



Le verifiche idrauliche negli attraversamenti ferroviari: il ponte sul fiume Esino

Hydraulic checks in railway crossings: the bridge over the Esino river

Stefano MONNI ^(*)
Alessandra ZAMMUTO ^(**)
Enrico ASTOLFI ^(***)

Sommario - In un contesto generale in cui sono sempre più evidenti gli effetti del surriscaldamento terrestre che comporta fenomeni meteorologici caratterizzati da piogge intense e concentrate in periodi di tempo sempre più brevi, la gestione poco attenta del territorio ed in particolare dei corsi d'acqua da parte dell'uomo ha comportato conseguenze a volte ingestibili e disastrose. Nel corso del tempo ci siamo impossessati di spazi propri dei torrenti, li abbiamo confinati in alvei angusti, li attraversiamo con ponti ed opere viarie che ostacolano il naturale deflusso delle acque durante le fasi di piena. È evidente quindi la necessità di una maggiore attenzione in termini di prevenzione, attraverso la quale affermare la cultura del rispetto della risorsa idrica, la sicurezza della collettività e, per quanto riguarda le opere infrastrutturali esistenti, la necessità di promuovere una conoscenza più approfondita dei fenomeni che le riguardano in modo tale da porre in essere piani di azione adeguati con l'obiettivo di mantenere standard di sicurezza elevati.

1. Introduzione

I ponti ferroviari in particolare sono opere d'arte di fondamentale importanza, non solo dal punto di vista strutturale, ma anche per la loro funzione specifica di consentire all'infrastruttura il superamento dei corsi d'acqua in condizioni di sicurezza.

È evidente quindi lo stretto rapporto tra l'opera, il territorio circostante e il bacino del corso d'acqua su cui insiste.

Nel tempo è cambiata la normativa di riferimento e sono aumentati i dati a disposizione per effettuare una valutazione molto più attendibile delle portate di progetto.

Summary - In a general context in which the effects of terrestrial overheating are increasingly evident, involving meteorological phenomena characterised by intense rain concentrated in increasingly shorter periods of time, the careless management of the territory by man and in particular of the waterways has led to sometimes unmanageable and disastrous consequences. Over time we have taken possession of spaces of the streams, we have confined them in narrow riverbeds, we cross them with bridges and road works that obstruct the natural flow of water during flood phases. The need for greater attention in terms of prevention is therefore evident, through which to affirm the culture of respect for water resources, the safety of the community and, as regards existing infrastructural works, the need to promote a more in-depth knowledge of the phenomena that concern them in such a way as to put in place adequate action plans with the aim of maintaining high safety standards.

1. Introduction

The railway bridges in particular are structures of fundamental importance, not only from a structural point of view, but also for their specific function of allowing the infrastructure to cross watercourses in safe conditions.

The close relationship between the work, the surrounding area and the basin of the watercourse on which it stands is therefore evident.

Over time, the reference legislation has changed and the data available to make a much more reliable assessment of the project's flow rates has increased.

At the same time, the territory has also undergone an evolution: in Italy, especially in the lowland areas, the con-

^(*) Hydea S.p.A. Civil Engineer | Head of Department, Infrastructure.

^(**) RFI S.p.A. | Direzione Tecnica - Standard Infrastruttura - Corpo Stradale.

^(***) RFI S.p.A. | Direzione Territoriale Produzione Ancona - S.O. Ingegneria - Staff Geologia.

^(*) Hydea S.p.A. Civil Engineer | Head of Department, Infrastructure.

^(**) RFI S.p.A. | Direzione Tecnica - Standard Infrastruttura - Corpo Stradale.

^(***) RFI S.p.A. | Direzione Territoriale Produzione Ancona - S.O. Ingegneria - Staff Geologia.

Nel contempo anche il territorio ha subito un'evoluzione: in Italia, soprattutto nelle aree di pianura, il consumo di suolo e il conseguente aumento della percentuale di aree impermeabili, dal dopoguerra ad oggi è fortemente aumentato. Dagli anni 50 ad oggi si è riscontrato un incremento percentuale della copertura artificiale del terreno del 184% (dal 2.7% al 7,65%) con una compromissione di 23.064 km² di territorio (ISPRA [1]).

È quindi corretto che periodicamente, nell'ambito delle politiche manutentive dell'infrastruttura ferroviaria, venga condotta una verifica della compatibilità idraulica delle opere di attraversamento. In particolare RFI S.p.A. sta sottoponendo a verifica tutti i ponti con luce netta complessiva maggiore di 6 metri, anche per ottemperare alle prescrizioni delle Norme di Attuazione dei Piani di Bacino di alcune Autorità Distrettuali che impongono agli Enti Gestori delle infrastrutture di effettuare studi di compatibilità idraulica delle opere d'arte esistenti.

Nel seguente articolo sarà esposto un caso pratico riferito alle problematiche relative all'interazione tra la corrente dei corsi d'acqua e le opere di sostegno degli attraversamenti ferroviari collocati in alveo. Tali opere, se collocate all'interno della sezione di deflusso libero dell'acqua e non adeguatamente dimensionate, provocano di fatto un restringimento della sezione stessa e, di conseguenza, la variazione dell'assetto idrometrico della corrente, in particolare durante le fasi di piena del corso d'acqua.

Il fenomeno idraulico più visibilmente rilevante durante una fase di piena di un corso d'acqua è rappresentato dal rialzo idraulico che è l'aumento del tirante idrico a monte dell'ostacolo. Le portate connesse a tempi di ritorno elevati (per esempio 200 o 300 anni) sono in grado di provocare sovralti notevoli, in relazione al restringimento della sezione ed alle condizioni di deflusso che si instaurano. L'entità del rialzo idraulico a monte della struttura dipende dal grado di restringimento e deve indurre a valutare il rischio di possibili ulteriori riduzioni della sezione di deflusso dovuti:

1) all'ostruzione parziale delle luci presenti, fenomeno molto probabile nelle parti alte del bacino a causa del trasporto di materiale solido galleggiante di varia natura come detriti, tronchi d'albero;

2) al fatto che la direzione della corrente non sia normale a quella dell'impalcato e quindi parallela alla dimensione maggiore delle pile, ma abbia un angolo di incidenza molto diverso da zero: ad esempio a causa di una esondazione verificatasi a monte che ha creato un nuovo percorso fuori dall'alveo per la corrente di piena.

Pertanto il cosiddetto "rigurgito" provocato dalla presenza di un ponte va attentamente valutato al fine di conferire un adeguato grado di sicurezza alle zone limitrofe alla struttura.

Il secondo, ma non meno importante fenomeno idraulico da considerare, è l'erosione localizzata che si

sumption of soil and the consequent increase in the percentage of impermeable areas has greatly increased, from the post-war period to today. Since the '50s, there has been a percentage increase in artificial ground coverage of 184% (from 2.7% to 7.65%) with a compromise of 23,064 km² of land (ISPRA [1]).

It is therefore correct that as part of the maintenance policies of the railway infrastructure, periodic verification of the hydraulic compatibility of the crossing works is carried out. In particular, RFI S.p.A. is testing all bridges with a total net span greater than 6 metres, also to comply with the requirements of the Implementation Rules of the Basin Plans of some District Authorities which require the Infrastructure Management Bodies to carry out hydraulic compatibility studies of existing structures.

In the following article, a practical case will be presented referring to the problems relating to the interaction between the current of the watercourses and the support works of the railway crossings located in the riverbed. These works, if placed inside the free water flow section and not adequately dimensioned, actually cause a narrowing of the section itself and, consequently, the variation of the hydrometric structure of the current, particularly during the flood phases of the watercourse.

The most visibly significant hydraulic phenomenon during a flood phase of a watercourse is represented by the hydraulic rise which is the increase in the hydraulic tail-water levels upstream of the obstacle. The flow rates associated with high return times (for example 200 or 300 years) are capable of causing significant surges, in relation to the narrowing of the section and the conditions of outflow that arise. The extent of the hydraulic surge upstream of the structure depends on the degree of narrowing and must lead to a risk assessment of possible further reductions in the outflow section due to:

1) partial obstruction of the spans present, a very probable phenomenon in the upper parts of the basin due to the transport of solid floating material of various kinds such as debris, tree trunks;

2) to the fact that the direction of the current is not normal to that of the deck and therefore parallel to the largest dimension of the piles, but has an angle of incidence very different from zero: due for example to an upstream overflow that created a new path out of the riverbed for the flood current.

Therefore, the so-called "regurgitation" caused by the presence of a bridge must be carefully evaluated in order to give an adequate degree of safety to the areas adjacent to the structure.

The second, but no less important hydraulic phenomenon to consider is the localised erosion which occurs above all at the base of the foundation works of the piles in the riverbed. The erosive effects are produced due to the increase in the speed of the current and the conse-

verifica soprattutto alla base delle opere di fondazione delle pile in alveo. Gli effetti erosivi si producono a causa dell'aumento della velocità della corrente e dei conseguenti fenomeni di turbolenza che si instaurano in corrispondenza della sezione del ponte. L'asportazione di materiale dalla base delle pile e delle spalle può, in certi casi, creare problemi di stabilità alla struttura conducendo allo scalzamento della fondazione.

2. Criteri di Analisi

Gli studi sulle verifiche di compatibilità idraulica si basano su criteri che devono essere conformi alla normativa nazionale e alle leggi regionali in materia, in particolare, al D.M. 17/01/2018 [2] e CIRC. 21/1/19, n. 7 C.S.LL.PP [3] del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti in tema di verifiche di compatibilità idraulica e alle prescrizioni delle Autorità di Bacino Distrettuale.

Il lavoro di analisi delle verifiche di compatibilità idraulica si articola principalmente su tre fasi:

- la fase Conoscitiva;
- la fase Valutativa;
- la fase Conclusiva.

La fase Conoscitiva è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche generali dell'attraversamento oggetto di studio, delle grandezze geomorfologiche e morfometriche del bacino di interesse e del tratto in esame e del contesto vincolistico territoriale in cui ricade. A queste si aggiungono analisi di tipo idrologico e idraulico per la valutazione del valore di piena di progetto e la disamina delle informazioni storiche esistenti. Inoltre, si può prevedere anche una fase di indagini geognostiche, di campionamenti e di individuazione di fenomeni di dissesto, delle opere di difesa idraulica e di eventuali manufatti interferenti presenti lungo il corso d'acqua.

La fase Valutativa è finalizzata invece all'implementazione del modello idraulico. Si procede pertanto con la descrizione dei rilievi topografici utilizzati, la valutazione dei coefficienti di scabrezza e di quei parametri mediante i quali è possibile implementare la modellazione idraulica del tratto in esame.

Alla fine, nella fase Conclusiva, vengono considerati i risultati ottenuti nella fase Valutativa per stimare la compatibilità idraulica dell'opera. Nel caso in cui l'attraversamento ferroviario risulti inadeguato, possono essere definiti i limiti idraulici di completa funzionalità dell'opera e redatto un piano d'azione di intervento.

3. Inquadramento Normativo

Il quadro normativo nazionale di riferimento in materia di verifiche di compatibilità idraulica è il seguente:

- Piano di Gestione Rischio Alluvioni (PGRA), Autorità di Bacino delle Marche;

quent phenomena of turbulence that occur at the bridge section. The removal of material from the base of the piles and abutments can, in certain cases, create stability problems to the structure, leading to the undermining of the foundation.

2. Analysis criteria

Studies on hydraulic compatibility checks are based on criteria that must comply with national legislation and regional laws on the subject, in particular, with Ministerial Decree 17/01/2018 [2] and Official Memorandum no. 7 of 21/1/19, C.S.LL.PP [3] of the Ministry of Infrastructures and Transport regarding the verification of hydraulic compatibility and the regulations of the District Basin Authorities.

The analysis of the hydraulic compatibility checks is mainly divided into three phases:

- *the Cognitive phase;*
- *the Evaluation phase;*
- *the Final phase.*

The Cognitive phase is aimed at determining the general characteristics of the crossing under study, the geomorphological and morphometric dimensions of the basin of interest and the stretch in question and the territorial constraint context in which it falls. Hydrological and hydraulic analyses for the evaluation of the project flood value and the examination of existing historical information add on to these. Furthermore, a phase of geognostic investigation, sampling and identification of instability phenomena, hydraulic defence works, and any interfering artefacts present along the watercourse can also be envisaged.

The Evaluation phase, on the other hand, is aimed at implementing the hydraulic model. We therefore provide the description of the topographic surveys used, the evaluation of the roughness coefficients and of those parameters by which the hydraulic modelling of the stretch under study can be implemented.

Finally, in the Conclusion phase, the results obtained in the Evaluation phase are considered to estimate the hydraulic compatibility of the work. In the event that the railway crossing is inadequate, the hydraulic limits of complete functionality of the work can be defined and an action plan for intervention can be drawn up.

3. Regulatory framework

The national regulatory framework for hydraulic compatibility checks is as follows:

- *Flood Risk Management Plan (PGRA), Marche Basin Authority;*
- *Regional Law No. 22, Article 10, paragraph 4 of 23 November 2011: Criteria, methods and technical-operational indications for the preparation of the hydraulic*

- L.R. 23 novembre 2011 N. 22, Art. 10, comma 4: Criteri, modalità e indicazioni tecnico-operative per la redazione della verifica di compatibilità idraulica degli strumenti di pianificazione territoriale e per l'invarianza idraulica delle trasformazioni territoriali;
- Decreto 17 gennaio 2018: Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni";
- Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Ministero Infrastrutture e Trasporti;
- R.D. 25 luglio 1904, n. 523: Testo unico sulle opere idrauliche;
- R.D. 9 dicembre 1937, n. 2669: Regolamento sulla tutela delle opere idrauliche di 1^a e 2^a categoria e delle opere di bonifica;
- Decreto legislativo 31 marzo 1998, n. 112: Conferimento di funzioni e compiti amministrativi dello Stato alle regioni ed agli enti locali;
- Decreto Legislativo 30 marzo 1999, n. 96: Intervento sostitutivo del Governo per la ripartizione di funzioni amministrative tra regioni ed enti locali;
- Decreto Legislativo 23 febbraio 2010, n. 49: Attuazione della direttiva 2007/60/CE relativa alla valutazione e alla gestione dei rischi di alluvioni;
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152: Norme in materia ambientale;
- Decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42: Codice dei beni culturali e del paesaggio;
- Legge 31 luglio 2002, n. 179: Disposizioni in materia ambientale.

In particolare, la normativa nazionale vigente per le verifiche di compatibilità idraulica è contenuta all'interno del Decreto 17 gennaio 2018 (NTC 18) Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni" al paragrafo **5.1.2.3 Compatibilità Idraulica**, con le precisazioni di cui alla CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti. Tale norma si riferisce specificatamente alle nuove costruzioni, fornendo anche indicazioni nel caso di strutture già esistenti.

4. Il caso studio del ponte ferroviario sul fiume Esino

In questa analisi sarà presa in considerazione la verifica idrologico-idraulica di compatibilità condotta sull'attraversamento ferroviario del ponte sul fiume Esino (Fig. 1) (Fig. 2) al km 192+855 della linea Bologna-Lecce.

L'analisi di compatibilità idraulica condotta sul ponte ferroviario, ancorché non motivata da necessità d'intervento alla struttura e quindi non sottoposta ad azioni di verifica normativa, è stata comunque condotta in linea con i medesimi criteri. Infatti, risulta che ogni intervento finalizzato ad incrementare il livello di sicurezza strutturale debba rispondere alle prescrizioni previste dalle

compatibility check of the territorial planning tools and for the hydraulic invariance of territorial transformations;

- *Decree of 17 January 2018: Update of the "Technical standards for construction";*
- *Official memorandum no. 7 of 21 January 2019 C.S.LL.PP. of the Ministry of Infrastructure and Transport;*
- *Royal Decree no. 523 of 25 July 1904: Consolidated text on hydraulic works;*
- *Royal Decree no. 2660 of 9 December 1937: Regulation on the protection of 1st and 2nd category hydraulic works and reclamation works;*
- *Legislative Decree no. 112 of 31 March 1998: Conferral of administrative functions and State tasks to the regions and local authorities;*
- *Legislative Decree no. 96 of 30 March 1999: Government replacement intervention for the division of administrative functions between regions and local authorities;*
- *Legislative Decree no. 49 of 23 February 2010: Implementation of Directive 2007/60/EC on the assessment and management of flood risks;*
- *Legislative Decree no. 152 of 3 April 2006 "Environmental regulations";*
- *Legislative Decree no. 42 of 22 January 2004: Code of cultural heritage and landscape;*
- *Law no. 179 of 31 July 2002: Environmental provisions.*

*In particular, the national legislation in force for the verification of hydraulic compatibility is contained in the Decree of 17 January 2018 (NTC 18) Update of the "Technical standards for constructions" in paragraph 5.1.2.3 **Hydraulic compatibility**, with the clarifications referred to in OFFICIAL MEMORANDUM NO. 8 of 21 January 2019 C.S.LL.PP. of the Ministry of Infrastructure and Transport. This standard refers specifically to new buildings, also providing indications in the case of existing structures.*

4. The case study of the railway bridge over the Esino river

In this analysis, the hydrological-hydraulic compatibility check carried out on the railway crossing of the bridge over the Esino river (Fig. 1) (Fig. 2) at km 192+855 of the Bologna-Lecce line will be taken into consideration.

The hydraulic compatibility analysis conducted on the railway bridge, although not motivated by the need for intervention in the structure and therefore not subjected to regulatory verification actions, was nevertheless conducted in line with the same criteria. In fact, it appears that any intervention aimed at increasing the level of structural safety must meet the requirements of NTC 18, particularly as

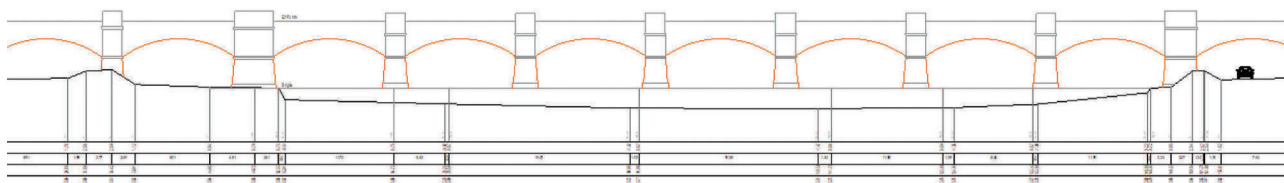


Figura 1 – Prospetto e alveo del ponte ferroviario sul fiume Esino.
Figure 1 – Elevation and bed of the railway bridge over the Esino river.

NTC 18, in particolare per quanto riguarda il franco idraulico minimo, la portata di progetto e l'ampiezza minima delle luci.

Il ponte ferroviario è ubicato a pochi metri a monte della foce del corso d'acqua, nel mare Adriatico, tra le località di Marina di Montemarciano e Falconara Marittima in provincia di Ancona.

Si tratta di un'opera d'arte in muratura, composta da 13 campate, di cui 8 in alveo con impalcati ad arco a sesto ribassato. La luce di ciascuna campata è di circa 11 m.

Alla base delle pile e per tutta la larghezza dell'alveo presenta una platea in calcestruzzo realizzata in epoca recente per proteggere le fondazioni dal potenziale fenomeno dello scalzamento.

regards the minimum hydraulic clearance, the design flow rate and the minimum width of the spans.

The railway bridge is located a few metres upstream from the mouth of the watercourse, in the Adriatic Sea, between the towns of Marina di Montemarciano and Falconara Marittima in the province of Ancona.

It is a masonry bridge, consisting of 13 spans, of which 8 in the riverbed with lowered arched decks. The opening of each span is about 11 m.

At the base of the piles and for the entire width of the riverbed it has a concrete slab built in recent times to protect the foundations from the potential undermining phenomenon.

Tab. 1 shows some descriptive geometric dimensions of the bridge:



Figura 2 – Nel riquadro in rosso il ponte ferroviario sul fiume Esino.
Figure 2 – In the red box the railway bridge over the Esino river.

Nella Tab. 1 sono riportate alcune grandezze geometriche descrittive del ponte.

5. Inquadramento geologico

L'area in esame ricade nel Comune di Falconara Marittima (AN) in prossimità della foce del fiume Esino in una zona compresa tra la Strada Statale (SS16) e la linea di costa adriatica.

La morfologia naturale dell'area è tipicamente costituita da superfici pianeggianti di costa recente ed antica la cui continuità è interrotta da scarpate morfologiche di medio-bassa potenza legate alla dinamica fluviale del fiume Esino (argini naturali) ed all'andamento del livello marino nella tipica dinamica oscillatoria legata al ciclo delle maree.

Tuttavia, nella zona sono decisamente prevalenti le morfologie antropiche legate all'attività umana. Alla foce del fiume Esino si concentrano infatti interventi legati alle opere sia infrastrutturali (ponte ferroviario e ponte stradale della SS16, condotte ed infrastrutture tecnologiche, arginature artificiali) sia strutturali (area industriale della raffineria, edifici privati). Tali opere, oltre ad aver condizionato l'aspetto dei luoghi e del paesaggio, hanno anche determinato il modificarsi delle dinamiche geomorfologiche naturali.

L'area è geologicamente caratterizzata da depositi di ambiente intermedio tra quello fluviale e quello litoraneo. Essi sono costituiti essenzialmente da sabbie e ghiaie con rapporti geometrici reciproci variabili in funzione dell'energia dei meccanismi deposizionali di volta in volta prevalenti.

In base al reperimento di indagini bibliografiche caratterizzanti la litologia dell'area è stato possibile ricostruire la seguente successione stratigrafica:

- da piano campagna attuale a 0,6 m: limi sabbiosi con argilla e inclusi ghiaiosi (terreno vegetale);
- da 0,6 a 8,0 m: ghiaia con clasti arrotondati, ghiaie in matrice sabbiosa e subordinatamente sabbie (depositi alluvionali-litoranei);
- da 8,0 m a 13,0 m: sabbie, sabbie limose e limi sabbiosi con elementi ghiaiosi in subordine (depositi alluvionali-litoranei);

5. Geological framework

The area in question falls within the Municipality of Falconara Marittima (AN) near the mouth of the Esino river in an area between the State Road (SS16) and the Adriatic coastline.

The natural morphology of the area is typically made up of flat surfaces of recent and ancient coast whose continuity is interrupted by medium-low gradient morphological slopes linked to the fluvial dynamics of the Esino river (natural embankments) and to the trend of the sea level in the typical oscillatory dynamics linked to the tidal cycle.

However, anthropogenic morphologies linked to human activity are definitely prevalent in the area. In fact, at the mouth of the Esino river, there is a concentration of interventions related both to infrastructural works (railway bridge and road bridge of the SS16, pipelines and technological infrastructures, artificial embankments) and structural works (industrial area of the refinery, private buildings). These works have also determined the modification of the natural geomorphological dynamics, in addition to having conditioned the appearance of places and the landscape.

The area is geologically characterised by deposits of an intermediate environment between the river and the coast. They essentially consist of sands and gravels with reciprocal geometric ratios varying as a function of the energy of the depositional mechanisms prevailing from time to time.

The following stratigraphic succession was reconstructed based on the retrieval of bibliographic surveys characterising the lithology of the area:

- from current ground level to 0.6 m: sandy silts with clay and gravel (topsoil);
- from 0.6 to 8.0 m: gravel with rounded clasts, gravel in sandy matrix and subordinately sands (alluvial-coastal deposits);
- from 8.0 m to 13.0 m: sands, silty sands and sandy silts alternatively with gravel elements (alluvial-coastal deposits);
- from 13.0 m to 35 m: gravel, gravel and sand alternatively with sand (alluvial-coastal deposits);
- from 35.0 m onwards: Pliopleistocene grey marly clays and clays attributable to the Blue Clays.

Tabella 1 – Table 1

Tabella grandezze
Dimensions table

Luce campata media Medium span aperture	11 m	Quota fondo alveo (thalweg) Riverbed depth (thalweg)	-1,47 m s.l.m. -1.47 m a.s.l.
Larghezza pile Pile width	2,70 m	Altezza libera massima Maximum free height	7,88 m
Quota intradosso Intrados quota	5,98 m s.l.m. 5.98 metres above sea level	Quota media argini (sx e dx) Average height of banks (left and right)	2,69 / 2,84 m s.l.m. 2.69 / 2.84 m a.s.l.

- da 13,0 m a 35 m: ghiaie, ghiaie e sabbie con subordinate sabbie (depositi alluvionali-litoranei);
- da 35,0 m in poi: argille e argille marnose grigie plio-pleistoceniche riconducibili alle Argille Azzurre.

Pertanto, la situazione litostratigrafica definisce la presenza di ghiaie e sabbie moderatamente addensate con discrete caratteristiche meccaniche a profondità minime dal piano campagna fino in profondità.

Secondo quanto stabilito dalla classificazione imposta dalla normativa nazionale di riferimento e cioè il D.M. 17/01/2018 [2], il terreno presente nell'area in esame appartiene alla Categoria "B": rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.

6. Inquadramento geomorfologico

L'assetto morfologico è caratterizzato da una valle fluviale ad andamento generalmente lineare, il canale di magra è unico, largo pochi metri, inciso a tratti nel substrato roccioso e a tratti nei depositi alluvionali (Tab. 2).

Il regime fluviale è caratterizzato da marcate variazioni stagionali con un periodo di magra estiva e piene autunnali/invernali. Il thalweg è rettilineo sino all'altezza dell'abitato di Moie (AN) (Chiusa Pallavicino) poi acquista un andamento a canali intrecciati via via più marcati sino al mare [5].

Negli ultimi cinquant'anni, come molti altri corsi d'acqua italiani, il fiume Esino è stato interessato da una generalizzata modificazione della morfologia d'alveo, passando dalla morfologia a canali intrecciati a quella transizionale con canale a barre alternate, a causa dell'incisione dell'alveo (Fig. 3) [6].

Therefore, the lithostratigraphic situation defines the presence of moderately thickened gravels and sands with discrete mechanical characteristics at minimum depths from the ground level into the deep.

According to what is established by the classification imposed by the national reference legislation, namely Ministerial Decree of 17/01/2018 [2], the soil in the area in question belongs to Category "B": soft rocks and very thickened coarse-grained soil deposits or very consistent fine-grained soils, characterised by an improvement in mechanical properties with depth and by equivalent speed values between 360 m/s and 800 m/s.

6. Geomorphological framework

The morphological structure is characterised by a generally linear river valley, the low flow channel is single, a few metres wide, cut at times in the rocky substrate and at times in the alluvial deposits (Tab. 2).

The river regime is characterised by marked seasonal variations with a low water summer period and autumn/winter floods. The thalweg is straight up to the built-up area of Moie (AN) (Chiusa Pallavicino) then acquires a course of intertwined channels gradually more marked up to the sea [5].

In the last fifty years, like many other Italian water-courses, the Esino river has been affected by a generalised modification of the riverbed morphology, going from the morphology of intertwined channels to the transitional one with alternating bars, due to the engraving of the riverbed (Fig. 3) [6].

The direct causes of this incision and erosion of the riverbed are to be found above all in the significant change in use of the soil and in the excavations carried out in the riverbed starting from the '50s-'60s [7].

The stretch of the valley is characterised by two geomorphological systems: fluvial and slope. The river geomorphological system is represented by the fluvial dynamics and by the shapes of the alluvial plain made up of the Holocene terraced deposits. The system of the slopes, on a clayey substrate of the marine deposits of the Pliocene and Pleistocene, features erosive phenomena attributable to the gullies and widespread active gravitational phenomena, variable in extension and type [8].

Tabella 2 – Table 2

Grandezze caratteristiche del bacino
Typical sizes of the basin

Superficie (S) Area (S)	1223,32	km ²
Quota altimetrica minima Minimum altimetric height	0,00	m s.l.m. m a.s.l.
Quota altimetrica massima Maximum altimetric height	1116	m s.l.m. m a.s.l.
Quota altimetrica media Average altimetric height	275	m s.l.m. m a.s.l.
Lunghezza dell'asta fluviale (L asta) River course length (L course)	75	Km
Lunghezza totale di scorrimento (L) Total flow length (L)	78,63	Km

7. Survey of the granulometric characteristics of the riverbed deposits

General information: The survey of the granulometry of the riverbed deposits was carried out to support the

Le cause dirette di tale incisione ed erosione d'alveo vanno ricercare soprattutto nel significativo cambiamento d'uso del suolo e nelle escavazioni praticate in alveo a partire dagli anni '50-'60 [7].

Il tratto di valle è caratterizzato da due sistemi geomorfologici: fluviale e di versante. Il sistema geomorfologico fluviale è rappresentato dalla dinamica fluviale e dalle forme della pianura alluvionale costituita dai depositi terrazzati dell'Olocene. Il sistema dei versanti, su substrato argilloso dei depositi marini del Pliocene e del Pleistocene, è caratterizzato da fenomeni erosivi riconducibili ai calanchi e da diffusi fenomeni gravitativi attivi, variabili in estensione ed in tipologia [8].

7. Rilievo delle caratteristiche granulometriche dei depositi d'alveo

Generalità: il rilievo della granulometria dei depositi d'alveo è stato condotto a supporto delle valutazioni di trasporto solido e di bilancio del materiale movimentato, della quantificazione della scabrezza del fondo alveo e delle sponde e dell'analisi dei fenomeni erosivi che interessano il corso d'acqua e le opere in esso presenti. La procedura seguita è stata quella proposta da CHURCH et Alii [9] assunta in merito alle attività di rilievo per la descrizione quantitativa delle caratteristiche granulometriche dell'alveo di un corso d'acqua, differenziate tra sponde incise e fondo dell'alveo.

Le modalità di campionamento per il rilievo della granulometria sono state diversificate in relazione alle dimensioni ed assortimento dei sedimenti d'alveo.

I campioni sono stati prelevati a monte del ponte ferroviario; la Fig. 4 mostra i punti di prelievo:

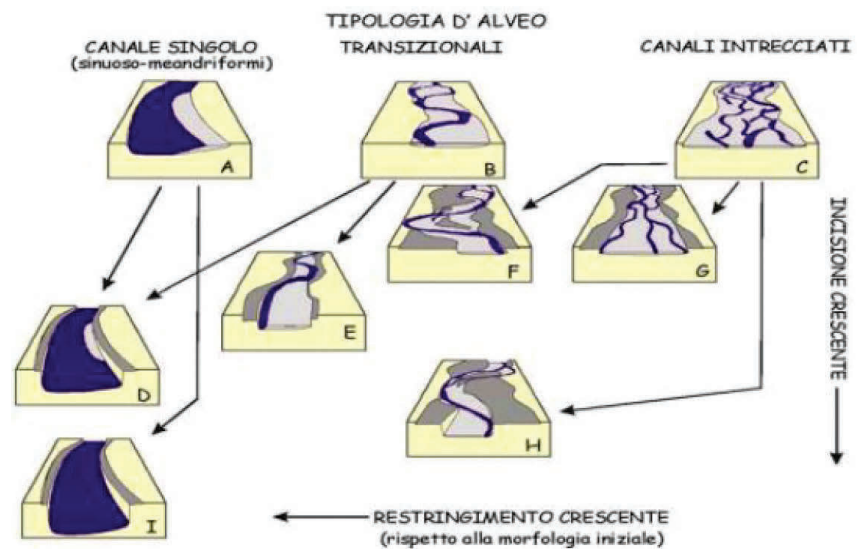


Figura 3 – Classificazione degli alvei fluviali italiani, in funzione del tipo di variazione morfologica [6].

Figure 3 – Classification of Italian riverbeds, according to the type of morphological variation [6].

assessments of solid transport and balance of the material handled, the quantification of the roughness of the riverbed and the banks and the analysis of erosive phenomena affecting the watercourse and the works in it. The procedure followed was the one proposed by CHURCH et Alii [9] taken on the relevant activities for the quantitative description of the granulometric characteristics of the riverbed of a watercourse, differentiated between the engraved banks and the bed of the riverbed.

The sampling methods for the measurement of the granulometry have been diversified in relation to the size and variety of the riverbed sediments.

The samples were taken upstream of the railway bridge; Fig. 4 shows the sampling points:

Samples classification: the methodology of the AGI

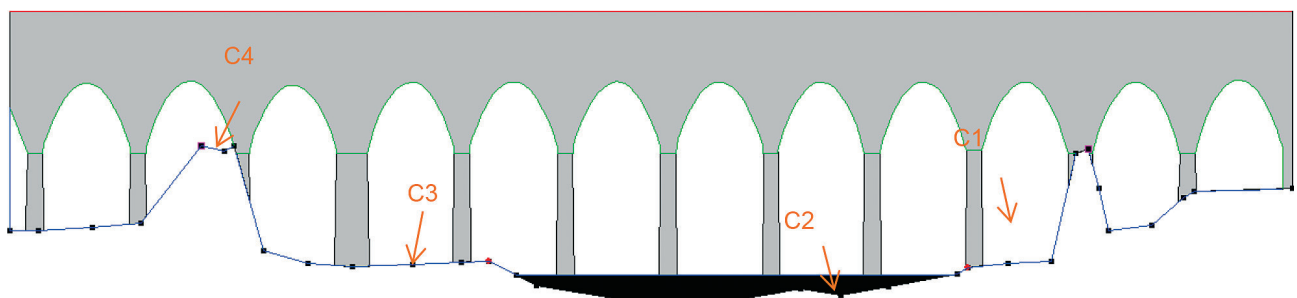


Figura 4 – Ubicazione dei campionamenti del materiale d'alveo centrale e delle golene.
Figure 4 – Location of the sampling of the central riverbed material and of the floodplains.



Figura 5 – Localizzazione della sezione di studio e dei punti di campionamento.
Figure 5 – Location of the study section and sampling points.

Classificazione campioni: per la classificazione dei campioni è stata adottata la metodologia dell'AGI 1977 (Associazione Geotecnica Italiana) [10] che, oltre ad essere probabilmente quella più diffusa in Italia, presenta il vantaggio di avere individuato un sistema anche per l'identificazione dei campioni composti da più frazioni (Fig. 5).

In Tab. 3 a titolo d'esempio si riportano i risultati dell'analisi granulometria eseguita su uno dei campioni prelevati.

Di fondamentale importanza per l'utilizzo nella stima delle azioni erosive della corrente è la stima dei parametri D_{50} e D_{90} desunti dalle prove granulometriche. Si tratta dei diametri (Tab. 4) corrispondenti al 50-esimo percentile e 90-esimo percentile, cioè quei diametri rispetto ai quali il diametro del 50% e del 90% dei granuli (in peso) è inferiore.

8. Analisi idrologica

La Regione Marche ha reso standard la procedura [11] per determinazione degli idrogrammi di piena negli studi idrologici e idraulici. Nel documento pubblicato (Tab. 5) sono riportati i parametri idrologici necessari per la definizione delle portate massime annuali al colmo di piena, con diversi tempi di ritorno, per tutto il territorio marchigiano.

In particolare, per il fiume Esino, vengono definite direttamente le portate massime al colmo di piena per diversi tempi di ritorno (2, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 300 e 500 anni) ed in varie sezioni dell'asta fluviale.

9. Analisi idraulica

L'analisi idraulica è stata effettuata utilizzando il modello di calcolo in moto permanente gradualmente variato. Il modello adottato risulta cautelativo dato l'obiettivo

1977 (Italian Geotechnical Association) [10] was adopted for the classification of the samples, which has the advantage of having identified a system also for the identification of composite samples from several fractions, in addition to being probably the most widespread in Italy (Fig. 5).

Tab. 3 shows the results of the particle size analysis performed on one of the samples taken as an example.

The estimation of D_{50} and D_{90} parameters derived from the particle size tests is of fundamental importance for use in the estimation of the erosive actions of the current. These are the diameters (Tab. 4) corresponding to the 50th percentile and 90th percentile, i.e. those diameters with respect to which the diameter of 50% and 90% of the granules (by weight) is smaller.

8. Hydrological analysis

The Marche Region has standardised the procedure [11] for determining flood hydrograph in hydrological and hydraulic studies. The published document (Tab. 5) shows the hydrological parameters necessary for the definition of the maximum annual flow rates at the peak of the flood, with different return times, for the whole of the Marche region.

Particularly for the Esino river, the maximum flow rates at the top of the flood are directly defined for different return times (2, 5, 10, 20, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 300 and 500 years) and in various sections of the river course.

9. Hydraulic analysis

The hydraulic analysis was carried out using the gradually varied permanent motion calculation model. The model adopted is precautionary given the objective of the study

Tabella 3 – Table 3

CARATTERISTICHE FISICHE

Umidità naturale	%
Peso di volume	kN/m ³
Peso di volume secco	kN/m ³
Peso di volume saturo	kN/m ³
Peso specifico	kN/m ³
Indice dei vuoti	
Porosità	%
Grado di saturazione	%
Limite di liquidità	%
Limite di plasticità	%
Indice di plasticità	%
Indice di consistenza	
Passante al set. n° 40	
Limite di ritiro	%
CNR-UNI 10006/00	

ANALISI GRANULOMETRICA

Ghiaia	40,6	%
Sabbia	51,9	%
Limo-Argilla	7,5	%
D 10	0,120479	mm
D 50	3,325198	mm
D 60	4,823788	mm
D 90	12,047290	mm
Passante set. 10	39,9	%
Passante set. 42	33,6	%
Passante set. 200	7,5	%

PERMEABILITA'

Coefficiente k	cm/sec
----------------	--------

COMPRESSIONE

σ	kPa
c_u	kPa
σ_{Rim}	kPa
$c_u Rim$	kPa

TAGLIO DIRETTO

Prova consolidata-lenta	
c	kPa
ϕ	°
c_{Res}	kPa
ϕ_{Res}	°

COMPRESSIONE TRIASSIALE

C.D.	C_d	kPa	ϕ_d	°
C.U.	C'_{cu}	kPa	ϕ'_{cu}	°
	C_{cu}	kPa	ϕ_{cu}	°
U.U.	C_u	kPa	ϕ_u	°

PROVA EDOMETRICA

σ kPa	E kPa	C_v cm ² /sec	k cm/sec

FOTOGRAFIA**OSSERVAZIONI**

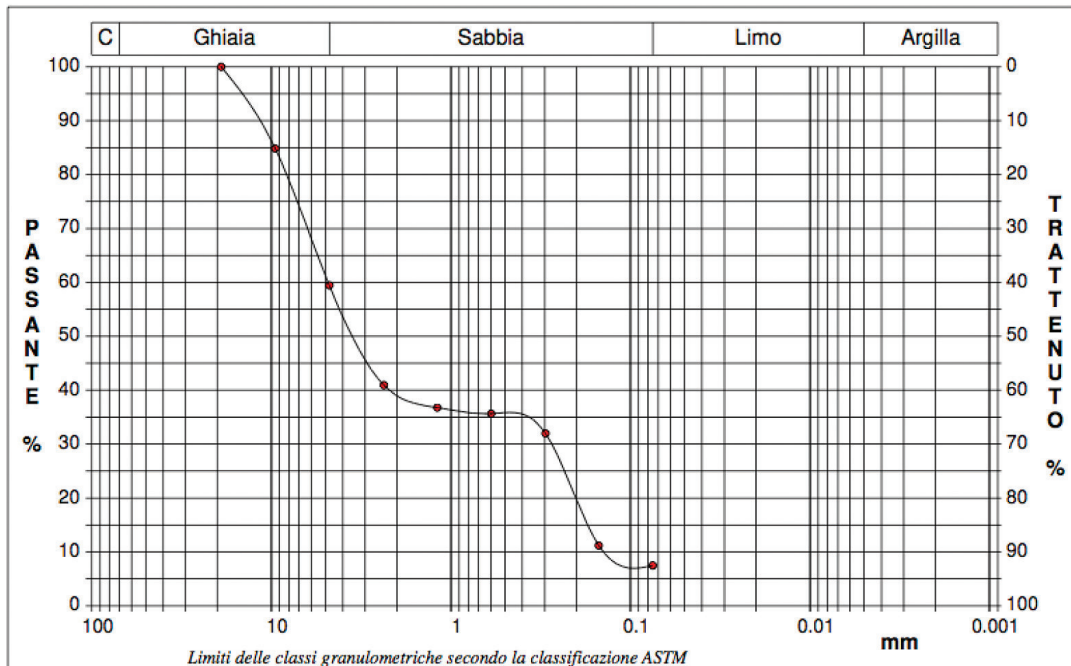
Tipo di campione: Massivo		Qualità del campione: Q 5
---------------------------	--	---------------------------

Posizione delle prove		cm	Rp kPa	VT kPa	cm	DESCRIZIONE DEL CAMPIONE
GR		0				Sabbia con ciottolotti
		5			5	

(segue... - follows...)

(segue tab. 3 - follows tab. 3)

Ghiaia	40,6 %	Passante setaccio 10 (2 mm)	39,9 %	D10	0,12048 mm	
Sabbia	51,9 %	Passante setaccio 40 (0.42 mm)	33,6 %	D30	0,27832 mm	
Limo-Argilla	7,5 %	Passante setaccio 200 (0.075 mm)	7,5 %	D50	3,32520 mm	
Coefficiente di uniformità		40,04	Coefficiente di curvatura	0,13	D60	4,82379 mm
					D90	12,04729 mm



Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %	Diametro mm	Passante %
19,0000	100,00	0,5950	35,66						
9,5200	84,83	0,2970	31,98						
4,7500	59,44	0,1500	11,18						
2,3600	40,93	0,0750	7,46						
1,1900	36,78								

CURVA CUMULATIVA E DI FREQUENZA (CAMPIONE N°1)

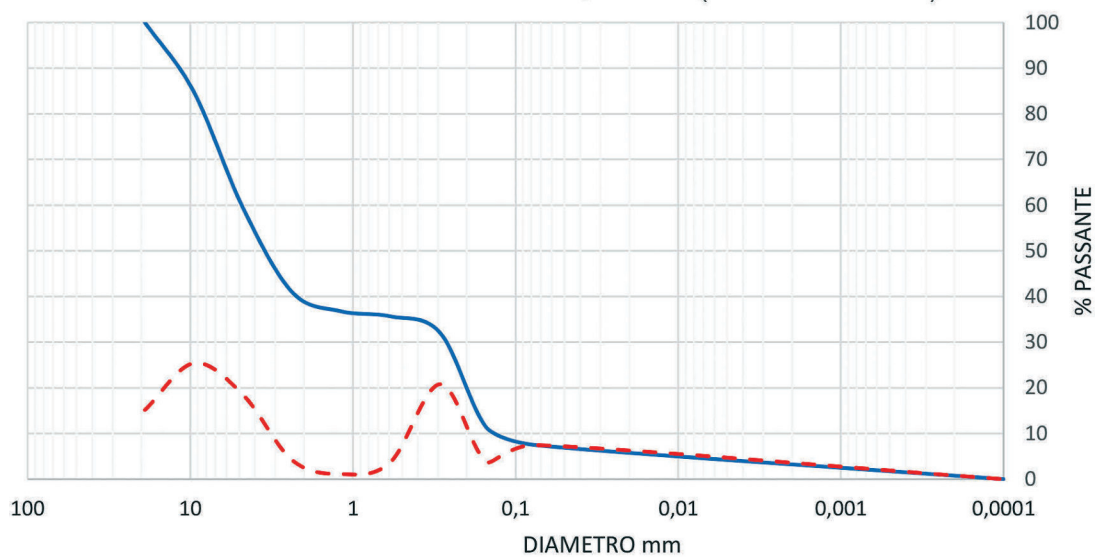


Tabella 4 – Table 4

Diametri caratteristici del materiale d'alveo
Typical diameters of the riverbed material

Campione/diametro caratteristico <i>Sample/typical diameter</i>	D50 [mm]	D90 [mm]
C1	3,32	0,12
C2	5,41	0,22
C3	6,03	1,28
C4	2,46	0,2

dello studio in quanto non considera le eventuali fuoriuscite di portata per esondazione dall'alveo prima del ponte ed il sicuro fenomeno di riduzione del colmo di piena considerando anche la funzione d'invaso del corso d'acqua stesso.

A monte del ponte (Fig. 7), (Fig. 8) e (Fig. 9) ferroviario sono presenti altre opere di attraversamento che sono state rilevate ed introdotte nel modello, come la passerella ciclopedonale e il ponte stradale della SS16, ma queste non hanno influenza sul profilo idraulico, in corrente lenta (Fig. 10).

Considerato che uno degli obiettivi è stato quello di stimare il Tempo di ritorno di eventi catastrofici che consentono il deflusso nel rispetto del franco idraulico, alla luce degli esiti della verifica si può affermare che tale risultato non è stato inficiato dallo schema idraulico scelto. Risulta infatti che il Tempo di ritorno, che garantisce l'ufficienza del ponte, è compreso nell'intervallo tra 5 e 20 anni, che sono eventi di piena praticamente contenuti in alveo e quindi la semplificazione adottata non introduce importanti sottostime.

Nello studio di compatibilità, l'analisi deve individuare e quantificare sia gli effetti che la corrente in condizioni di piena produce sul manufatto, sia i fenomeni che lo stesso produce sul naturale deflusso delle acque.

Normalmente le verifiche di compatibilità idraulica sono completate con la valutazione degli effetti dell'ero-

as it does not consider any overflows due to flooding from the riverbed before the bridge and the certain phenomenon of reduction of the flood peak, also considering the reservoir function of the watercourse itself.

Upstream of the railway bridge (Fig. 7), (Fig. 8) and (Fig. 9) there are other crossing works that have been detected and introduced in the model, such as the cycle and pedestrian walkway and the road bridge of the SS16, but these have no influence on the hydraulic profile, in slow current (Fig. 10).

Considering that one of the objectives was to estimate the return time of catastrophic events that allow the outflow in compliance with the hydraulic clearance, in the light of the results of the verification it can be said that this result was not affected by the chosen hydraulic scheme. In fact, it appears that the Return time, which guarantees the efficiency of the bridge, is between 5 and 20 years, which are flood events practically contained in the riverbed and therefore the simplification adopted does not introduce important underestimates.

In the compatibility study, the analysis must identify and quantify both the effects that the current in flood conditions produces on the artefact, and the phenomena it produces on the natural flow of water.

Normally the hydraulic compatibility verifications are completed with the evaluation of the effects of "generalised" and "localised" erosion in the section of the railway bridge; however, it was not considered necessary to evaluate them here given the presence of a concrete threshold that protects the foundations of the piles and abutments.

Calculation methods: The calculation code used is implemented in the Hec-Ras 5.06 software created by the Hydrologic Engineering Center's River Analysis System US-ACE (United States Army Corps of Engineering).

Fig. 6 shows the general scheme used for the compatibility check:

Input data to the hydraulic model: the input data for the permanent motion hydraulic model are described below (Tab. 6).

Tabella 5 – Table 5

Portate idrologiche massime annuali al colmo di piena divise per tempi di ritorno alla sezione fluviale del ponte
Maximum annual hydrological flow rates at the peak of the flood divided by return times to the river section of the bridge

Tempo di ritorno (anni)	2	5	10	20	50	100	150	200	500
Foglia	188	361	505	682	904	1079	1230	1270	1515
Arzilla	93	147	184	220	259	286	303	307	387
Metauro	306	488	658	838	1018	1310	1407	1481	1711
Cesano	205	342	441	535	659	776	844	870	1112
Misa	216	341	450	587	752	903	991	1038	1085
Esino	329	581	750	1017	1403	1674	1859	2007	2404

sione “generalizzata” e “localizzata” nella sezione del ponte ferroviario; tuttavia in questa sede non si è ritenuto necessario valutarli data la presenza di una soglia in calcestruzzo che protegge le fondazioni delle pile e delle spalle.

Metodologie di calcolo: il codice di calcolo utilizzato è implementato nel software Hec-Ras 5.06 creato dall’Hydrologic Engineering Center’s River Analysis System USACE (United States Army Corps of Engineering).

La Fig. 6 riporta lo schema generale utilizzato per la verifica di compatibilità:

Dati in ingresso al modello idraulico: Di seguito si descrivono i dati in ingresso al modello idraulico di moto permanente (Tab. 6).

I valori della portata idraulica.

La geometria del corso d’acqua. La geometria del corso d’acqua è stata fornita dal rilievo topografico realizzato (sistema di coordinate Gauss-Boaga calcolate sulla base di grigliati IGM con rototraslazione su punti IGM). Il tratto di studio misura circa 1,2 km nel quale sono state rilevate 22 sezioni.

Nel tratto di corso d’acqua sono presenti le seguenti infrastrutture:

- Ponte della linea ferroviaria Adriatica oggetto dello studio di compatibilità idraulica;
- Ponte della Strada Statale (SS16);
- Ponte della strada ciclo-pedonale;
- Ponte tubo (oleodotto).

Le sezioni sono state numerate progressivamente da valle verso monte e vengono rappresentate in vista con origine nel punto estremo in sinistra idraulica (vista da monte).

Le sezioni fluviali sono state rilevate ortogonali al flusso della corrente; le sezioni adiacenti alle infrastruttu-

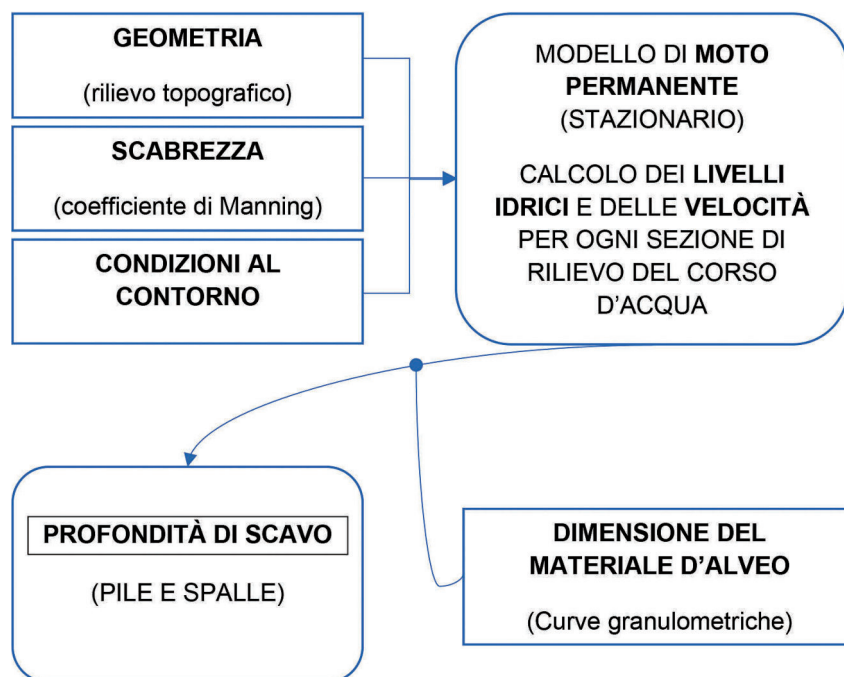


Figura 6 – Schema di calcolo utilizzato per la valutazione degli effetti idraulici dell’infrastruttura.

Figure 6 – Calculation scheme used to evaluate the hydraulic effects of the infrastructure.

The values of the hydraulic flow.

Geometry of the watercourse. The geometry of the watercourse was provided by the topographic survey carried out (Gauss-Boaga coordinate system calculated on the basis of IGM gratings with roto-translation on IGM points). The study section measures about 1.2 km in which 22 sections were detected.

The following infrastructures are present in the stretch of waterway:

- Bridge of the Adriatic railway line object of the hydraulic compatibility study;
- Bridge of the State Road (SS16);
- Bridge of the cycle-pedestrian road;
- Pipe bridge (oil pipeline).

The sections have been numbered progressively from downstream to upstream and are represented in view with origin in the extreme left hydraulic point (seen from upstream).

The river sections were found orthogonal to the flow of the current; the sections adjacent to the infrastructures were positioned parallel to the axis respectively downstream and upstream.

Schematics adopted: in the modelling, the scheme which considers the flows entirely contained in the riverbed

Tabella 6 – Table 6

Valori portate utilizzati nella verifica idraulica
Flow rates used in hydraulic verification

T_R [anni] T_R [years]	1,001	5	20	50	100	200
Q [m³/s]	245	329	1017	1403	1674	2015

re sono state posizionate parallelamente all'asse rispettivamente al piede di valle e di monte.

Schematizzazioni adottate: nella modellazione è stato adottato lo schema che considera le portate interamente contenute in alveo (Arginature Infinitamente Estese) anche laddove si rilevino quote idriche maggiori rispetto alle difese esistenti. Lo schema risulta rigoroso nel momento in cui le quote idriche sono al di sotto delle attuali difese e le portate sono interamente contenute in alveo, mentre tende a sovrastimare i livelli in alveo nel momento in cui le quote idriche superano le quote arginali in quanto non considera i contributi di laminazione ed esondazione che possono manifestarsi nella propagazione della piena. In tal senso i livelli così determinati risultano cautelativi in quanto in questo schema si considerano possibili adeguamenti futuri delle quote arginali.

In aggiunta alla precedente schematizzazione, è stata adottata anche una seconda, che considera utile ai fini del deflusso anche la parte esterna alle arginature denominandola "sezione allargata". L'allargamento è stato individuato mediante ricognizione speditiva sul territorio ed analisi della cartografia ricercando gli elementi fisici di confine per il deflusso (strade in rilevato, infrastrutture, curve di livello).

Le condizioni al contorno: per la determinazione del profilo, il programma parte con il calcolo in corrente lenta, cioè a partire dalla condizione al contorno della sezione di valle e procede nella valutazione dei livelli nelle sezioni più a monte.

Nel caso in esame la condizione di valle è ben rappresentata dal livello del mare che è stato assunto pari a **0,6 m s.l.m.**

Come maggior approfondimento si è ritenuto opportuno effettuare un'ulteriore verifica considerando valori più alti di livello del mare, facendo riferimento al piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere (Piano GIZC) della Regione Marche [12], documento in fase di approvazione. All'interno della parte relativa alla direttiva alluvioni e all'analisi del rischio, sono valutati i livelli dell'innalzamento temporaneo o tendenziale del livello di mare con tempi di ritorno di 10 e 100 anni. Per tale ragione sono stati considerati anche i valori di 2.45 m ($T_R = 100$ anni), e di 1.79 m ($T_R = 10$ anni) come condizione di valle.

10. Risultati dello studio.

Franco idraulico minimo: Si è fatto riferimento al D.M. 17 gennaio 2018, aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni". Il decreto prevede per la compatibilità idraulica (paragrafo 5.1.2.3 **Compatibilità Idraulica**), tra le altre, le seguenti prescrizioni:

- L'ampiezza e l'approfondimento dello studio e delle indagini che ne costituiscono la base devono essere commisurati all'importanza del problema e al livello di progettazione. Deve in ogni caso essere definita

(*Infinitely Extended Embankments*) was adopted even where there are larger water quantities than the existing defences. The scheme is rigorous when the water quantities are below the current defences and the flows are entirely contained in the riverbed, while it tends to overestimate the levels in the riverbed when the water quantities exceed the embankment ones as it does not consider the contributions of lamination and flooding that can appear in the propagation of the flood. In this sense, the levels thus determined are precautionary since possible future adjustments of the embankments are considered in this scheme.

In addition to the previous schematisation, a second one has also been adopted, which also considers the external part of the embankments useful for the purposes of drainage, calling it an "enlarged section". The enlargement was identified by means of an expeditious survey of the territory and analysis of the cartography by researching the physical border elements for the outflow (embankment roads, infrastructures, contour levels).

Surrounding conditions: to determine the profile, the programme starts with the slow current calculation, that is, starting from the surrounding condition of the downstream section and proceeds to evaluate the levels in the upstream sections.

In the case in question, the valley condition is well represented by the sea level which has been assumed to be **0.6 m a.s.l.**

As a more in-depth analysis, it was deemed appropriate to carry out an additional verification considering higher sea level values, referring to the Integrated Coastal Zone Management Plan (ICZM Plan) of the Marche Region [12], document in the approval phase. The levels of temporary or tendential sea level rise with return times of 10 and 100 years are assessed within the part relating to the flood directive and risk analysis. For this reason, the values of 2.45 m ($T_R = 100$ years), and of 1.79 m ($T_R = 10$ years) were also considered as a valley condition.

10. Study Results.

Minimum hydraulic clearance: reference was made to Ministerial Decree of 17 January 2018, updating the "Technical standards for construction". The decree provides the following requirements for hydraulic compatibility (paragraph 5.1.2.3 **Hydraulic Compatibility**), among others:

- The breadth and depth of the study and the investigations that form its basis must be commensurate with the importance of the problem and the level of design. In any case, a project flood characterised by a return time T_R equal to 200 years must be defined.
- The hydraulic clearance is to be assumed not less than 1.50 m.

Tab. 7 summarises the results of the hydraulic clearance (in metres) with respect to the different return times and the two types of modelling used:

una piena di progetto caratterizzata da un tempo di ritorno T_R pari a 200 anni.

- Il franco idraulico è da assumersi non inferiore a 1,50 m.

La Tab. 7 sintetizza i risultati del franco idraulico (in metri) rispetto a differenti tempi di ritorno e alle due tipologie di modellazione utilizzate:

Nel caso specifico siamo in presenza di un ponte ad archi, per cui, "Quando l'intradosso delle strutture non sia costituito da un'unica linea orizzontale tra gli appoggi, il franco idraulico deve essere assicurato per una ampiezza centrale di 2/3 della luce, e comunque non inferiore a 40 m", per il calcolo del franco, si è fatto riferimento alla quota 5,10 m corrispondente alla quota della "corda" del ponte paria a 2/3 della luce massima.

Il franco idraulico risulta assente per portate aventi tempi di ritorno maggiori di 50 anni, tuttavia si deve rilevare che per i risultati per $T_R > 20$ anni lo schema di calcolo sia penalizzato dalla fuoriuscita di portata dall'alveo, ciononostante il livello idraulico non supera mai il piano del ferro.

Il profilo di deflusso in corrispondenza del ponte tende all'altezza critica della sezione. Quest'ultima risulta simile per ragioni morfologiche sia nell'alveo naturale (escludendo le arginature) che in quello artificiale.

Ne consegue una sostanziale uguaglianza del livello di piena stimato nei due modelli (configurazione con arginature "infinitamente estese" e con sezioni "allargate").

Stante questa caratteristica del corso d'acqua, l'eventuale rialzo delle arginature per contenere la piena non ridurrebbe, di fatto, il franco idraulico.

Nelle Figg. 7, 8 e 9 si rileva che le arginature a monte del ponte della ferrovia determinino un restringimento dell'alveo.

Dall'esame del profilo della corrente riportato in Fig. 10, confrontando i livelli di deflusso a monte e a valle del ponte, si evince che il restringimento di sezione dell'alveo determini in corrispondenza del ponte ferroviario causi ostacolo al deflusso.

Verifica idraulica per innalzamento del mare

Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere (Piano GIZC), Regione Marche

In the specific case we are in the presence of an arched bridge, so "When the intrados of the structures is not made up of a single horizontal line between the supports, the hydraulic clearance must be ensured for a central width of 2/3 of the span, and in any case not less than 40 m", for the calculation of the clearance, reference was made to the altitude of 5.10 m corresponding to the height of the "chord" of the bridge equal to 2/3 of the maximum span.

The hydraulic clearance is absent for flows with return times greater than 50 years, however it must be noted that for the results for $T_R > 20$ years, the calculation scheme is penalised by the outflow of the flow from the riverbed, nevertheless the hydraulic level never exceeds the maximum height over the upper surface of the rail.

The outflow profile at the bridge tends to the critical height of the section. For morphological reasons, the latter is similar both in the natural riverbed (excluding the embankments) and in the artificial one.

The result is a substantial equality of the estimated flow level in the two models (configuration with "infinitely extended" embankments and with "enlarged" sections).

Given this characteristic of the watercourse, any rise in the embankments to contain the flood would not, in fact, reduce the hydraulic clearance.

Figg. 7, 8 and 9 show that the embankments upstream of the railway bridge cause a narrowing of the riverbed.

From the examination of the current profile reported in Fig. 10, comparing the flow levels upstream and downstream of the bridge, it is clear that the narrowing of the section of the riverbed determined at the railway bridge causes an obstacle to the flow.

Hydraulic verification for sea rise

Integrated Coastal Zone Management Plan (ICZM Plan), Marche Region

In addition to the checks described above, given the proximity of the bridge to the outlet into the sea, it was considered appropriate to evaluate the hydrometric level of the river for various surrounding conditions. The values of the temporary or tendential sea level rise described in the Integrated Coastal Zone Management Plan (ICZM Plan), which is part of the broader Flood Risk Management Plan (PGRA), were considered.

Tabella 7 – Table 7

Franco idraulico del ponte ferroviario rispetto a diversi tempi di ritorno
Hydraulic clearance of the railway bridge with respect to different return time

Scenario/tempo di ritorno [anni] Scenario/return time [years]	5	20	50	100	200
Arginature Infinitamente Estese Infinitely Extensive Embankments	1,82 m	1,07 m	0,06 m	Assente Absent	Assente Absent
Sezioni allargate Expanded sections	1,82 m	1,07 m	0,06 m	Assente Absent	Assente Absent

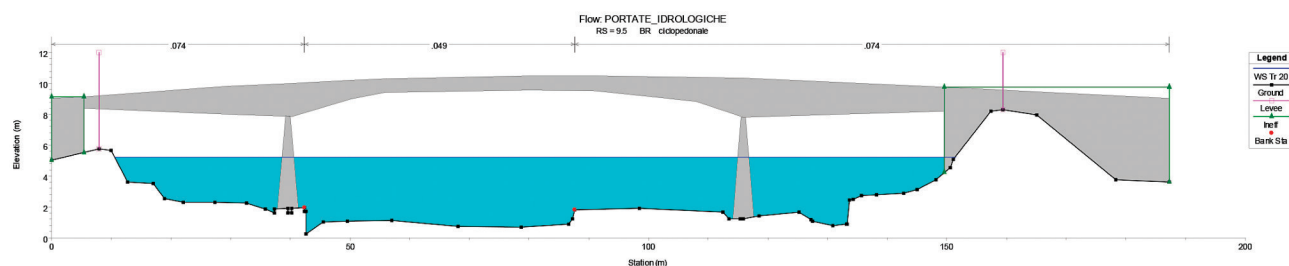


Figura 7 – Passerella sul fiume Esino con livello di Piena TR 20 anni.
Figure 7 – Footbridge over the Esino river with 20 years TR flood level.

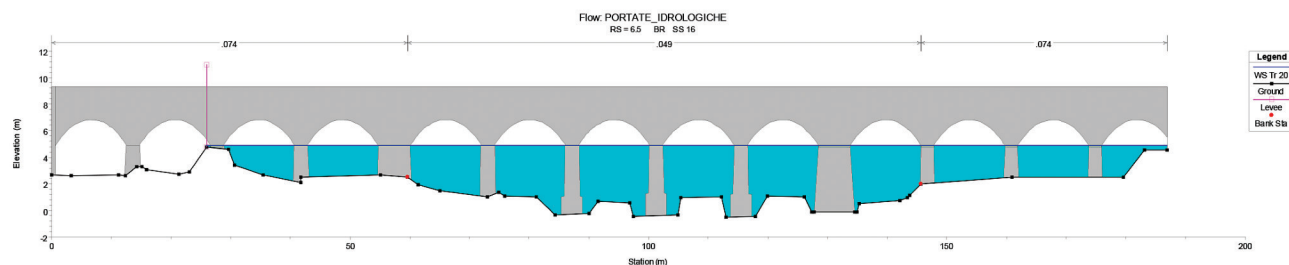


Figura 8 – Ponte della strada SS16 sul fiume Esino con livello di Piena TR 20 anni.
Figure 8 – Bridge of the SS16 road over the Esino river with 20 years TR flood level.

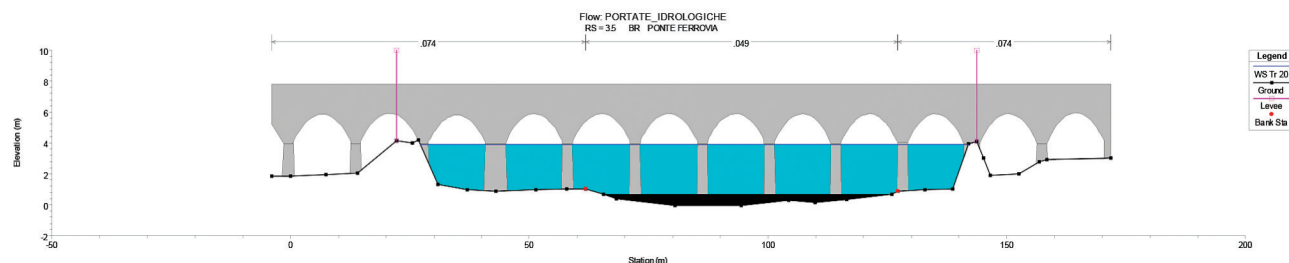


Figura 9 – Ponte ferroviario sul fiume Esino con livello di Piena TR 20 anni.
Figure 9 – Railway bridge over the Esino river with a 20-year TR flood level.

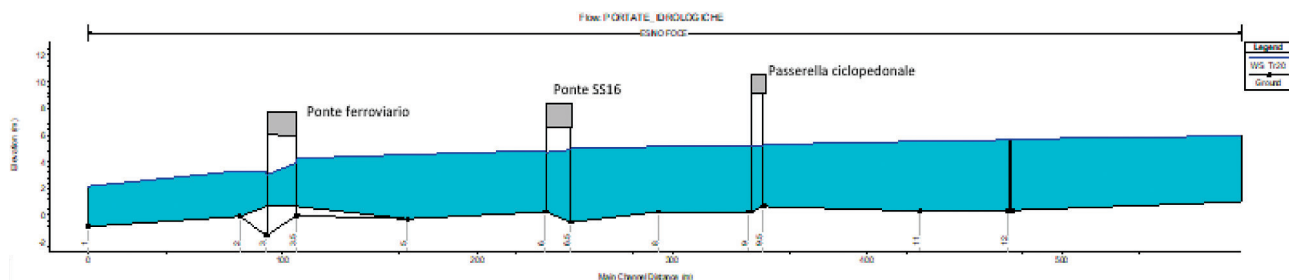


Figura 10 – Profilo della corrente per TR 20 anni.
Figure 10 – Current profile for 20 years TR.

Oltre alle verifiche sopra descritte vista la vicinanza del ponte allo sbocco in mare, si è ritenuto opportuno valutare il livello idrometrico del fiume per diverse condizioni al contorno. Sono stati considerati i valori dell'innalzamento temporaneo o tendenziale del livello mare descritti sul Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere (Piano GIZC) che rientra nel più ampio Piano di Gestione del Rischio di alluvione (PGRA).

Sono stati assunti i seguenti valori dell'innalzamento del livello del mare (Tab. 8) ricavandoli dal Progetto di Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere della Regione Marche [12], in corso di approvazione:

Descrizione dei risultati: la condizione al contorno di valle considerando il sovrizzo del livello del mare rispetto al livello medio non modifica l'andamento del profilo in corrispondenza dell'attraversamento con valori dei franchi idraulici invariati (Tab. 9).

Si può concludere quindi che l'innalzamento del livello medio del mare non comporterebbe un incremento del livello idrometrico del fiume Esino.

11. Conclusioni

L'analisi svolta ha permesso di stimare i livelli di piena e le condizioni di deflusso dell'acqua che sollecitano la struttura del ponte ferroviario sul fiume Esino (AN), associati ad eventi critici estremi ed alla loro probabilità di accadimento.

I risultati ottenuti dalle indagini hanno fornito a RFI un quadro conoscitivo completo delle condizioni di funzionalità idraulica dell'opera d'arte.

Le analisi condotte sull'attraversamento hanno consentito di determinare che il tempo di ritorno delle piene, che permette l'ufficiosità idraulica del viadotto (franco idraulico di 1,5 m), è inferiore a 20 anni, valore considerato compatibile con la sicurezza dell'infrastruttura per l'esercizio ferroviario. L'analisi di sensitività del modello effettuata sulle condizioni al contorno, indotte dal livello del mare, non ha evidenziato un'influenza sul franco idraulico.

L'incremento di piene disastrose nei corsi d'acqua è uno degli effetti connessi ai cambiamenti climatici che hanno notevole importanza sulle infrastrutture presenti sul territorio nazionale e quindi sulla sicurezza della collettività.

Dalle inondazioni alla siccità, dall'acidificazione dei corsi d'acqua fino all'innalzamento del livello me-

Tabella 8 – Table 8

Valori del sopralzo del livello di medio mare
Average sea level rise values

	$T_R = 20$ anni $T_R = 20$ years	$T_R = 100$ anni $T_R = 100$ years
Livello del mare (m) Sea level (m)	1,79	2,45

The following values of sea level rise have been assumed, (Tab. 8) deriving them from the Integrated Management Plan Project of the Coastal Areas of the Marche Region [12], currently being approved:

Description of the results: the downstream surrounding condition considering the sea level rise with respect to the average level does not change the course of the profile in correspondence with the crossing with unchanged hydraulic clearance values (Tab. 9).

It can therefore be concluded that the rise in the average sea level would not lead to an increase in the hydrometric level of the Esino river.

11. Conclusions

The analysis carried out allowed estimating the flood levels and the water flow conditions that stress the structure of the railway bridge over the Esino river (AN), associated with extreme critical events and their probability of occurrence.

The results obtained from the investigations provided RFI with a complete cognitive picture of the hydraulic functionality conditions of the bridge.

The analyses carried out on the crossing allowed determining that the return time of the floods, which allows the hydraulic efficiency of the viaduct (hydraulic clearance of 1.5 m), is less than 20 years, a value considered compatible with the safety of the infrastructure for railway operation. The sensitivity analysis of the model carried out on the surrounding conditions, induced by the sea level, did not show an influence on the hydraulic clearance.

The increase in disastrous floods in watercourses is one of the effects related to climate change that have considerable importance on the infrastructures present on the national territory and therefore on the safety of the community.

Tabella 9 – Table 9

Valori del franco in funzione del tempo di ritorno
Clearance values as a function of the return time

	TR = 20 anni TR= 20 years	TR = 100 anni TR= 100 years
Arginature infinitamente estese Infinitely Extensive Embankments	1,07	Assente Absent
Sezioni allargate Expanded sections	1,07	Assente Absent

dio dei mari, si prevede che gli impatti dei cambiamenti climatici si intensificheranno nei prossimi anni.

Il surriscaldamento terrestre e, più in generale, i cambiamenti climatici stanno sollecitando iniziative in tutto il mondo: amministrazioni pubbliche e società private stanno già adattando soluzioni più sicure ed ecosostenibili.

From floods to droughts, from acidification of waterways to rising mean sea levels, the impacts of climate change are expected to intensify in the coming years.

Global warming and, more generally, climate change are prompting initiatives all over the world: public administrations and private companies are already adapting safer and more eco-sustainable solutions.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ISPRA, (2017), "Consumo di suolo, dinamiche territoriali e servizi ecosistemici. Rapporti 266/2017".
- [2] Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti 17/01/2018 Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni".
- [3] Ministero delle Infrastrutture Circolare 21/1/19 n. 7 C.S.LL.PP.
- [4] AdB Marche, (2016), "Piano Stralcio Difesa Alluvioni – Studi Idraulici per la mappatura delle aree esondabili".
- [5] COLTORTI & NANNI, (1987), "Evoluzione geomorfologica delle piane alluvionali delle Marche Centro-Meridionali".
- [6] SURIAN N., RINALDI M. (2003), "*Morphological response to river engineering and management in alluvial channels in Italy. Geomorphology*".
- [7] BRUNELLI, FARABOLLINI (2005), "Analisi geomorfologica fluviale del fiume Esino nella riserva naturale Regionale Ripa Bianca di Jesi".
- [8] DIGNANI (2016-2017), "Analisi morfodinamica di un tratto del Fiume Esino".
- [9] CHURCH, ALII (1987), "*River bed gravel: sampling and analysis*".
- [10] A.G.I. (1977) "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche".
- [11] Regione Marche - Convenzione tra il Commissario Delegato "Maltempo Maggio 2014" e Fondazione Cimaper la "Modellazione e definizione delle grandezze idrologiche utili alla progettazione per la messa in sicurezza strutturale e non strutturale del reticolo idrografico principale".
- [12] Progetto di Piano di Gestione Integrata delle Zone Costiere (Piano GIZC) della Regione Marche. In corso di approvazione.