

PONTE A MARGHERA

tiere

Alta tensione

La nuova infrastruttura di raccordo tra l'area portuale, il futuro Corridoio 5, l'arteria transeuropea che collegherà il continente da Est a Ovest, e il Passante di Mestre diventa l'occasione per una ridefinizione complessiva degli accessi alla città

di Claudio Guastoni



L'albero maestro, una prua affusolata, numerose sartie che si stagliano a raggera sull'orizzonte. Visto da lontano e in controluce appare come la sagoma di una nave. Si tratta, invece, del nuovo ponte strallato sul canale industriale Ovest di Marghera, i cui lavori si stanno avviando alla conclusione. L'opera rientra tra quelle previste dalla variante al piano regolatore del Comune di Venezia per la zona di Porto Marghera, nel quadro del collegamento della zona portuale con la rete autostradale del Corridoio 5, e avrà la funzione di collegare il costruendo Passante di Mestre con la zona portuale di Marghera. Da tempo, l'obiettivo di riorganizzare gli accessi a questo porto commerciale era attentamente valutato dall'Autorità Portuale di Venezia, che ha messo in luce non solo la necessità di agevolare i traffici indotti dall'incremento delle sue attività, ma anche di ottenere effetti positivi sui livelli di inquinamento di un'area urbana che si sta evolvendo. L'opera, i cui lavori sono iniziati nell'aprile 2002 e si concluderanno entro l'anno in corso, rappresenta la prima fase di un intervento più generale di riorganizzazione e ridisegno dei flussi di entrata e uscita della città, con la realizzazione di un itinerario a carreggiate separate e doppia corsia per senso di marcia.

L'intervento è tra i punti di forza di un'operazione di riqualificazione ambientale che comprende interventi di elevata qualità architettonica con effetti di miglioramento paesaggistico, che ha preso avvio alla fine degli anni Novanta, ed è composto da un sistema di travi longitudinali e trasversali, realizzate in acciaio Corten (quindi autoprotetto), rivestito ulteriormente da un involucro protettivo esterno. Le giunzioni sono di tipo bullonato, con bulloni ad alta resistenza con funzionamento ad attrito, per garantire grande rapidità esecutiva.

Il progetto strutturale

Il ponte, lungo 468 m e con sviluppo curvilineo in pianta, si compone di tre elementi strutturalmente distinti: l'impalcato principale sul canale di sei

campate continue, una campata isostatica di raccordo e una bretella di raccordo di tre campate continue. I tre impalcati sono larghi rispettivamente 23,7 m, 17,2 m e 7,55 m. La struttura principale, lunga complessivamente 387 m, si dispone su un raggio di curvatura costante di 175 m di raggio. Le due campate principali sul canale, lunghe 105 m e 126 m, sono sostenute da due fasci di 9 stralli per ciascun lato del pilone, disposti sull'asse centrale dell'impalcato e sostenuti da un singolo pilone, alto quasi 74 m rispetto alla quota del canale, inclinato 25° rispetto all'asse verticale, e caratterizzato da una particolare geometria a sezione triangolare in cui sia i lati che gli angoli interni variano lungo l'altezza formando superfici esterne a sviluppo elicoidale. Formati da fasci di trefoli in numero da 34 a 91, gli stralli confluiscono alla sommità del pilone per mezzo di selle d'acciaio preventivamente inserite nel calcestruzzo. Le campate su terra hanno luce di circa 42 m e le pile sono posizionate in base alle linee ferroviarie esistenti. La campata isostatica ha una luce di 36 m mentre la bretella di accesso a via dell'Azoto consiste in tre campate da 56 m, 68 m, e 55 m di luci. Le rampe di accesso al ponte sono tutte in muro in terra armata con pannelli prefabbricati e tiranti in acciaio zincato, le pile in terra sono costituite da fusti circolari in cemento armato ordinario (diametro 2,50 m), men-

tre il pilone centrale è in calcestruzzo autocompattante. L'impalcato in curva è in struttura mista acciaio-calcestruzzo (soletta di calcestruzzo e travi longitudinali e trasversali d'acciaio), formato da tre cassoni concentrici collegati da diaframmi posti a 5,25 m di interasse e soletta superiore in calcestruzzo. L'intradosso dell'impalcato è costituito da una lamiera irrigidita in acciaio.

Il segreto sta nel metodo

Alla fine del 2001 vengono appaltati i lavori, e nella primavera 2002 si apre il cantiere. Lo spostamento di tutti i sottoservizi per realizzare palificazioni, fondazioni ed elevazioni delle pile a terra e della pila in alveo, ha richiesto all'impresa un grande impegno, durato più di un anno.

Tutto è stato preceduto da approfondite indagini geologiche e rilievo minuzioso del fondo del canale, per verificare la portanza dei pali in relazione ai carichi, la capacità portante dei rilevati, l'adeguatezza delle opere temporanee in alveo necessarie a eseguire la fondazione del pilone e la costruzione dell'impalcato. Le condizioni geologiche hanno determinato l'allungamento, in media del 15 per cento, di tutti i pali di fondazione, e la necessità di opere di rinforzo dei rilevati in terra armata e delle opere temporanee in alveo. Le fondazioni delle pile e delle spalle del ponte sono state realizzate con pali

In alto e in apertura, il ponte strallato in opera. A destra, il sistema strutturale in acciaio dell'impalcato, dall'andamento curvilineo.





Macroelementi per l'impalcato

Per limitare al minimo la disposizione di pile in alveo nel canale navigabile, il montaggio dell'impalcato è avvenuto per grandi macroelementi, con la suddivisione delle travate sospese in due semitravate secondo una precisa sequenza. Gli elementi delle travate sono stati fabbricati in apposita officina e trasportati in cantiere. Sono state poi predisposte stilate provvisorie. La prima semitravata (pesante 580 t, lunga 90 m e larga 24 m) con l'ausilio di una gru da terra, è stata montata su chiatte, sopra centine provvisorie, tenendo conto anche della marea per eseguire i lavori in sicurezza, ed è stata poi sollevata fino a raggiungere il livello di progetto. Ha così avuto inizio il trasporto via mare. La semitravata è stata posizionata in corrispondenza degli appoggi definitivi dell'antenna centrale e della pila provvisoria. Dopo la traslazione della chiatte nella posizione corretta, con un sistema di calaggi meccanizzati la travata è stata abbassata, fino a farla appoggiare con cura sugli appoggi descritti. È avvenuta quindi la sistemazione dei vincoli provvisori: ingaggio nei dispositivi di centraggio, posa sugli appoggi, chiusura degli appoggi a cerniera. A questo punto la travata è diventata autoportante. Determinanti, gli appoggi a cerniera che hanno consentito la rotazione della travata: nella fase di trasporto, infatti, la travata, per il peso proprio, è caratterizzata da una curvatura convessa verso il basso; con l'appoggio e la fase di trasferimento del carico, si modifica, ruotando, in concava verso l'alto. Successivamente è avvenuta la ripetizione delle operazioni per la seconda semitravata, lunga circa 103 metri e del peso di 860 t.

trivellati di lunghezza variabile da 33 a 43 m, con diametro di 1.000 mm per le pile e 1.500 mm per le spalle. Per migliorare il comportamento globale dell'opera riducendo i rischi di cedimenti anomali, l'impalcato è stato esteso di 42 m (lato via Volta) aggiungendo un'ulteriore campata isostatica. L'intervento non solo ha ridotto la dimensione della rampa su rilevato diminuendo i rischi connessi, ma ha creato anche un'area accessibile sotto l'impalcato sfruttabile per aree di parcheggio e manovra di veicoli, particolarmente utile in quella zona. Inoltre, al di sotto dei rilevati è stato realizzato un sottotondo in terra armata con lamine d'acciaio, per incrementarne il coefficiente di sicurezza alla rottura. La fondazione della pila in alveo ha richiesto l'infissione di un palancolato: prima è stato riempito con terreno incoerente, poi vi sono stati inseriti due ordini di tiranti per contenere la spinta del terreno. Dopo aver eseguito un ponte di accesso al palancolato con tutti i mezzi di lavoro, sono stati realizzati 60 pali di fondazione posti a 50 m di profondità, operando dal terrapieno realizzato all'interno del palancolato. Rimosso poi il terreno all'interno fino alla quota prevista, è avvenuto il getto del tappo di fondo in calcestruzzo magro, lo svuotamento del palancolato dall'acqua, la posa dell'armatura e il getto della fondazione del pilone. Tale procedimento ha consentito di limitare notevolmente l'uso di pontoni e lavorazioni in acqua. I viadotti d'accesso sono stati messi in opera in tempi molto ridotti durante la fabbricazione del ponte principale, con sistema tradizionale, sollevando conci di travi premontate e posizionandole su stilate provvisorie. Per quanto riguarda l'impalcato, la struttura è stata realizzata con l'assemblaggio di elementi principali longitudinali in composizione saldata, con sezione a cassone centrale e travi a doppio T laterali, collegati da diaframmi (anch'essi in composizione saldata con sezione a doppio T) e giunzioni di forza realizzate con bullonatura.

Per facilitarne il montaggio la struttura è stata segmentata in travate di lunghezza media di 10,50 m, autostabili flessionalmente e torsionalmente per le zone di terra, e due segmenti più grandi a cavallo del pilone in alveo. Le travate a terra sono state assemblate a piè d'opera e varate con autogru sulle pile provvisorie. Le travate sul canale sono state pre-assemblate in officina e, una alla volta, su un



pontone dotato di torri di sollevamento, portate in sede e posizionate tramite martinetti sulle teste delle torri di sollevamento. Si sono così ridotti, in fase di montaggio, i rischi operativi connessi alle numerose saldature in opera e alla presenza di un'area caratterizzata da cantieri navali in esercizio, strade e scali ferroviari, con problemi di protezione e di sicurezza per operatori e passanti. Posizionate le travate longitudinali, l'opera è stata completata con il montaggio della struttura reticolare di fondo. All'esterno la struttura d'impalcato sarà rifinita con l'installazione di pannelli di completamento non strutturali, costituiti da un supporto di lamiera di acciaio inox Aisi 316 da 5/10, da una massa interna formata da espanso rigido a base di resine poliuretatiche e, sul lato interno, da un altro supporto di acciaio preverniciato. Il carter

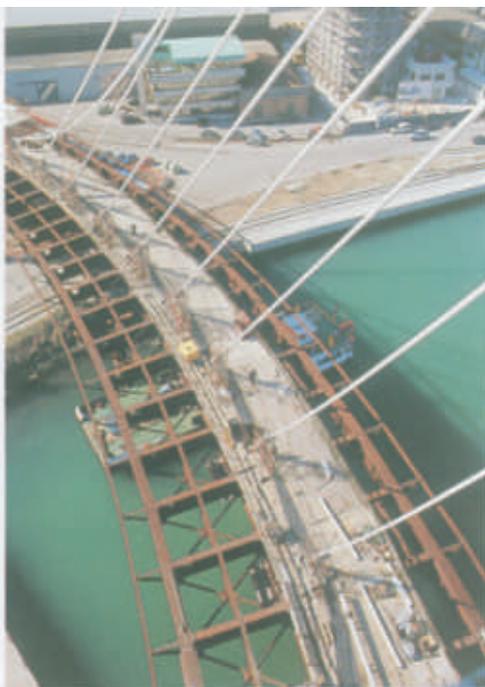




Sopra, posa in opera e tensionamento degli stralli. Nella pagina a fianco, diverse fasi di montaggio e tamponamento esterno dell'impalcato.

svolge una funzione estetica, mascherando la struttura dell'impalcato, e di protezione delle strutture interne in acciaio dagli agenti atmosferici.

Tale soluzione non solo limita le operazioni di manutenzione periodica della struttura (riverniciatura interna ed esterna) che una simile opera, soprattutto in un ambiente difficile, imporrebbe con notevole frequenza, ma consente altresì di garantire maggiormente i tempi di fabbricazione riducendo i rischi di possibili ritardi legati a operazioni di saldatura esterne dovute, per esempio, a compensazione dei ritiri, correzione di errori, o riparazione delle saldature difettose. I tempi di montaggio in cantiere sono stati ridotti, e inoltre, in opera sarebbe risultato più difficile correggere o compensare eventuali errori in quanto si sarebbe subito maggiormente l'influenza delle condizioni meteorolo-



Tensionamento sotto osservazione

Il montaggio e il tensionamento degli stralli ha rappresentato una delle fasi più delicate e tecnologicamente avanzate nella realizzazione di quest'opera. Proprio grazie all'azione combinata di stralli e antenna, infatti, il ponte è rimasto sospeso senza più l'ausilio delle pile provvisorie in alveo. Lo strallo è formato da un numero di trefoli variabile da 34 a 91 (in base allo sforzo cui viene sottoposto), rivestiti da una guaina in polietilene ad alta densità dello spessore di 1,5 mm, con interposto uno strato di cera. Ogni trefolo, in acciaio ad alta resistenza zincato a caldo, ha un diametro di 14 mm, pesa circa 1 kg/m, sopporta sforzi 4 volte superiori all'acciaio normale ed è formato a sua volta da 6 fili esterni e un filo centrale, ognuno con dia-

metro di circa 6 mm. Lo strallo è a sua volta protetto da una guaina esterna in polietilene ad alta densità dello spessore di 6-8 mm, formata da elementi di 12 m presaldati, caratterizzati da un cordolino elicoidale antivibrazione.

I trefoli, portati in cantiere in multibobine su autotreni, sono stati srotolati per iniziare le operazioni di montaggio. La guaina, lunga circa 110 m, dopo l'imbragatura è stata sollevata: con una gru a torre, un'estremità è stata portata fino all'ancoraggio dell'antenna a circa 70 m di quota, mentre da terra un'autogru telescopica infilava l'altra estremità nell'ancoraggio fisso predisposto sull'impalcato nel ponte. Nella guaina è stato poi infilato un trefolo pilota, tensionandolo fino a raddrizzare quasi completamente la guaina, portandola nella posizione definitiva.

A quel punto, gradualmente e tramite il trefolo pilota, sono stati inseriti nella guaina gli altri trefoli, uno alla volta, e successivamente ha avuto inizio, con appositi martinetti di tesatura, il loro tensionamento in base al tonnellaggio indicato dal progetto. Poi i trefoli sono stati bloccati con malte sintetiche per evitare movimenti. In seguito si è intervenuti sugli altri stralli ripetendo le operazioni, eseguendovi poi equitensioni in base ai criteri progettuali. I monitoraggi topografici effettuati in queste fasi per valutare i piccoli spostamenti dell'antenna e i sollevamenti dell'impalcato esercitati dagli stralli, sono stati eseguiti con distanziometri a stazione integrale, costituiti da laser e stick rifrangenti incollati sui punti inaccessibili della carpenteria e degli stralli, al posto del tradizionale prisma.

Nelle foto, alcune fasi del processo di fissaggio degli stralli, in acciaio rivestito da una guaina protettiva di polietilene, all'impalcato del ponte, effettuato con l'ausilio di una gru a torre e un'autogru telescopica.





In queste pagine, l'aggancio degli stralli al pilone portante, attraverso selle di carpenteria metallica, tubi forma esterni, carte di raccordo e protezione.

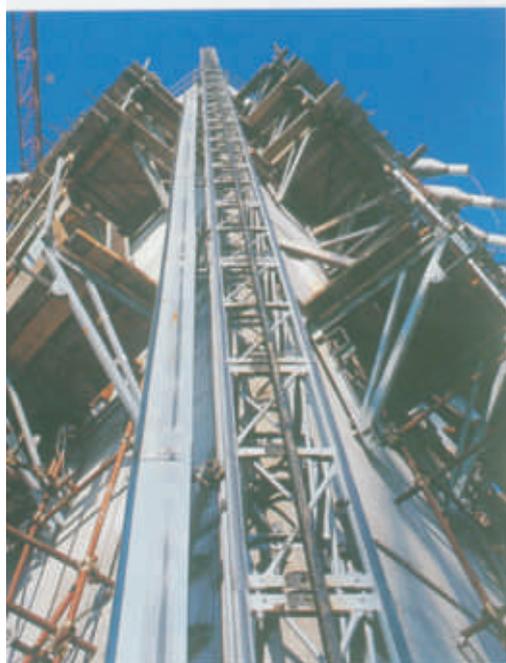
Antenna di ancoraggio

Il sistema d'ancoraggio degli stralli all'antenna, realizzato con lo stesso sistema usato per il collegamento all'impalcato, consiste in strutture metalliche atte a trasferire le forze orizzontali trasmesse dagli stralli corrispondenti, realizzandone la continuità statica, e a trasferire al calcestruzzo dell'antenna le relative reazioni verticali. Il sistema si compone di selle di carpenteria metallica, tubi-forma esterni alle piastre di base che guidano e vincolano l'estremità superiore dello strallo e permettono l'alloggiamento di dampers-deviatori, e infine carter di raccordo e protezione. Per attenuare vibrazioni e oscillazioni di questi stralli, dovuti principalmente all'azione del vento e al traffico di percorrenza, sono stati installati appositi dampers-deviatori anulari, realizzati con elastomero a elevato smorzamento, alle estremità superiori e inferiori degli stralli, alloggiati nei tubi-forma. Riducendo le rotazioni angolari dei trefoli all'entrata della testa d'ancoraggio, i dampers eliminano le sopraindicate vibrazioni degli stralli; guaine in polietilene ad alta densità, dotate di risvolti elicoidali, si occupano invece di evitare al manufatto le vibrazioni indotte dall'effetto combinato di vento e pioggia. L'ancoraggio così concepito non solo migliora le prestazioni statiche degli stralli nei confronti di questo tipo di sollecitazioni, indotte da fattori meccanici e fisici, ma all'occorrenza facilita la sostituibilità e l'ispezionabilità degli stessi sistemi di ancoraggio posti in opera.

giche. Contemporaneamente procedeva la costruzione del pilone in alveo, sulla cui sommità venivano disposte le selle di ancoraggio per le parti superiori degli stralli. La sua particolare morfologia triangolare a sezione variabile ha richiesto particolari cure esecutive all'impresa. Per semplificarne la costruzione, mantenendo sempre gli ottimi livelli di finitura superficiale previsti dal progetto originario, sono state utilizzate speciali casseforme rampanti formate da pannelli di legno, irrigidimenti secondari verticali in legno e due irrigidimenti trasversali in acciaio per ogni concio. Dopo questa fase la struttura è stata mantenuta in posizione tramite mensole diga, dimensionate in modo da assorbire la spinta del calcestruzzo. Le riprese di getto tra un concio e l'altro sono state evidenziate con un marcapiano orizzontale con sezione a trapezio, della profondità di 20 mm per un'altezza massima di 80 mm. I marcapiani sono stati disposti tra le armature orizzontali in modo da non ridurre il copriferro in nessun punto. L'utilizzo di calcestruzzo au-

to-compattante ha consentito di ottenere un ottimo grado di compattazione e finitura superficiale nonostante l'alta percentuale di armatura presente: grazie all'elevato grado di fluidità e l'assenza di segregazione, ha evitato fenomeni di bloccaggio scorrendo attraverso restringimenti di sezione e zone particolarmente congestionate dalle armature. Un piccolo ponte di servizio ha consentito di allestire l'isola centrale di appoggio al pilone e tutte le fasi esecutive del pilone stesso, nonché la posa della gru di servizio alta 85 m utilizzata nel corso dei lavori. Quest'ultima, mantenuta a un'altezza di circa 42 m fino alla realizzazione di metà pilone, è stata poi portata a tutta altezza per servire meglio il cantiere. Inoltre, una piattaforma fissata al pilone consentiva agli operatori di muoversi velocemente e in condizioni di sicurezza. Poiché la carpenteria era variabile su tutti i conci, è stato necessario un controllo topografico continuo per ogni fase di getto. Grazie al cassero rampante, che consentiva di realizzare conci di 3 m alla volta, in 6

mesi l'elevazione del pilone è stata portata a termine. Terminato il pilone in alveo e l'installazione delle selle d'ancoraggio, è iniziata la posa degli stralli e il primo tensionamento controllato. Durante il tensionamento in prima fase le stilate provvisorie vengono scaricate e il carico della travata viene riportato tutto all'antenna e alla fondazione principale. Installati i tiranti che sospendono l'impalcato, si è proceduto con l'esecuzione del getto della soletta per conci partendo dal pilone in alveo. Poiché il getto della soletta comportava un graduale aumento di carico sulla struttura e quindi un aumento di tensione negli stralli, era necessario, parallelamente, ritensionare e controllare di nuovo gli stralli, per fasi diverse, per posizionare l'impalcato nella posizione precedente, secondo la configurazione geometrica finale. Alla fine tutti i tiri degli stralli devono essere equilibrati in modo da passare esattamente per il baricentro dell'antenna, per non determinarne flessioni, prima di disarmo, rimozione delle pile provvisorie e opere di finitura.



Il cantiere in cifre

- Lunghezza complessiva del ponte: **468 m + 168 m (bretella di raccordo)**
- Larghezza della sede stradale principale: **23,70 m**
- Larghezza della sede stradale della bretella di raccordo: **7,55 m**
- Campate strallate: **2 da 105 m e da 126 m**
- Campate a terra ponte principale: **6 per complessivi 237 m**
- Campate della bretella di raccordo: **3 per complessivi 168 m**
- Struttura di terra armata per rampe di accesso: **5.200 m²**
- Pile a terra: **9 di altezza 7 m**
- Altezza del pilone centrale in alveo: **73,85 m s.l.m.m.**
- Pali di fondazione Ø 1.000: **7.200 m**
- Quantità di carpenteria metallica utilizzata: **4.055.000 kg**
- Peso delle due campate posizionate con due sollevamenti: **580 ton e 860 ton**
- Quantità di calcestruzzo tipo SCC utilizzato per il pilone centrale: **1.650 m³**
- Quantità di calcestruzzo delle varie classi utilizzato per le strutture: **5.200 m³**
- Quantità di calcestruzzo tipo SCC utilizzato per la soletta dell'impalcato: **3.000 m³**
- Quantità di acciaio per opere in c.a.: **2.430.000 kg**
- Quantità di acciaio armonico per postensione pilone centrale: **18 cavi pari a 42.000 kg**
- Numero stralli: **9 x 2**
- Numero testate di ancoraggio: **36**
- Quantità di acciaio armonico zincato viplato per stralli: **120.000 kg**



Equilibrisimo d'impresa

L'impresa ha gestito il cantiere integrando attività progettuale e cantieristica e un cronoprogramma dei lavori rispettato, nonostante la sequenza delle fasi non consentisse sovrapposizioni delle attività. Punti forti del progetto sono la semplificazione strutturale, la chiarezza del metodo costruttivo e l'analisi delle singole fasi di montaggio. Le 35 fasi esecutive, corredate da sottofasi, sono state progettate, valutate analiticamente, controllate e perfezionate, per collegare i vari elementi, concretizzando un'opera che si distingue per la snellezza delle strutture, la trasparenza del sistema di strallatura, e che esprime, nell'antenna e nel pilone in alveo a forma di prua, una simbologia navale in piena sintonia con le tradizioni di Venezia.