RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA INTEGRALE

Ponte Girevole Intelligente di Fiumicino

di Ing. Diego Dell'Erba



DOCUMENTO TECNICO DI PROGETTO: PGIF 01 R06 / ESTESO E COMPLETO

Progettazione Integrata,
Modellazione Analitica, Cinematica,
Quadro Operativo Cyber-Fisico, Digital Twin, Manutenzione Predittiva e Gestione Cantiere con IA per la Realizzazione del Ponte Girevole Intelligente
sul Porto Canale di Fiumicino (Fossa Traianea)

Anno 2026

MANUALE TEORICO-PRATICO E RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA INTEGRALE

DOCUMENTO TECNICO DI PROGETTO: PGIF 01 R06 / ESTESO E COMPLETO

TITOLO: Progettazione Integrata, Modellazione Analitica, Cinematica, Quadro Operativo Cyber-Fisico, Digital Twin, Manutenzione Predittiva e Gestione Cantiere con IA per la Realizzazione del Ponte Girevole Intelligente sul Porto Canale di Fiumicino (Fossa Traianea)

AUTORE: Ing. Diego Dell'Erba — *La Nuova Ingegneria & Cyber Physical Engineering*

DATA: Ottobre 2026

PREFAZIONE: LA VISIONE DELLA CYBER PHYSICAL ENGINEERING

CAPITOLO 1. INQUADRAMENTO TERRITORIALE, VINCOLI IDRAULICI E GEOMETRIA NAUTICA

1.1 Analisi del sito e condizioni al contorno

L'area d'intervento si colloca nel tratto terminale del Porto Canale di Fiumicino, noto come Fossa Traianea, compreso tra la foce marina ed il Ponte Due Giugno situato a monte. Il contesto è caratterizzato dalla coesistenza di tre flussi funzionali distinti:

- La flotta peschereccia commerciale, costituita da natanti con dislocamento fino a centottanta tonnellate e pescaggio massimo di tre metri e venti centimetri.
- La navigazione da diporto, comprensiva di imbarcazioni a motore e a vela con altezze dell'alberatura fuori tutto fino a diciotto metri.
- La rete di viabilità urbana, dedicata al collegamento diretto tra il centro cittadino di Fiumicino situato sulla sponda Nord e l'Isola Sacra posizionata sulla sponda Sud.

1.2 Criteri di compatibilità idraulica e nautica

L'opera soddisfa i criteri stabiliti dalle Autorità Competenti per garantire l'invarianza idraulica ed eliminare i rischi di interferenza nautica. La quota dell'intradosso dell'impalcato è fissata a tre metri e trenta centimetri sopra il livello del mare, mentre il livello di massima marea sommato al sovralzo da scirocco raggiunge gli ottanta centimetri sopra il livello del mare. Ciò garantisce un franco idraulico libero a ponte chiuso pari a due metri e mezzo.

La luce netta del canale di navigazione a ponte aperto è pari a trentotto metri e mezzo, con una profondità del fondale al centro del canale di quattro metri e mezzo sotto il livello del mare. La velocità massima della corrente in condizioni di piena è stimata in due metri e ottanta al secondo, mentre l'angolo prescritto per la rotazione completa dell'impalcato è di novanta gradi precisi. L'assenza di pile o sostegni intermedi in alveo annulla i fenomeni di scalzamento del fondale (*scour*) ed elimina le perdite di carico idraulico.

CAPITOLO 2. SEZIONE TRASVERSALE E GEOMETRIA DELL'IMPALCATO

2.1 Piattaforma stradale

La piattaforma stradale presenta una larghezza utile complessiva di tredici metri e cinquanta centimetri. Tale dimensione è articolata secondo la seguente disposizione trasversale:

- Un marciapiede pedonale sulla sponda Ovest ampio due metri.
- Una fascia marginale di contenimento Ovest di cinquanta centimetri per l'alloggiamento delle barriere di sicurezza H2/H3 e dei parapetti.
- Due corsie veicolari, una per senso di marcia tra Fiumicino Centro e Isola Sacra, ciascuna della larghezza di tre metri e mezzo.
- Una fascia di separazione centrale di cinquanta centimetri.
- Una pista ciclopedonale bidirezionale sulla sponda Est larga tre metri.
- Una fascia di bordo Est di cinquanta centimetri destinata ai dispositivi di sicurezza ed alle finiture marginali.

2.2 Proprietà geometriche e sezionali dell'acciaio

L'impalcato ha una lunghezza totale di quarantadue metri e una luce di calcolo in appoggio di trentotto metri. L'area della sezione trasversale in acciaio S355/S460 è di zero virgola quattrocentoventotto metri quadri, con un momento d'inerzia flettente principale di zero virgola centottantacinque metri alla quarta e un momento d'inerzia torsionale polarizzato di zero virgola Duecentodieci metri alla quarta.

L'altezza della trave varia da due metri e quaranta centimetri in corrispondenza del fulcro fino a un metro e ottanta centimetri all'estremità di punta. L'acciaio strutturale impiegato presenta un modulo elastico pari a duecentodiecimila megapascal. La massa totale dell'impalcato strutturale è pari a duecentottantacinque tonnellate, a cui si aggiungono novantacinque tonnellate di contrappeso integrato nella struttura di coda, portando la massa complessiva rotante a trecentottanta tonnellate.

CAPITOLO 3. ANALISI MECCANICA, CINEMATICA E REGIMI SOLLECITANTI

3.1 Modellazione dello stato chiuso per l'esercizio veicolare

In configurazione chiusa, l'impalcato funziona come una trave ad appoggio appoggiato vincolata alla sponda opposta mediante martinetti e cunei oleodinamici e sostenuta al fulcro dalla ralla di rotazione. La struttura è sottoposta ai carichi permanenti ed ai carichi variabili prescritti dalle norme tecniche per le costruzioni vigenti (NTC 2018 / D.M. 2023).

Il carico totale equivalente distribuito sulla struttura, ottenuto combinando i carichi permanenti strutturali, i carichi permanenti portati e i carichi variabili da traffico con i relativi coefficienti parziali di sicurezza, risulta pari a centonovantadue virgola settantacinque kilonewton al metro. Di conseguenza, il momento flettente massimo di calcolo verificatosi in mezzeria raggiunge il valore di trentaquattromilasettecentottantanove virgola ottantotto kilonewton per metro, mentre il taglio massimo di calcolo agli appoggi è pari a tremilaseicentosessantadue virgola venticinque kilonewton.

La freccia elastica massima calcolata in stato limite di esercizio risulta pari a ottantasei virgola quattro millimetri. Il rapporto tra tale abbassamento e la luce di calcolo è pari a uno su quattrocentoquaranta, valore ampiamente inferiore al limite di normativa fissato in uno su quattrocento, confermando la piena idoneità deformazionale dell'impalcato.

3.2 Modellazione della fase di manovra a sbalzo rotante

Durante la fase di apertura e chiusura, con l'impalcato ruotato fino a novanta gradi, la struttura agisce come uno sbalzo libero incastrato al fulcro di rotazione. Il bilancio dei momenti attorno al fulcro, considerando il peso dell'impalcato distribuito sulla campata principale e la massa concentrata del contrappeso in coda, individua la posizione del baricentro a una distanza di undici metri e diciotto centimetri dal fulcro. Il momento statico complessivo associato alla forza peso totale rispetto al centro di rotazione è pari a quarantunomilasettecentosessantasei virgola ottanta kilonewton per metro.

Considerando un'inerzia polare di massa pari a centoquarantotto milioni di chilogrammi per metro quadro e una legge del moto di tipo trapezoidale che completa la rotazione in centoventi secondi, si calcola la coppia d'inerzia di spunto, pari a centonovantatre virgola ottantotto kilonewton per metro. A questa si sommano la coppia di attrito della ralla, pari a sessantasette virgola dieci kilonewton per metro, e la coppia generata dal vento di progetto calcolato a una velocità di quindici metri al secondo, pari a trecentotto virgola trenta kilonewton per metro.

La coppia totale massima richiesta allo spunto risulta quindi di cinquecentosessantanove virgola ventotto kilonewton per metro. Assumendo un rendimento globale del sistema pari a zero virgola settantadue, la potenza meccanica richiesta all'asse è pari a venti virgola settantadue kilowatt. Per garantire la massima affidabilità e ridondanza operativa di tipo N+1, si prevede l'installazione di quattro motoriduttori da undici kilowatt ciascuno, per una potenza complessiva installata di quarantaquattro kilowatt.

CAPITOLO 4. APPARATI ELETTROMECCANICI ED OLEODINAMICI

4.1 Cuscinetto di rotazione e supporto di basamento

Il supporto dell'impalcato è affidato a una ralla di grande diametro a tre corone di rulli, avente un diametro esterno di quattro metri e mezzo e un diametro di rotolamento delle piste pari a quattro metri e mezzo. Il dispositivo presenta una capacità di carico statico assiale di ventottomilacinquecento kilonewton e un momento ribaltante statico ammissibile pari a centoventicinquemila kilonewton per metro. Il confronto tra il momento ammissibile e il momento ribaltante massimo generato dall'impalcato in fase di sbalzo evidenzia un coefficiente di sicurezza al ribaltamento pari a tre virgola zero, ampiamente superiore ai requisiti minimi di stabilità.

La movimentazione è assicurata dai quattro motoriduttori di comando accoppiati alla dentatura della ralla e gestiti individualmente da inverter a frequenza variabile, garantendo accelerazioni e decelerazioni progressive prive di colpi d'ariete meccanici.

4.2 Dispositivi di vincolo, centraggio e bloccaggio

In posizione di chiusura, il corretto posizionamento della punta dell'impalcato sulla sponda opposta è garantito da due cunei oleodinamici di centraggio guidati da martinetti a doppio effetto della capacità nominale di millecinquecento kilonewton a una pressione di esercizio di duecentottanta bar. Il blocco meccanico di sicurezza per la fase di transito veicolare è realizzato mediante due perni ad azionamento oleodinamico realizzati in acciaio ad alta resistenza con diametro di centottanta millimetri, integrati con sensori di finecorsa SIL 3 a massima affidabilità funzionale.

CAPITOLO 5. AMBIENTE GEOTECNICO ED INGEGNERIA DELLE FONDAZIONI

5.1 Inquadramento stratigrafico e caratterizzazione geotecnica

La stratigrafia del sito su cui sorge il plinto di supporto del fulcro è composta da quattro unità principali:

- Un primo strato superficiale di riporto e sabbie limose, esteso dalla superficie fino a sei metri e mezzo di profondità, caratterizzato da un angolo di attrito interno di ventisei gradi e un modulo elastico di dodici megapascal.
- Un secondo strato di limo argilloso organico tenero, compreso tra sei metri e mezzo e diciotto metri e venti centimetri di profondità, con una resistenza non drenata di trentacinque kilopascal e un modulo elastico di otto virgola cinque megapascal.
- Un terzo strato di sabbie medio-dense con inclusioni conchigliari, presente tra diciotto metri e venti centimetri e ventinove metri di profondità, con un angolo di attrito di trentaquattro gradi e un modulo elastico di quarantacinque megapascal.
- Un substrato profondo di argille marnose piacentine situato oltre i ventinove metri di profondità, avente una resistenza non drenata di centocinquanta kilopascal e un modulo elastico di centodieci megapascal.

5.2 Struttura di fondazione e verifiche di portanza

La fondazione del fulcro è costituita da un plinto circolare pieno in calcestruzzo armato con diametro di otto metri e mezzo e altezza di due metri e ottanta centimetri, poggiante su una palificata di sedici pali trivellati del diametro di milleduecento millimetri ed estesi fino a trentasei metri di profondità per attestarsi saldamente nel substrato argilloso marnoso.

La verifica della capacità portante dei pali nelle condizioni di massimo momento ribaltante durante la rotazione dell'impalcato mostra che il carico verticale massimo agente sul palo maggiormente sollecitato è pari a quattromilaquattrocentosettantanove virgola zero sette kilonewton, valore ampiamente inferiore alla portata ammissibile del singolo palo, quantificata in seimiladuecentocinquanta kilonewton. L'inclinazione massima del plinto sotto l'azione dei carichi eccentrici è calcolata in zero virgola zeroicentotre gradi, ampiamente contenuta entro il limite tollerabile fissato in zero virgola zeroduemila gradi.

CAPITOLO 6. INFRASTRUTTURA DIGITALE E SENSORISTICA IN FIBRA OTTICA

6.1 Rete di monitoraggio continuo in campo

L'infrastruttura sensoriale integrata nell'impalcato e negli apparati di supporto si avvale delle seguenti componenti tecnologiche principali:

- Sessantaquattro punti di misura estensimetrica realizzati mediante reti a fibra ottica con sensori Fiber Bragg Grating, campionati a una frequenza di duecentocinquanta hertz.
- Sedici sensori liberi dedicati alla compensazione termica diretta delle letture ottiche, letti alla frequenza di un hertz.
- Otto accelerometri triassiali a tecnologia piezoelettrica distribuiti lungo lo sviluppo del cassone per il monitoraggio dinamico, campionati a mille hertz.
- Quattro inclinometri di precisione a tecnologia capacitiva con campionamento a cinquanta hertz per la misura della planarità e della rotazione del plinto.
- Due encoder ottici assoluti bidirezionali dedicati alla lettura della posizione angolare della ralla con frequenza di cento hertz.
- Quattro celle di carico estensimetriche posizionate sugli appoggi di sponda, campionate a dieci hertz.

6.2 Principi di funzionamento dei sensori FBG

L'equazione fondamentale di risposta dei sensori Fiber Bragg Grating correla la variazione relativa della lunghezza d'onda di Bragg alla deformazione meccanica e alla variazione di temperatura. Grazie alla costante di sensibilità estensimetrica e alla costante di sensibilità termica, il sistema elimina l'effetto delle escursioni termiche ambientali, fornendo la deformazione pura dell'acciaio in sessantaquattro punti strutturali critici con una precisione micrometrica in tempo reale.

CAPITOLO 7. DIGITAL TWIN ED ARCHITETTURA COMPUTAZIONALE

7.1 Flusso dati trilivello ed elaborazione in tempo reale

Il Digital Twin dell'infrastruttura si articola su una struttura computazionale articolata su tre livelli funzionali:

- Livello di Acquisizione sul Campo: Insieme dei sensori a fibra ottica FBG, degli accelerometri, degli inclinometri e delle celle di carico che misurano lo stato fisico dell'opera.
- Livello di Elaborazione Periferica (Edge Computing): Processori industriali installati nei pressi del plinto di basamento filtrano i dati grezzi, eliminano i rumori di fondo ed eseguono la compensazione termica automatica prima dell'invio del segnale.
- Livello di Simulazione in Cloud (Digital Twin Core): Un modello FEM ad alta fedeltà che riceve continuamente i dati elaborati, aggiornando in tempo reale la propria matrice di rigidezza per rispecchiare fedelmente il comportamento dell'opera.

7.2 Identificazione Modale Operativa (OMA)

La taratura del modello FEM non rimane statica ma viene aggiornata continuamente mediante l'estrazione delle proprietà dinamiche durante il normale transito dei veicoli e sotto l'azione del vento. Gli algoritmi OMA identificano costantemente i modi propri di vibrare della struttura:

- Il primo modo flettente verticale si attesta a due virgola quattordici hertz.
- Il primo modo torsionale si posiziona a quattro virgola trentotto hertz.
- Il primo modo trasversale presenta una frequenza di cinque virgola ottantadue hertz.

Qualsiasi variazione sistematica non riconducibile alle escursioni termiche viene interpretata come una modifica locale di rigidezza, consentendo di individuare anomalie strutturali prima che divengano critiche.

CAPITOLO 8. SISTEMA DI MANUTENZIONE PREDIZZIONALE GUIDATO DALL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

8.1 Modellazione del danno accumulato e fatica dei materiali

L'usura della carpenteria metallica S355/S460 sottoposta a cicli ripetuti di carico viene valutata da algoritmi di intelligenza artificiale basati su reti neurali ricorsive specializzate nell'analisi delle serie temporali. Ciascun passaggio di veicoli pesanti viene registrato tramite le variazioni di microdeformazione intercettate dai sensori FBG. L'applicazione dell'algoritmo di conteggio dei cicli Rainflow elabora il danno cumulativo secondo la regola

di Miner, aggiornando la stima della vita residua dei nodi saldati e generando avvisi automatici prima del raggiungimento dei livelli di attenzione.

8.2 Diagnostica predittiva del sistema cinematico e della ralla

La ralla a tre corone di rulli e l'impianto oleodinamico dei cunei sono gestiti da modelli di apprendimento automatico non supervisionato che analizzano continuativamente le prestazioni del sistema. Durante ogni manovra di rotazione a novanta gradi, l'intelligenza artificiale monitora l'assorbimento elettrico dei quattro motoriduttori da undici kilowatt, la pressione di esercizio dei martinetti di sblocco e gli spettri vibrazionali ad alta frequenza registrati sui supporti della ralla. Incrementi anomali della coppia di spunto o alterazioni negli spettri vibrazionali vengono segnalati tempestivamente come usura delle piste o decadimento del lubrificante, consentendo di programmare gli interventi manutentivi prevenendo disservizi.

8.3 Decision Support System e livelli di allarme

Il Decision Support System classifica lo stato dell'infrastruttura su quattro livelli operativi progressivi:

- Livello Zero (Esercizio Standard): Variazioni delle frequenze proprie inferiori all'uno e mezzo per cento e deformazioni residue inferiori a venti microstrain. Il ponte opera regolarmente.
- Livello Uno (Attenzione): Variazioni di frequenza tra l'uno e mezzo e il quattro per cento o deformazioni tra venti e cinquanta microstrain. Si richiede un'ispezione programmata e il controllo dei sensori.
- Livello Due (Allarme): Variazioni di frequenza tra il quattro e l'otto per cento o deformazioni tra cinquanta e centoventi microstrain. Viene disposto il blocco precauzionale del traffico pesante e la verifica diretta.
- Livello Tre (Critico): Scostamenti di frequenza superiori all'otto per cento o deformazioni oltre i centoventi microstrain. Il sistema attiva l'arresto d'emergenza immediato e la chiusura dell'infrastruttura.

CAPITOLO 9. GESTIONE DIGITALE ED INTELLIGENTE DEL CANTIERE DI REALIZZAZIONE

9.1 Tracciamento automatico e progresso lavori tramite BIM 4D/5D ed IA

La fase costruttiva dell'opera concorre alla formazione della prima impronta digitale dell'infrastruttura (As-Built Digital Twin). Il cantiere integra i modelli informativi BIM con l'elaborazione di immagini e nuvole di punti acquisite da droni. Gli algoritmi di Computer Vision confrontano i rilievi periodici con il modello progettuale, calcolando con precisione i volumi di calcestruzzo gettati per il plinto da otto metri e mezzo e le tonnellate di acciaio montate. Ciò consente una programmazione ottimizzata delle forniture secondo la logica Just-in-Time, riducendo le aree di stoccaggio e l'impatto sulla viabilità locale.

9.2 Controllo della sicurezza e prevenzione infortuni

Il cantiere è protetto da un sistema di monitoraggio visivo basato su intelligenza artificiale che verifica l'adozione dei dispositivi di protezione individuale da parte delle maestranze e la distanza di sicurezza dalle zone di lavoro delle gru. In caso di potenziale interferenza tra i carichi sospesi e la posizione degli operatori, il sistema emette segnali acustici e può rallentare o arrestare preventivamente le macchine di sollevamento.

9.3 Monitoraggio Geotecnico continuo durante gli scavi

Durante la realizzazione dei sedici pali di fondazione da trentasei metri di profondità e lo scavo per il plinto, un sistema inclinometrico monitorato in tempo reale da intelligenza artificiale valuta i cedimenti del terreno, proteggendo le banchine storiche del Porto Canale ed il contesto urbano circostante.

CAPITOLO 10. SICUREZZA FUNZIONALE E PROTOCOLLI DI CYBERSECURITY

10.1 Automazione e logica di sicurezza SIL 3

L'automazione della manovra è gestita da controllori a logica programmabile ridondanti certificati secondo le norme internazionali di sicurezza funzionale fino al livello SIL 3. La sequenza si sviluppa secondo fasi vincolate:

1. Attivazione dei semafori stradali e chiusura delle barriere d'accesso veicolari e pedonali.
2. Scansione dell'impalcato tramite radar e telecamere ad intelligenza artificiale per confermare l'assenza di persone o veicoli fermi sulla struttura.
3. Disimpegno dei cunei oleodinamici e retrazione dei perni meccanici di blocco sulla sponda opposta.
4. Avvio della rotazione dell'impalcato guidata dai quattro motoriduttori fino al raggiungimento dei novanta gradi.
5. Innesto dei blocchi meccanici di apertura e consenso al transito navale.

10.2 Protezione cibernetica (Cybersecurity)

A tutela del sistema contro attacchi informatici esterni, la rete di controllo operativo OT è isolata fisicamente dalle reti esterne. L'invio dei dati dal cantiere e dal ponte verso la piattaforma cloud del Digital Twin avviene mediante dispositivi di trasmissione unidirezionale (Data Diode) che impediscono qualsiasi accesso indesiderato verso i controllori della manovra.

CAPITOLO 11. QUADRO ECONOMICO E PIANIFICAZIONE FINANZIARIA (WBS)

Il quadro economico complessivo per la realizzazione dell'opera prevede un importo a base d'asta pari a nove milioni e duecentomila euro, ripartito nelle seguenti categorie fisiche e funzionali:

- Opere geotecniche e fondazioni profonde: Due milioni centocinquantamila euro (incidenza del ventitre virgola trentasette per cento).
- Carpenteria metallica d'impalcato e contrappeso: Due milioni ottocentocinquantamila euro (incidenza del trenta virgola novantotto per cento).
- Apparati elettromeccanici, ralla di rotazione e impianti oleodinamici: Un milione novecentomila euro (incidenza del venti virgola sessantacinque per cento).
- Infrastruttura di sensoristica FBG e sviluppo Digital Twin: Ottocentottantamila euro (incidenza del nove virgola cinquantasette per cento).
- Impianti di automazione SIL 3, segnaletica e varchi automatizzati: Un milione quattrocentoventimila euro (incidenza del quindici virgola quarantatre per cento).

11.1 Parte finanziaria e criteri della stima

Il fabbisogno preliminare dello scenario Base è pari a € 14.672.390,40, comprensivo delle ipotesi fiscali e delle riserve indicate di seguito. L'importo lavori originario di € 9.200.000 resta invariato; le somme a disposizione e gli oneri aggiunti non costituiscono preventivi, impegni di spesa o coperture finanziarie acquisite.

Tutti i valori aggiunti sono stime parametriche preliminari, espresse a prezzi costanti di ottobre 2026, da aggiornare dopo rilievi, indagini, batimetria, definizione progettuale e computo metrico estimativo. La data di riferimento non implica un aggiornamento mediante prezzario verificato. Quantità, prezzi, regime fiscale, disponibilità delle aree e condizioni autorizzative rimangono da accertare.

A Lavori

Voce	Categoria	Importo €	Incidenza
A1	Fondazioni e opere geotecniche	2.150.000,00	23,37%
A2	Carpenteria metallica e contrappeso	2.850.000,00	30,98%
A3	Elettromeccanica, ralla e oleodinamica	1.900.000,00	20,65%
A4	Sensoristica FBG e Digital Twin	880.000,00	9,57%
A5	Automazione SIL 3, segnaletica e varchi	1.420.000,00	15,43%
A	Totale lavori	9.200.000,00	100,00%

Le incidenze sono ricalcolate sugli importi originari. La qualificazione originaria "a base d'asta" è qui assunta come aggregato preliminare dei lavori: costi della sicurezza da PSC e manodopera devono essere individuati e separati nelle successive fasi. Per evitare duplicazioni, si assumono provvisoriamente ricompresi in A; se tale ipotesi non sarà confermata, il quadro dovrà essere incrementato. B3 remunera il coordinamento della sicurezza e non i costi delle misure di cantiere.

Il presente ampliamento non costituisce validazione delle prestazioni, delle geometrie e delle affermazioni tecniche della relazione originaria. In particolare, il risparmio manutentivo del 35% citato nelle conclusioni non viene assunto come beneficio certo né come entrata nel piano finanziario.

11.2 Somme a disposizione della stazione appaltante

Voce	Descrizione	Criterio preliminare	Importo €
B1	Indagini, rilievi e batimetria	2,50% di A	230.000,00
B2	Progettazione e direzione lavori	8,00% di A	736.000,00
B3	Coordinamento sicurezza in progettazione ed esecuzione	2,00% di A	184.000,00
B4	Collaudi, verifiche progettuali e prove	1,50% di A	138.000,00
B5	Allacciamenti e risoluzione interferenze	Accantonamento	250.000,00
B6	Imprevisti e contingency tecnica	10,00% di A	920.000,00
B7	Acquisizioni, espropri e occupazioni eventuali	Riserva da confermare	200.000,00
B8	Incentivi per funzioni tecniche se applicabili	Ipotesi 1,50% di A	138.000,00
B9	Gara, pubblicità, commissioni e supporti amministrativi	Accantonamento	40.000,00
B	Totale somme a disposizione		2.836.000,00

Le percentuali sono parametri di programmazione e non tariffe professionali o determinazioni normative. B2 comprende provvisoriamente progettazione, integrazione specialistica, direzione lavori e contabilità; B3 e B4 sono separati. Compensi, prestazioni, cassa previdenziale e affidamenti dovranno essere analiticamente verificati.

B6 copre in via aggregata incertezze tecniche e quantitative; non autorizza varianti né dimostra la sufficienza della riserva. B7 è un accantonamento di € 200.000, incluso nel totale ma da confermare con piano particellare e verifica demaniale; non presuppone l'esistenza di espropri. B8 è incluso solo come ipotesi, da verificare per applicabilità, base di calcolo e ripartizione.

Bonifiche, dragaggi, assistenza archeologica, opere esterne e prescrizioni degli enti non sono quantificati autonomamente in assenza di dati. L'eventuale inclusione in A o assorbimento nelle riserve deve essere verificato: importi eccedenti richiederanno aggiornamento dell'investimento. Nessuna economia di gara è anticipata.

11.3 Ipotesi fiscali e totale dell’investimento

C IVA e altri oneri

Voce	Base e ipotesi da verificare	Importo €
C1	Contributi professionali ipotizzati al 4% su B2+B3+B4 (€ 1.058.000)	42.320,00
C2	IVA ipotizzata al 22% su A (€ 9.200.000)	2.024.000,00
C3	IVA ipotizzata al 22% su B1–B6 (€ 2.458.000)	540.760,00
C4	IVA ipotizzata al 22% su C1 (€ 42.320)	9.310,40
C5	Altri tributi, bolli, diritti e oneri fiscali eventuali	20.000,00
C	Totale IVA e oneri	2.636.390,40

Il 22% è adottato come ipotesi uniforme prudenziale di budget, non come accertamento del trattamento dell’opera. Eventuali aliquote agevolate, detraibilità, scissione dei pagamenti, esenzioni e natura delle prestazioni devono essere verificati. L’IVA su B6 è una riserva per imposte sui futuri impieghi imponibili, non un’imposta dovuta sull’accantonamento.

Per B7 e B8 non si applica IVA nel modello; B9 è assunto come onere amministrativo complessivo senza ulteriore maggiorazione IVA. La corretta scomposizione fiscale di tali voci resta da verificare. Il 4% su B2–B4 è un’ipotesi convenzionale, non necessariamente applicabile a tutti gli affidatari. C5 non sostituisce il calcolo delle imposte sulle eventuali acquisizioni.

D Totale investimento

Componente	Importo €
A Lavori	9.200.000,00
B Somme a disposizione	2.836.000,00
C IVA e altri oneri	2.636.390,40
D = A + B + C Investimento lordo	14.672.390,40
Di cui IVA ipotizzata	2.574.070,40
Investimento al netto della sola IVA	12.098.320,00

Il totale lordo è il fabbisogno convenzionale in assenza di recupero IVA. Non comprende interessi, commissioni di finanziamento o inflazione futura, non ancora determinabili. Tali componenti vanno aggiunte prima dell’approvazione del piano di copertura.

11.4 Cronoprogramma finanziario pluriennale

Orizzonte illustrativo di quattro anni dall'avvio: Anno 1 = 2027, Anno 2 = 2028, Anno 3 = 2029, Anno 4 = 2030. Le date sono ipotesi di programmazione, subordinate ad autorizzazioni, coperture e affidamento; non rappresentano scadenze approvate. I pagamenti seguono avanzamento e accettazione delle prestazioni, non la sola produzione fisica.

Fase	Periodo indicativo	A €	B allocato €
Progettazione e autorizzazioni	2027–2028	0,00	850.000,00
Affidamento	2028	0,00	80.000,00
Fondazioni	2028–2029	2.150.000,00	480.000,00
Impalcato e contrappeso	2028–2030	2.850.000,00	400.000,00
Impianti elettromeccanici e automazione	2028–2030	3.320.000,00	550.000,00
FBG e Digital Twin	2027–2030	880.000,00	180.000,00
Collaudi e messa in esercizio	2029–2030	0,00	296.000,00
Totale		9.200.000,00	2.836.000,00

B è ripartito tra le fasi come budget gestionale: € 850.000 per studi e progettazione; € 80.000 per affidamento; € 480.000 per fondazioni; € 400.000 per impalcato; € 550.000 per impianti; € 180.000 per digitale; € 296.000 per verifiche finali. Sono allocazioni dello stesso totale B, non ulteriori costi. Impianti comprende integralmente A3 e A5; il Digital Twin comprende A4.

La quota C è distribuita proporzionalmente ad A+B per costruire una curva di cassa sintetica; non rappresenta il calendario fiscale delle singole fatture. Si assume l'utilizzo integrale delle riserve. Anticipazioni, ritenute, saldi, tempi di pagamento, IVA e recuperi dovranno essere modellati contratto per contratto.

11.5 Cash flow di investimento e fabbisogno

Anno	A lavori €	B somme €	C oneri €	Uscite totali €
2027	44.000,00	731.500,00	169.867,13	945.367,13
2028	2.710.000,00	744.500,00	756.680,84	4.211.180,84
2029	4.691.000,00	812.900,00	1.205.585,67	6.709.485,67
2030	1.755.000,00	547.100,00	504.256,76	2.806.356,76
Totale	9.200.000,00	2.836.000,00	2.636.390,40	14.672.390,40

Fase	2027	2028	2029	2030
Progettazione e autorizzazioni	880,8	155,4	0,0	0,0
Affidamento	0,0	97,5	0,0	0,0
Fondazioni	0,0	2564,9	641,2	0,0
Impalcato e contrappeso	0,0	792,4	2773,3	396,2
Impianti elettromeccanici e automazione	0,0	471,8	2594,7	1651,2
FBG e Digital Twin	64,6	129,2	646,1	452,3
Collaudi e messa in esercizio	0,0	0,0	54,1	306,7

Matrice per fase in migliaia di euro lordi, arrotondata a € 100; eventuali differenze dipendono dall'arrotondamento. La tabella annuale in euro è il riferimento di quadratura. Il maggiore esborso annuo è € 6.709.485,67 nel 2029.

Nessuna entrata è assunta come assegnata. In assenza di coperture documentate, il fabbisogno da finanziare coincide con le uscite, complessivamente € 14.672.390,40. La liquidità richiesta dipenderà anche dallo sfasamento tra pagamenti e rimborsi dei finanziatori: un contributo deliberato ma non incassato non elimina il fabbisogno di cassa.

Gli importi sono a prezzi costanti. A titolo di sola sensibilità, con inflazione annua del 2% e pagamenti convenzionalmente a fine 2027–2030, il fabbisogno nominale sarebbe € 15.503.437,70. Tale maggiorazione non è inclusa in D e va coordinata con le riserve, evitando duplicazioni. Il cash flow operativo decorre separatamente dalla messa in esercizio.

11.6 Esercizio manutenzione e fondo rinnovi

Costo annuo a regime	Importo €
Presidio operativo, reperibilità e gestione manovre	95.000,00
Energia elettrica e utenze	25.000,00
Manutenzione meccanica e oleodinamica ordinaria	65.000,00
Strutture, protezioni e ispezioni ordinarie	40.000,00
Digital Twin, cloud, licenze e cybersecurity	45.000,00
Assicurazioni, verifiche ricorrenti e amministrazione	30.000,00
Totale esercizio e manutenzione ordinaria	300.000,00
Accantonamento annuo fondo rinnovi	80.000,00
Fabbisogno annuo prima dell'IVA eventuale	380.000,00

Valori annui a prezzi costanti ottobre 2026, al netto dell'IVA eventuale. Si assume gestione condivisa con reperibilità: non è dimensionato un presidio esclusivo continuativo 24 ore su 24. Numero di manovre, turni, consumi reali, contratti software e livelli di servizio potranno modificare sensibilmente la stima. Non si assume alcun risparmio certo derivante dall'IA.

Se, per sola sensibilità, tutti i costi esterni di esercizio e rinnovo fossero gravati da IVA non recuperabile al 22%, il budget annuo equivalente salirebbe a € 463.600. L'accantonamento non è di per sé imponibile: € 97.600 rappresenta il fondo annuo comprensivo della futura riserva IVA, da affinare secondo la natura effettiva delle spese.

Anno di esercizio	Rinnovo straordinario ipotizzato	Costo €
8	Sensori, apparati edge e componenti digitali	400.000,00
15	Revisione elettromeccanica e oleodinamica	600.000,00
22	Automazione e infrastruttura digitale	400.000,00
30	Rinnovi maggiori meccanici e protezioni	1.000.000,00
Totale		2.400.000,00

Il fondo di € 80.000 annui accumula € 2.400.000 in 30 anni, senza rendimenti reali. Con accantonamenti a fine anno prima dei prelievi, il saldo dopo i rinnovi agli anni 8, 15, 22 e 30 è rispettivamente € 240.000, € 200.000, € 360.000 e zero. Le vite utili sono ipotesi, da sostituire con piano di manutenzione e indicazioni dei fornitori.

11.7 Analisi del costo del ciclo di vita su 30 anni

L'analisi LCC considera 30 anni di esercizio, euro costanti ottobre 2026 e tasso reale convenzionale del 3% annuo. Per confrontabilità, l'investimento è assunto al tempo zero, all'entrata in esercizio, senza capitalizzare il periodo costruttivo. È una misura dei costi del proprietario, non un'analisi costi-benefici né un piano finanziario asseverato.

Il costo attualizzato somma l'investimento iniziale, i costi ordinari annui scontati per ciascuno dei 30 anni e i rinnovi scontati alle rispettive scadenze. Il valore residuo è assunto pari a zero, in via prudenziale, senza implicare esaurimento fisico dell'opera. Non si ipotizza demolizione al trentesimo anno; eventuali costi di dismissione sono esclusi e da stimare se pertinenti.

Componente al netto della sola IVA	Non attualizzato €	Attualizzato al 3% €
Investimento iniziale incluse riserve e altri oneri	12.098.320,00	12.098.320,00
Esercizio e manutenzione per 30 anni	9.000.000,00	5.880.132,40
Rinnovi programmati	2.400.000,00	1.321.624,62
LCC complessivo	23.498.320,00	19.300.077,03
Costo annuo equivalente su 30 anni		984.675,63

Il fondo rinnovi è uno strumento di accantonamento: nel LCC entrano esclusivamente i prelievi per interventi, non anche gli € 80.000 annui. Il costo iniziale comprende le riserve del quadro, per un criterio prudenziale di budget; economie effettive ridurrebbero il costo finale. Benefici su traffico, navigazione, sicurezza ed emissioni non sono monetizzati.

Tasso reale ipotizzato	LCC attualizzato €
2%	20.415.268,16
3%	19.300.077,03
4%	18.388.465,60

Con IVA iniziale non recuperabile e ipotesi semplificata di IVA al 22% su tutti i futuri esborsi operativi e rinnovi, il LCC lordo al 3% sarebbe € 23.458.533,97. La fiscalità effettiva di personale, assicurazioni e altre voci può ridurre tale importo. Interessi e rimborso del capitale non sono sommati al LCC per evitare commistioni con il costo dell'investimento.

11.8 Scenari economici e rischi

Gli scenari sono sensibilità parametriche, non previsioni probabilistiche. Le variazioni si applicano all'intero investimento dello scenario Base, già comprensivo di contingency, e pertanto non costituiscono un secondo fondo da aggiungere al quadro. L'importo A di € 9.200.000 resta la base documentale; le variazioni seguenti esplorano possibili esiti futuri.

Indicatore	Ottimistico	Base	Prudenziale
Variazione investimento	−5%	0%	+15%
Variazione O&M e rinnovi	−10%	0%	+20%
Investimento lordo €	13.938.770,88	14.672.390,40	16.873.248,96
Investimento senza IVA €	11.493.404,00	12.098.320,00	13.913.068,00
O&M annuo senza IVA €	270.000,00	300.000,00	360.000,00
Fondo rinnovi annuo €	72.000,00	80.000,00	96.000,00
LCC netto IVA al 3% €	17.974.985,32	19.300.077,03	22.555.176,43

Le scadenze di rinnovo e il tasso reale rimangono invariati nei tre scenari, così da isolare l'effetto dei costi. Lo scenario prudenziale può risultare insufficiente in presenza di varianti geometriche, geotecniche o autorizzative rilevanti. Ritardi, inflazione e costo del debito richiedono sensitività dedicate e non sono automaticamente coperti dal +15%.

La sostenibilità finanziaria richiede copertura dell'intero investimento, disponibilità della cassa nei periodi di maggiore spesa e stanziamenti ricorrenti di almeno € 380.000 annui prima dell'IVA eventuale nello scenario Base. In assenza di ricavi dimostrati, si assume ricavo operativo pari a zero e un fabbisogno annuo equivalente interamente a carico del soggetto gestore o dei finanziatori.

Prima dell'affidamento occorre aggiornare il registro dei rischi con geotecnica e fondazioni, corrosione marina, forniture speciali, interferenze, autorizzazioni, cybersecurity e obsolescenza digitale; attribuire responsabilità e misure di mitigazione; ricalcolare le riserve e verificare compatibilità con il bilancio pluriennale.

11.9 Opzioni di finanziamento e verifiche successive

Opzione	Condizione per l'eventuale utilizzo
Comune e altri enti locali	Risorse proprie o cofinanziamento, previa programmazione e verifica degli equilibri di bilancio.
Regione Lazio e Stato	Eventuali programmi infrastrutturali, accordi e contributi, subordinati a requisiti, istruttorie e assegnazioni.
Unione europea	Eventuali programmi coerenti con mobilità, infrastrutture e innovazione; ammissibilità e calendari da verificare.
Finanziamento a debito	Eventuali mutui o prestiti istituzionali; capacità di rimborso, tassi, durata e autorizzazioni da determinare.
PPP o concessione	Da valutare mediante confronto con appalto tradizionale, allocazione dei rischi e sostenibilità di ricavi o canoni.
Altri soggetti pubblici o privati	Possibili accordi con enti competenti e operatori interessati, senza assumere impegni o disponibilità.

Nessuna opzione è indicata come disponibile, concessa o impegnata. Non sono attribuite quote di copertura né previsti pedaggi. Un eventuale PPP richiede piano economico-finanziario, verifica della domanda, analisi di convenienza e degli oneri pubblici per l'intera durata; i canoni possono generare impegni pluriennali anche in assenza di ricavi da utenza. Non sono calcolati VAN finanziario, TIR o DSCR in assenza di struttura del debito ed entrate attendibili.

Per consolidare il quadro: completare rilievi e indagini; definire alternative e prescrizioni; redigere computo metrico e costi della sicurezza; determinare compensi e oneri fiscali; acquisire preventivi per impianti e gestione; sviluppare calendario contrattuale dei pagamenti; verificare coperture e manutenzione pluriennale. Ogni aggiornamento dovrà riportare data prezzi, fonti, quantità, ipotesi e scostamenti rispetto al presente scenario Base.

Riferimenti di inquadramento per l'ampliamento

D.Lgs. 36/2023 e successive modifiche, Allegato I.7, art. 5, per l'articolazione del quadro economico: testo ufficiale su Normattiva, https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2023-03-31;36 . L'inquadramento non sostituisce la verifica della disciplina applicabile alle successive fasi.

Ministero dell'Economia e delle Finanze, banca dati tributaria, chiarimenti sull'aliquota IVA ordinaria del 22%: https://def.finanze.it/DocTribFrontend/getPrassiDetail.do?id=%7B07779046-2AD3-45FD-8B4F-1716D0D5F5E6%7D . Il riferimento all'aliquota ordinaria non determina l'aliquota effettivamente applicabile all'opera. I parametri economici di questo ampliamento sono ipotesi di studio, non valori desunti dalle fonti normative.

Ing. Diego Dell'Erba — La Nuova Ingegneria & Cyber Physical Engineering
Ottobre 2026

CAPITOLO 12. CONCLUSIONI E RIFERIMENTI NORMATIVI

La presente relazione tecnico-scientifica integrale definisce la fattibilità, la sicurezza strutturale e l'efficienza operativa del Ponte Girevole Intelligente sul Porto Canale di Fiumicino. La convergenza tra ingegneria delle strutture, geotecnica, meccanica di precisione, intelligenza artificiale e piattaforme digitali trasforma l'opera in un modello avanzato per la gestione dell'intero ciclo di vita infrastrutturale.

L'adozione del sistema cyber-fisico garantisce una riduzione dei costi manutentivi stimata nel trentacinque per cento e una durata utile superiore ai cento anni, assicurando il rispetto dei requisiti idraulici, urbanistici e di sicurezza della navigazione.

Riferimenti Normativi e Bibliografici

[1] Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centro Settentrionale, *Porto di Fiumicino*, informazioni istituzionali ed idrauliche di ambito portuale.

[2] Comune di Fiumicino, *Progetto di fattibilità per la ristrutturazione degli organi meccanici del Ponte Due Giugno e della passerella mobile*, documentazione di inquadramento territoriali.

[3] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Decreto 17 gennaio 2018 - Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*, Gazzetta Ufficiale n. 42 del 20 febbraio 2018.

[4] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, *Decreto 9 marzo 2023 - Modifiche ed integrazioni alle Norme Tecniche per le Costruzioni*, Gazzetta Ufficiale n. 69 del 22 marzo 2023.

[5] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, *Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 - Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche per le Costruzioni*.

[6] Comitato Elettrotecnico Italiano, *Norma CEI EN 61508 / IEC 62061 - Sicurezza funzionale dei sistemi elettrici, elettronici ed programmabili per la sicurezza dei macchinari*.

[7] International Organization for Standardization, *ISO 13849-1 - Sicurezza del macchinario e parti dei sistemi di comando legate alla sicurezza*.

[8] Dell’Erba Diego, *Cyber Physical Engineering e Gestione Digitale delle Infrastrutture Strategiche*, Editrice Ingegneria Integrata, Roma, 2026.