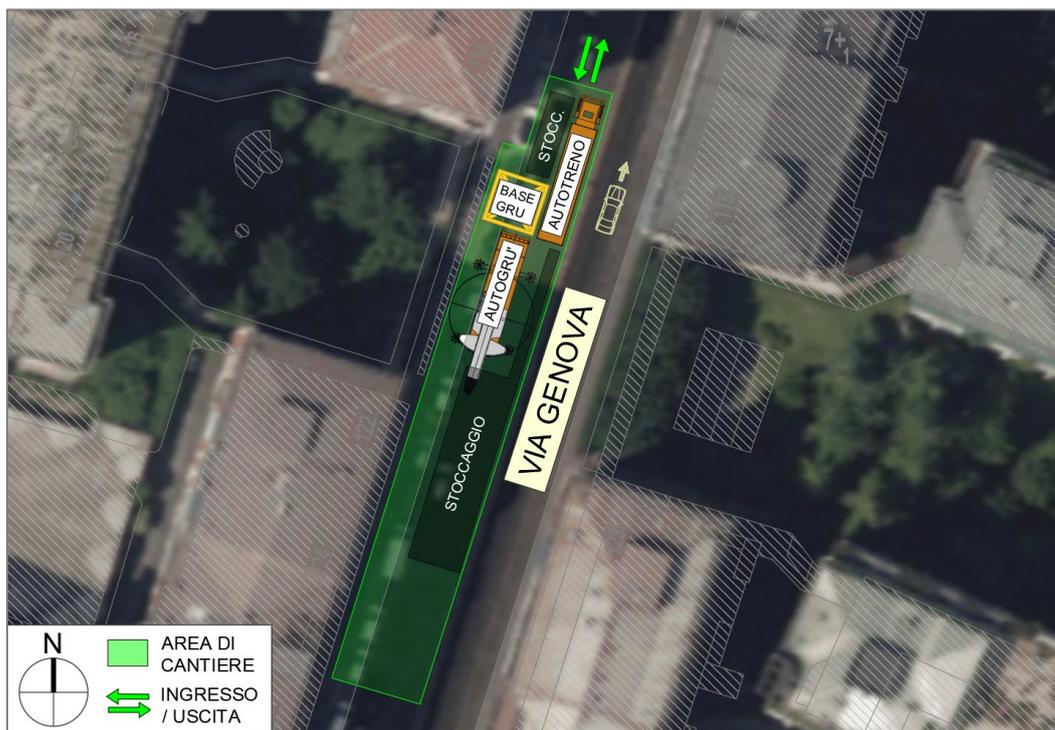


Figura 68 - Configurazione del cantiere su via Genova

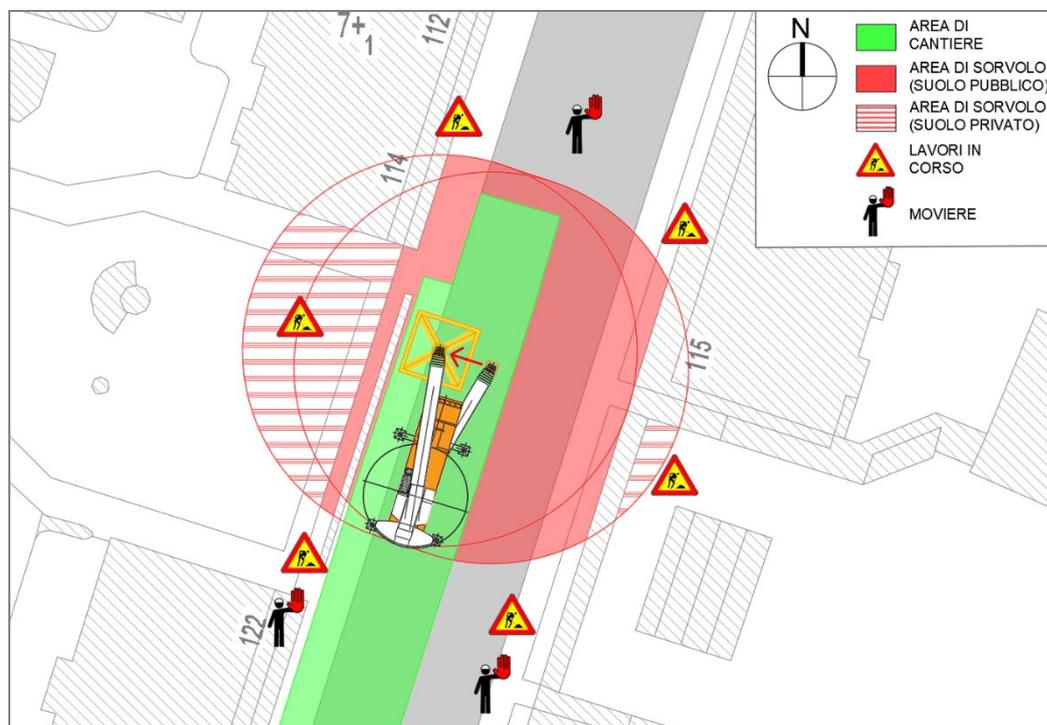


Figura 69 - Franchi di sicurezza per un modulo della torre (via Genova)

perciò appurare quale configurazione comporti l'interferenza più facilmente gestibile; in altre parole, l'area di sorvolo che necessiterà di un numero minore di movieri e che comporterà un minor disturbo a terzi sarà da preferire.

In relazione a ciò, si evidenzia il *disturbo alla viabilità pubblica*: il blocco del traffico, oltre a interessare le vetture private, coinvolge anche i mezzi pubblici. Nel caso di corso Einaudi, la linea tramviaria risulta ostacolata dalle zone di sorvolo; il blocco di queste linee comporta un costo per ogni minuto, pertanto sarà opportuno valutare con cautela le soluzioni che permetteranno di eliminare questa interferenza. Nel caso ciò non sia possibile, durante le fasi di montaggio si potrà valutare il momento più opportuno per il sollevamento, ovvero procedere con le operazioni negli istanti in cui non è previsto il transito di tram, basandosi sugli orari dei mezzi pubblici.

Riguardo al *sorvolo su aree private*, queste potrebbero essere gestite da movieri, ma ciò richiederebbe un grande numero di maestranze atte a compiere questo ruolo. Si ipotizza un più probabile divieto di transito e di utilizzo dei cortili condominiali, negli orari lavorativi dei giorni in cui avviene il montaggio della gru a torre.

Inoltre, voglio menzionare ancora una volta come tali misure di sicurezza non tengano in considerazione il possibile *crollo degli apparecchi di sollevamento*. In Figura 71 ho sovrapposto la planimetria dei franchi di sicurezza per il montaggio del braccio su via Genova ad una fotografia scattata da drone a seguito del crollo dell'apparecchio, per valutare un possibile beneficio di queste misure nell'evento eccezionale della caduta della gru. Come si può notare, purtroppo, i franchi di sicurezza previsti non sarebbero stati sufficienti a contenere il corpo della gru collassato. Ciò rimarca la difficoltà nell'espandere i franchi di sicurezza in modo tale da scongiurare effetti sul contesto e su terzi: ciò sarebbe teoricamente fattibile ma comporterebbe, come già trattato, la chiusura di grandi porzioni di suolo

pubblico e privato e l'evacuazione delle abitazioni per l'intera durata delle operazioni di montaggio, non solo durante la fase di sollevamento.

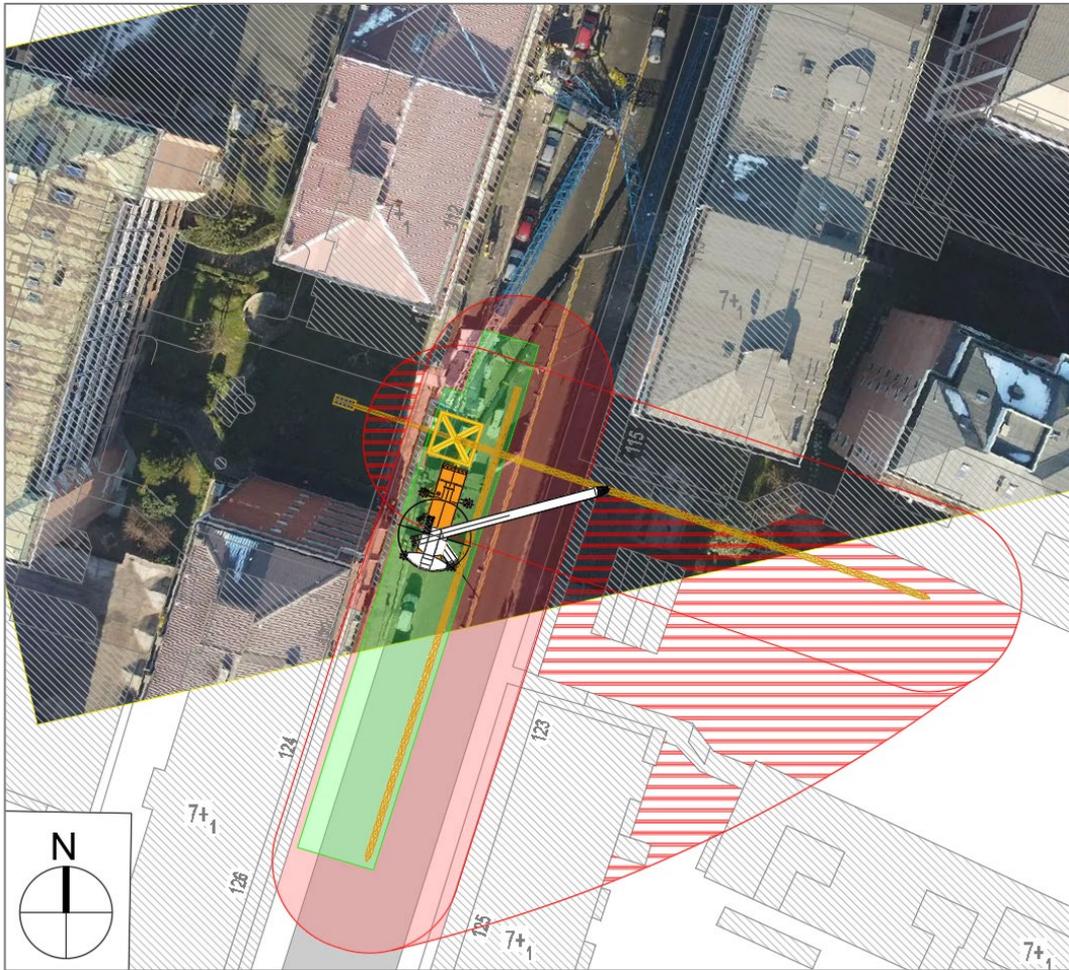


Figura 71 - Franchi di sicurezza per il braccio sovrapposti a fotografia da drone [41]

5

Conclusioni

In questa tesi di laurea magistrale ho voluto fornire il mio contributo nel campo della gestione della sicurezza nel settore delle costruzioni, definendo delle misure di prevenzione integrative alla normativa e linee guida attuali. Ho lavorato sul montaggio delle gru a torre, operazione che implica il sollevamento di materiali ed i cui rischi, come si è appurato, si ripercuotono non solo sui lavoratori ma anche su persone esterne al cantiere. L'approfondimento riguardante l'ingegneria forense si è rivelato utile per comprendere al meglio il processo metodologico utilizzato dai professionisti nella risoluzione dei casi di incidenti con apparecchi di sollevamento. È grazie all'osservazione dei casi di crollo, ed in particolare dall'analisi del caso

studio di via Genova, che ho potuto evidenziare le maggiori criticità della fase di montaggio.

Mi sono dunque approcciato ad un'analisi della normativa e delle linee guida presenti in materia di sollevamenti, esaminando le misure di sicurezza necessarie al montaggio di una gru a torre e quelle da adottare durante la fase di esercizio. Le criticità incontrate si possono riassumere in tre punti:

- l'identificazione e la segregazione di un'area di lavorazione a terra;
- l'individuazione ed il controllo di una superficie di sorvolo dei carichi;
- la definizione di specifiche misure di coordinamento.

Le misure integrative prendono in considerazione il rischio più probabile e con rilevante magnitudo che è quello della caduta di gravi dall'alto, trascurando eventi eccezionali come la caduta dell'apparecchio di sollevamento. Ho perciò definito i criteri per recintare adeguatamente l'area di cantiere a terra, ho proposto un metodo per determinare le aree di sorvolo – dunque i franchi necessari per garantire la sicurezza in fase di sollevamento – ed ho infine esposto alcune precise misure di coordinamento.

A fronte dell'applicazione di tali misure su tre casi studio, ho sviluppato alcune considerazioni sulla gestione delle aree di sorvolo, la quale sarà peculiare a seconda che si tratti di suolo pubblico o privato. Le superfici a terra diventano un fattore determinante anche per la scelta della posizione dell'autogrù atta al montaggio: questa determinerà una maggiore o minore interferenza sul contesto.

In conclusione, reputo che le misure integrative che ho individuato permettano di raggiungere un maggiore livello di sicurezza rispetto ai rischi presenti, costituendo una solida base per la definizione di linee guida specifiche per il montaggio delle gru a torre e, più in generale, sui sollevamenti. L'auspicio è che attraverso una maggior consapevolezza, determinata dallo studio di incidenti reali,

e mediante l'adozione di misure complementari ai sistemi di prevenzione sia possibile aumentare il livello di sicurezza complessivo di operazioni così critiche.

Riferimenti bibliografici

- [1] P. S. Mistretta, Manuale di ingegneria forense. Teoria e pratica della consulenza ingegneristica nel processo penale e civile, Dario Flaccovio Editore, 2014.
- [2] B. S. Neale, Forensic engineering - a professional approach to investigation, Thomas Telford, 1998.
- [3] C. S. Smith, A History Of Metallography: The Development Of Ideas On The Structure Of Metals Before 1890, MIT Press, 1988.
- [4] AIF - Associazione italiana di Ingegneria Forense, «Benvenuti nel sito dell'Associazione italiana di Ingegneria Forense,» [Online]. Available: <http://www.aifitalia.it/home.html>. [Consultato il giorno 19 novembre 2022].
- [5] Ordine degli Ingegneri della Provincia di Milano, «Ingegneria Forense,» *Rivista dell'Ordine*, n. n.52, 2011.
- [6] Ingegneria Forense Academy, «Ingegnere Forense,» [Online]. Available: <https://ingegneriaforense.academy/ingegnere-forense/>. [Consultato il giorno 20 dicembre 2022].

Riferimenti bibliografici

- [7] F. M. Vinardi, «C'era una volta il Perito del Tribunale...» *Il Giornale dell'Ingegnere*, n. 3, p. 31, 2021.
- [8] K. Terwel, M. Schuurman e A. Loeve, «Improving reliability in forensic engineering: the Delft approach,» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 2018.
- [9] R. T. Ratay, «Forensic structural engineering practice in the USA,» *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, n. 162, pp. 52-56, 2009.
- [10] FMEA-FMECA.com, «FMEA and FMECA Information,» [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20200118180709/http://www.fmea-fmea.com/>. [Consultato il giorno 5 dicembre 2022].
- [11] K. Terwel, «Critical Factors for Structural Safety in the Design and Construction Phase,» *Journal of Performance of Constructed Facilities*, vol. 3, n. 29, 2014.
- [12] C. R. F. Azevedo, «Engineering Failure Analysis,» [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/journal/engineering-failure-analysis>. [Consultato il giorno 5 gennaio 2023].
- [13] Spectra Engineering, «Servizi,» [Online]. Available: <https://www.spectraengineering.it/servizi-controlli-e-monitoraggio-su-strutture-edilizie/>. [Consultato il giorno 28 novembre 2022].
- [14] M. Stuart, *Petrographic Analysis of Concrete Deterioration*, PDH Center, 2016.
- [15] G. Tronca, «Controlli non distruttivi su manufatti edili: metodi e campi d'applicazione,» 3 aprile 2007. [Online]. Available: <https://www.infobuild.it/approfondimenti/controlli-non-distruttivi-su->

- manufatti-edili/#Indagini-Ottiche-Elettromagnetiche. [Consultato il giorno 29 novembre 2022].
- [16] A. Banchelli, *Geologia forense. Introduzione alle geoscienze applicate alle indagini giudiziarie.*, Dario Flaccovio Editore, 2013.
- [17] A. Carpinteri, *Scienza delle costruzioni*, vol. 1, Pitagora Editrice, 1992.
- [18] L. Jing, «A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering,» *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, n. 40, 2003.
- [19] AEM - Applied Element Method, «Welcome to Applied Element Method.com,» [Online]. Available: <https://www.applielementmethod.org/>. [Consultato il giorno 2 dicembre 2022].
- [20] C. Grunwald, A. A. Khalil, B. Schaufelberger, E. M. Ricciardi, C. Pellicchia, E. De Iuliis e W. Riedela, «Reliability of collapse simulation – Comparing finite and applied element method at different levels,» in *Engineering Structures*, vol. 176, 2018, pp. 265-278.
- [21] Comitato Paritetico Territoriale di Torino e Provincia, «Scheda 1. Gru a torre,» in *Le macchine in edilizia. Caratteristiche e uso in sicurezza*, 2013.
- [22] Y. Yu, «Forensic investigation on crane accidents,» *International Journal of Forensic Engineering*, pp. 319-341, 2017.
- [23] Tower Crane Support, «World-wide tower crane accident statistics 2000-2010,» [Online]. Available: http://towercranesupport.com/tower_crane_accidents.php. [Consultato il giorno 14 dicembre 2022].

Riferimenti bibliografici

- [24] B. Ross, B. McDonald e V. Saraf, «Big Blue goes down. The Miller Park crane accident,» *Engineering Failure Analysis*, vol. 14, n. 6, pp. 942-961, 2007.
- [25] Milwaukee Journal Sentinel, «1999 Big Blue crane collapse at Miller Park, kills three iron workers,» 14 luglio 2014. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=ZXr1IeWbP10>. [Consultato il giorno 14 dicembre 2022].
- [26] Milwaukee Journal Sentinel Archives, 1999.
- [27] L. Hamilton, «Case Study: The Day Big Blue Fell,» 9 settembre 2019. [Online]. Available: <https://blog.thinkreliability.com/case-study-the-day-big-blue-fell>. [Consultato il giorno 14 dicembre 2022].
- [28] E. A. Fallone, «Reflections on the Accident at Miller Park and the Prosecution of Work-Related Fatalities in Wisconsin,» *Marquette Sports Law Review*, vol. 12, n. 105, pp. 105-126, 2001.
- [29] Ove Arup & Partners Consulting Engineers PC, «51st Street Crane Investigation Report,» 2009.
- [30] J. Hochfelder, «Crane Collapse Case Wrongful Death Awards Modified,» 7 novembre 2017. [Online]. Available: <https://www.newyorkinjurycasesblog.com/2017/11/articles/wrongful-death/crane-collapse-case-wrongful-death-awards-modified/#:~:text=Criminal%20charges%20were%20lodged%20against,guilty%20to%20criminally%20negligent%20homicide..> [Consultato il giorno 11 gennaio 2023].
- [31] Principia Ingenieros Consultores S.A., «Investigating the Mecca crane collapse,» 6 marzo 2017. [Online]. Available: <https://principia.es/en/mecca-crane-collapse/>. [Consultato il giorno 17 gennaio 2023].

- [32] J. Collins, «Mecca Crane Collapse — “The worst crane accident in living memory”,» 10 novembre 2015. [Online]. Available: <https://becht.com/becht-blog/entry/mecca-crane-collapse-the-worst-crane-accident-in-living-memory/>. [Consultato il giorno 18 gennaio 2023].
- [33] S. Barberis e M. Fiore, «La gru travolse tre operai, cantiere fermo da novembre,» 2 febbraio 2023. [Online]. Available: https://laprovinciapavese.gelocal.it/pavia/cronaca/2023/02/02/news/la_gru_travolse_tre_operai_cantiere_fermo_da_novembre-12618049/. [Consultato il giorno 24 febbraio 2023].
- [34] Cattaneo cm, «Dimensioni cm50s4,» 3 ottobre 2015. [Online]. Available: <http://www.album-mmt.it/foto/v/macchine-per-il-sollevamento/gru-edili-a-torre/Cattaneo-CM38/cm50s41.jpe.html>. [Consultato il giorno 24 febbraio 2023].
- [35] Local Team, «Trivolzio, comandante polizia: gru giù per un "colpo di frusta",» 14 novembre 2023. [Online]. Available: <https://www.localteam.it/video/trivolzio-comandante-polizia-gru-giu-per-un-colpo-di-frusta>. [Consultato il giorno 24 febbraio 2023].
- [36] Google Maps, 2023. [Online]. Available: <https://www.google.it/maps/>.
- [37] SOIMA, «SGT 85,» [Online]. Available: [https://freecranespecs.com/Soima-SGT-85\(1\).pdf](https://freecranespecs.com/Soima-SGT-85(1).pdf). [Consultato il giorno 7 marzo 2023].
- [38] Liebherr, «Dati tecnici LTM 1080/1,» [Online]. Available: https://cranenetwork.com/uploads/specs/5jbrtipnheumpfqwliebherr_ltm_1080-1_48_m_all_terrain_mobile_crane_network.pdf.
- [39] P. F. Caracciolo, I. Famà e M. Peggio, «Tragedia del lavoro a Torino: crollano due gru in un cantiere edile, 3 morti e 3 feriti,» 18 dicembre 2021. [Online]. Available:

Riferimenti bibliografici

- https://www.lastampa.it/torino/2021/12/18/news/crolla_una_gru_in_un_cantiere_edile_un_morto_e_4_feriti_a_torino-1732834/. [Consultato il giorno 8 marzo 2023].
- [40] ANSA, «Una gru cade su un palazzo, tre operai morti a Torino,» 18 dicembre 2021. [Online]. Available: https://www.ansa.it/sito/photogallery/primopiano/2021/12/18/una-gru-cade-su-un-palazzo-tre-operai-morti-a-torino_c937d43c-c7b4-47fc-9692-1cc7c3c1398e.html. [Consultato il giorno 8 marzo 2023].
- [41] G. Orrù e Fanpage, «Crolla una gru in via Genova a Torino, morti i 3 operai al lavoro: “Non si può morire così”,» 19 dicembre 2021. [Online]. Available: <https://www.fanpage.it/attualita/crolla-una-gru-in-via-genova-a-torino-morti-i-3-operai-al-lavoro-non-si-puo-morire-cosi/>. [Consultato il giorno 8 marzo 2023].
- [42] M. Alpozzi e LaPresse, «Torino, Crollo gru in via Genova: l’area chiusa e il sopralluogo dei Vigili del Fuoco – LE IMMAGINI,» 20 dicembre 2021. [Online]. Available: <https://www.lapresse.it/cronaca/2021/12/20/torino-crollo-gru-sopralluogo-dei-vigili-del-fuoco/>. [Consultato il giorno 8 marzo 2023].
- [43] S. Martinenghi, «Crollo della gru di via Genova, salgono a cinque gli indagati: "Mezzo inadeguato per montarla",» 16 febbraio 2023. [Online]. Available: https://torino.repubblica.it/cronaca/2023/02/16/news/gru_via_genova_5_indagati-388297735/. [Consultato il giorno 9 marzo 2023].
- [44] INAIL, «Cadute dall'alto dei gravi,» *Informo.MO*, vol. Scheda 3, 2017.

- [45] Comitato Paritetico Territoriale di Roma e Provincia, Il montaggio delle gru a torre. Procedure di sicurezza per i lavori in quota e per il sollevamento e il trasporto dei carichi, 2008.
- [46] D.Lgs. 9 aprile 2008, n. 81. "Testo Unico sulla salute e sicurezza sul lavoro", Rev. gennaio 2023.
- [47] MEC GRU, «Verifiche periodiche apparecchi di sollevamento,» [Online]. Available: <https://www.mecgru.com/verifiche-periodiche-apparecchi-sollevamento/>. [Consultato il giorno 6 febbraio 2023].
- [48] M. R. Contreras-Alonso e e. al., «Environmental assessment of Obstacle Limitation Surfaces (OLS) in airports using geographic information technologies,» 26 febbraio 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229378>.
- [49] Istituto Superiore per la Prevenzione e la Sicurezza del Lavoro, Linea Guida 359/99, 1999.
- [50] ISO, 12480-1, Cranes - Safe use. Part 1: General, 1997.
- [51] DIFAST s.r.l., Brache di catena. Istruzioni per l'uso e la manutenzione, 2011.
- [52] ASME, B30.3-2016, Tower Cranes, 2016.

Riferimenti bibliografici

Appendice A

Nella presente appendice ho formato un elenco dei crolli di apparecchi di sollevamento fissi avvenuti in Italia negli ultimi 5 anni, ovvero dal 2018 al 2022. Questa *non* vuole essere una lista esaustiva e completa, in quanto è basata su ricerche bibliografiche dei casi riportati dalla cronaca. È possibile che altri incidenti di crolli non siano stati riportati o non siano stati da me trovati sulle fonti consultate. Inoltre, questi dati possono essere influenzati dalla pandemia di Covid-19, che ha ostacolato i lavori edili nel 2020. A fronte di questa premessa, i dati raccolti possono comunque portare ad un risultato qualitativo utile per affermare come, sulle migliaia di apparecchi di sollevamento installati e utilizzati ogni anno, solamente pochi di essi sono soggetti ad un evento raro come il crollo degli stessi.

Tabella 2 - Crolli di gru edili fisse in Italia dal 2018 al 2022

ANNO	MESE	GIORNO	LUOGO	VITTIME	FERITI	FONTE URL
2022	4	22	Crotone	0	0	https://catanzaro.gazzettadelsud.it/articoli/cronaca/2022/04/22/tragedia-sfiorata-a-crotone-crolla-gru-in-un-cantiere-edile-1a32e311-9f04-4db7-b8c8-aa96a4996edc/

Appendice A

	6	1	Albate (MB)	0	0	https://www.monzatoday.it/cronaca/albate_cade-gru-oggi-1-giugno.html
	8	18	Boara (FE)	0	0	https://video.repubblica.it/edizione/bologna/boara-gru-crolla-su-villette-downburst-colpisce-il-ferrarese/423243/424196
	11	12	Padova	0	0	https://www.open.online/2022/11/12/padova-gru-crolla-edificio-foto/
	11	14	Trivolzio (PV)	0	3	https://www.ilgiorno.it/pavia/cronaca/trivolzio-gru-cantiere-1.8284490
	11	23	Bologna	0	0	https://www.ilrestodelcarlino.it/bologna/cronaca/crolla-gru-via-marzabotto-1.8314567
2021	7	26	Rozzano (MI)	0	0	https://www.ilgiorno.it/cronaca/rozzano-bomba-acqua-1.6630840
	12	8	Viterbo	0	0	http://www.tusciaweb.eu/2021/12/gru-crollata-tragedia-sfiorata-via-verona/
	12	18	Torino	3	3	https://www.lastampa.it/torino/2021/12/18/news/crolla_una_gru_in_un_cantiere_edile_un_morto_e_4_feriti_a_torino-1732834/
2020	Nessun incidente riportato					
2019	11	22	Parabiago (MI)	0	0	https://www.ilgiorno.it/legnano/cronaca/parabiago-gru-si-spezza-e-si-abbatte-su-due-abitazioni-1.4900563
2018	7	16	Borgio Verezzi (SV)	0	0	https://www.ivg.it/2018/07/crolla-gru-borgio-verezzi-strada-chiusa-intervento-dei-vigili-del-fuoco/

Crolli totali per anno

- 2022: 6 crolli
- 2021: 3 crolli
- 2020: 0 crolli
- 2019: 1 crollo
- 2018: 1 crollo

Media crolli all'anno

Si sono verificati 11 incidenti su un totale di 5 anni. La media, su suolo nazionale, è di **2,2 crolli all'anno**.

Considerazioni

Il basso numero di crolli avvenuti ogni anno nella finestra temporale considerata mi porta a confermare come il rischio di caduta degli apparecchi di sollevamento sia statisticamente irrilevante, e dunque non preso in considerazione nella gestione della sicurezza. Inoltre, degli incidenti analizzati, 1 su 11 ha provocato vittime, mentre 2 su 11 hanno provocato feriti; questo può insinuare come la magnitudo degli effetti *può essere disastrosa*, anche se non sempre si rivela essere tale. Ciò accresce le motivazioni per cui non si prende in considerazione il rischio di crollo delle gru edili.