

## APPROCCIO METODOLOGICO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO MULTHAZARD SU PONTI E VIADOTTI

### METHODOLOGICAL APPROACH TO EVALUATE MULTHAZARD RISK ON BRIDGES AND VIADUCTS

ANTONIO CASTORANI<sup>(\*)</sup>, ANTONIO ROSARIO DI SANTO<sup>(\*)</sup>, UMBERTO FRATINO<sup>(\*)</sup>, ROBERTO LIMONGELLI<sup>(\*\*)</sup>,  
MAURO MEZZINA<sup>(\*\*\*)</sup>, ALESSANDRO PAGANO<sup>(\*\*\*)</sup>, DOMENICO RAFFAELE<sup>(\*\*\*)</sup> & ISABELLA TRULLI<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup> Autorità di Bacino della Puglia - Politecnico di Bari - Bari, Italy - e-mail: u.fratino@poliba.it

<sup>(\*\*)</sup> Autorità di Bacino della Puglia - Valenzano, Bari, Italy - e-mail: roberto.limongelli@adb.puglia.it - isabella.trulli@adb.puglia.it

<sup>(\*\*\*)</sup> Politecnico di Bari - Bari, Italy - e-mail: a.pagano@poliba.it

#### ABSTRACT

In accordo con la consueta definizione, il rischio è dato dalla combinazione di Pericolosità, Esposizione e Vulnerabilità, e rappresenta il livello di danno complessivo associato ad un particolare evento che si può verificare in una determinata area e con un prefissato tempo di ritorno. Coerentemente con questa definizione, una “analisi di rischio multihazard” è fondata su un approccio metodologico in grado di combinare gli effetti di vari e differenti eventi naturali che si possono verificare sul territorio. Tale analisi ha lo scopo di orientare programmi tecnici e politici alla mitigazione del rischio, al fine di indirizzare le risorse pubbliche laddove ci siano maggiori priorità. I ponti, in particolare, giocano un ruolo prioritario nello sviluppo e nell’applicazione di questo tipo di analisi, in quanto palesano elevata vulnerabilità rispetto a grandi eventi naturali, come alluvioni e terremoti.

In questo lavoro sono presentati i risultati di un’analisi multihazard portata avanti considerando la combinazione di pericolosità sismica ed idraulica su ponti della Capitanata (FG). Tale lavoro è stato sviluppato nell’ambito di un progetto di ricerca denominato “Studio di Fattibilità per il Monitoraggio e la Messa in Sicurezza delle Aree Urbane a Rischio di Stabilità Statica e Vulnerabilità Strutturale nella Città e Provincia di Foggia”, condotto dall’Autorità di Bacino con la collaborazione del Politecnico di Bari.

L’approccio proposto si basa sulla definizione di un indice sintetico, denominato Indice di Priorità, che definisce il livello di rischio complessivo associato all’opera. Esso sintetizza una serie di informazioni legate alle principali caratteristiche strutturali, associate ad effetti sismici ed idraulici locali, alla esposizione e alla funzionalità. L’Indice di Danneggiabilità Sismica è strettamente connesso al comportamento della struttura, e alla sua risposta alle azioni sismiche attese in una determinata area. Si basa sul confronto tra l’accelerazione spettrale rappresentativa dello spettro di progetto caratteristico del sito, con altri due valori di accelerazione spettrale assunti pari a quelli definiti come valori medi delle funzioni di danno Hazus corrispondenti allo stato di danno lieve e di collasso strutturale. L’Indice di Danneggiabilità Idraulica fornisce una informazione quantitativa sul comportamento del ponte nei confronti di eventi di piena, e dipende dalle caratteristiche geometriche della sezione dell’opera, oltre che da parametri climatici e geomorfologici propri del bacino sotteso. Esso confronta la portata

#### ABSTRACT

According to the usual definition, risk is a combination of Hazard, Exposure and Vulnerability, representing the global damage amount connected to a particular event that may occur in a given area in a prefixed return time. According to the previous definition, a “multihazard risk analysis” needs a methodological approach able to combine in terms of effects several different natural events that may occur in an area. This analysis has the purpose of defining political and technical programs for risk mitigation, so to address public resources where priorities are high. Bridges play a primary role in the development and application of such analysis, showing high vulnerability towards great natural hazards such as floods and seismic actions.

In this paper the results of a multi hazard analysis carried out taking into account seismic and hydraulic hazards on bridges in Capitanata region (FG - Puglia Region, South Italy) are presented. This work has been developed in a research project, named “Studio di Fattibilità per il Monitoraggio e la Messa in Sicurezza delle Aree Urbane a Rischio di Stabilità Statica e Vulnerabilità Strutturale nella Città e Provincia di Foggia” managed by the Autorità di Bacino della Puglia together with the Technical University of Bari.

The proposed approach is based on the definition of a synthetic Index, named Priority Index, that simply defines the global risk level associated. It summarizes several information connected to the main structure properties, related to seismic and hydraulic local effects, to the exposition and to the functionality. The Seismic Damage Index is strictly connected to the structural behavior and its response to seismic actions expected in the well defined area. It compares the spectral acceleration representing the site design spectrum with two other spectral acceleration values considered equivalent to Hazus median damage function accelerations, corresponding to slight damage and complete damage for the structure. The Hydraulic Damage Index furnishes a quantitative information on the bridge behavior with respect to floods, and it is dependent on geometrical characteristics of the bridge cross section and on climatic and geomorphological properties of the river watershed. It compares the expected flow at a fixed return time with the maximum hydraulic capacity of the bridge cross section. The Functionality Index is connected to the exposition of the structure being not dependent from the specific hazard analyzed. It

attesa con un prefissato tempo di ritorno, con la massima capacità di deflusso attraverso la sezione dell'opera. L'Indice di Funzionalità è legato all'esposizione dell'opera, indipendentemente dallo specifico hazard analizzato. Sintetizza informazioni quali classe della strada, livelli di traffico atteso e lunghezza dell'opera, allo scopo di realizzare una classificazione gerarchica tra le opere indagate.

**TERMINI CHIAVE:** ponti, viadotti, analisi di rischio multihazard, vulnerabilità sismica, vulnerabilità idraulica

## INTRODUZIONE

Nell'ambito del "Progetto ANTAEUS", in fase di sviluppo presso il Dipartimento ICAR del Politecnico di Bari e frutto dell'accordo di programma quadro "DIFESA DEL SUOLO" fra la Regione Puglia e l'Autorità di Bacino della Puglia, è in fase di completamento uno "Studio di fattibilità per il monitoraggio e la messa in sicurezza delle aree urbane a rischio di stabilità statica e vulnerabilità strutturale della Provincia di Foggia", finanziato con le risorse trasferite dallo Stato con fondi CIPE. Il presente studio si colloca nella fase del suddetto programma, che riguarda la predisposizione di un quadro conoscitivo generale dello stato di rischio conseguente ai diversi tipi di pericolosità presente nel territorio della Provincia di Foggia, ed è finalizzato alla definizione di linee guida per ottenere liste di priorità relative alla rete stradale della suddetta Provincia.

Nell'analisi di vulnerabilità delle reti infrastrutturali, grande rilevanza assumono i punti nodali costituiti da ponti e viadotti i quali, in genere, risultano particolarmente vulnerabili rispetto sia ad hazard di natura sismica che di natura idraulica. Allo scopo di stimare in maniera congiunta tali vulnerabilità, è di grande utilità l'adozione di modelli semplici di analisi multihazard. Nel modello proposto le caratteristiche prestazionali e funzionali dell'opera vengono definite attraverso tre indicatori finalizzati all'attuazione di un'analisi di primo livello. Le normali procedure di "assessment", ovvero di valutazione del livello di sicurezza delle strutture esistenti, sono finalizzate a valutare se la costruzione possiede quelle caratteristiche necessarie a soddisfare i requisiti fissati dalle Norme, che riguardano non solo il controllo della sicurezza nei confronti di eventi limite, ma anche il controllo delle capacità della struttura in riferimento a opportuni livelli di comfort e funzionalità. Talvolta, soprattutto operando su scala territoriale ampia, la limitatezza delle risorse economiche e temporali disponibili impone il ricorso anche solo ad un livello di conoscenza preliminare (il suddetto "primo livello"), che sovente è sufficiente a garantire la possibilità di esprimere un giudizio "finale" sullo stato di salute dell'opera: in tal modo è senza dubbio possibile individuare in maniera immediata situazioni di pericolo imminente o viceversa situazioni in cui il livello di funzionalità della struttura sia ottimale.

L'importanza del manufatto e la sua esposizione è individuata tramite un Indice di Funzionalità, proprio dell'opera ed indipendente dall'hazard considerato, funzione di una serie di fattori rappresentativi dell'esposizione del manufatto (posizione ed attività servite, livello

summarizes information such as road class, expected traffic levels and bridge length to define a sort of hierarchical classification of the investigated structures.

**KEY WORDS:** bridges, viaducts, multihazard risk analysis, seismic vulnerability, hydraulic vulnerability

## INTRODUCTION

As a part of "ANTAEUS Project", which is being developed at ICAR department in Technical University of Bari and is based on an agreement named "DIFESA DEL SUOLO" between Regione Puglia and Autorità di Bacino della Puglia, an activity named "Studio di fattibilità per il monitoraggio e la messa in sicurezza delle aree urbane a rischio di stabilità statica e vulnerabilità strutturale della Provincia di Foggia" is being carried on, financed by state CIPE resources. The activity described is a part of this program, concerning the collection of data and the definition of a general knowledge on the actual risk situation, due to different kinds of hazards potentially present in Foggia region: it is strictly connected with the definition of guidelines to get priority lists on roads in the same region.

Bridges and viaducts are generally considered fundamental elements in the development of vulnerability analysis of infrastructure systems, especially because of their own vulnerability towards seismic and hydraulic hazards. Simple multihazard models should be absolutely useful to estimate this vulnerability in a combined way. In the proposed model, functional and structural properties are defined introducing three synthetic indexes, used to complete a first level analysis. Commonly, these assessment procedures, that are oriented towards the evaluation of the safety of existing structures, are used to verify if the structure responds to law technical requirements, connected not only with safety in case of extreme events, but also with structural behavior in terms of comfort and functionality. Sometimes, especially when working on a wide area, the lack of time and of economical resources determines the necessity of getting only a preliminary set of information (usually named "first level"), that is often sufficient to express a complete evaluation of structural conditions: so it is possible to distinguish immediately between situations of potential risk and of structural and functional safety.

The relevance of the structure and its exposition is defined by the Functionality Index, connected only to the properties of the structure and being not dependent from the specific hazard analyzed: it depends only on some aspects connected to the exposition (location and kinds of activities served, traffic level, etc...)

The evaluation of the seismic vulnerability is associated with the definition of the Seismic Damage Index, which is strictly connected with the structural behavior and its response to seismic actions expected in the defined area. Unit value is attributed to structures that

di traffico, tipo di ostacolo sovrappassato, ecc.).

La quantificazione della vulnerabilità sismica è affidata ad un Indice di Danneggiabilità Sismica, rappresentativo degli elementi di rischio connessi all'opera e alla pericolosità del sito in cui l'opera è localizzata. Il valore unitario è convenzionalmente attribuito a quelle opere che attingono le condizioni di collasso sotto azioni sismiche con periodo di ritorno di 475 anni. A tale indice viene poi applicato un adeguato coefficiente di correzione funzione dello stato di conservazione dell'opera, valutato sulla base della sola ispezione visiva.

La vulnerabilità idraulica è invece sintetizzata nell'Indice di Danneggiabilità Idraulica, parametro significativo della capacità di deflusso della sezione in cui è localizzato l'attraversamento e delle caratteristiche pluviometriche e geomorfologiche del bacino imbrifero contribuente; a tale indice si attribuisce il valore unitario in corrispondenza del pieno impegno della sezione idraulica a seguito di eventi di prefissato tempo di ritorno (200 anni).

I tre valori suddetti, opportunamente pesati con l'intento di dare adeguata importanza ai diversi componenti di rischio, concorrono alla definizione dell'Indice di Priorità, che permette di individuare quali opere siano più distanti dalla condizione di "non rischio" ovvero quali necessitino, in maniera prioritaria, di interventi di riduzione della vulnerabilità. La procedura è completata con una efficace rappresentazione grafica in uno "Spazio di Priorità" in cui è possibile individuare immediatamente, nell'ambito di una determinata rete, le opere più esposte, nonché il tipo di hazard cui ascrivere tale maggiore esposizione.

### INDICE DI DANNEGGIABILITÀ SISMICA

L'Indice di Danneggiabilità Sismica, rappresentativo degli elementi di rischio connessi alla vulnerabilità intrinseca del ponte ed alla pericolosità sismica del sito in cui l'opera è localizzata, è definito dalla seguente espressione:

$$ID_{Sismica} = \frac{S_a - A_y}{A_u - A_y} \quad (1)$$

In (1)  $S_a$  rappresenta un indicatore di accelerazione spettrale legato allo spettro di progetto caratteristico del sito in cui l'opera sorge, mentre  $A_y$  e  $A_u$  rappresentano le accelerazioni spettrali correlate a due particolari spettri di domanda che convenzionalmente si assume facciano raggiungere alla struttura deformazioni tali da condurla rispettivamente al limite elastico e al limite ultimo. Le accelerazioni di riferimento  $A_y$  e  $A_u$  vengono, in questa procedura, fatte coincidere con le accelerazioni medie delle funzioni di danno Hazus (FEMA, 2003) corrispondenti allo stato di danno lieve e di collasso completo relativo alle varie tipologie strutturali, adeguatamente modificate mediante l'utilizzo di opportuni coefficienti correttivi (FEMA, 2003; WEN-I LIAO & CHING-HSIUNG LOH, 2004). La valutazione di tale indice, diffusamente analizzata in (MEZZINA & RAFFAELE, 2007), è sintetizzata nelle tabelle 1 e 2, dove l'indicatore  $S_a^{(1.0\text{ sec})}$  rappresenta il valore spettrale in corrispondenza del periodo  $T=1.0$  sec letto sullo spettro elastico relativo ad evento con periodo di ritorno di 475 anni. I coefficienti corret-

are expected to reach collapse as a consequence of seismic actions with a return period of 475 years. This index is modified considering a particular coefficient, defined according to the actual structural condition, as detected during a simple inspection.

Hydraulic vulnerability is described by an Hydraulic Damage Index, representative of the flow capacity of the section in which the bridge is located, and depending on geomorphological and pluviometric characteristics of the river watershed; this index has unit value when a complete filling of the section is reached, as a consequence of floods with 200 years of return period.

These three indexes, wisely weighted to give the desired importance to the different hazards considered, contribute to define a Priority Index, that is used to determine if bridges are to be considered "safe" or if they need urgently structural interventions to reduce vulnerability. The operative method described could be also completed by means of a graphical representation in a "Priority Space", in which it is possible to detect immediately which are the most vulnerable and exposed structures, and the most important hazard that should affect them.

### SEISMIC DAMAGE INDEX

Seismic Damage Index, which is strictly connected with factors associated to intrinsic structural vulnerability and local seismic danger, is defined as follows:

In expression (1),  $S_a$  is connected with the spectral acceleration corresponding to the site design spectrum, while  $A_y$  and  $A_u$  represent spectral accelerations connected with two specific demand spectrums, that are considered associated with the reaching of "elastic" strain and "collapse" strain. These accelerations are here considered coincident with mean accelerations of damage functions defined by Hazus (FEMA, 2003) and associated with slight and complete damage conditions for significant kinds of structures, and corrected with specific coefficients (FEMA, 2003; WEN-I LIAO & CHING-HSIUNG LOH, 2004). The evaluation of this index, analyzed with more details in (MEZZINA & RAFFAELE, 2007), is summarized in tables 1 and 2, in which  $S_a^{(1.0\text{ sec})}$  represents the spectral acceleration corresponding to a period  $T=1.0$  sec, considered on the elastic spectrum associated to an event with return period of 475 years. The corrective coefficients depend, as synthetically described in the following tables, on some particular structural properties, connected with the specific kind of

tivi adoperati dipendono, come si evince sinteticamente dalle tabelle di seguito riportate, da alcune caratteristiche strutturali significative dell'opera, essenzialmente legate alla tipologia della sovrastruttura, e alle caratteristiche progettuali e realizzative di pile e spalle.

Nella stima di  $ID_{Sismica}$ , se risulta  $S_a > A_u$ , al suddetto indice verrà assegnato il valore unitario; negli altri casi risulterà invece  $0 \leq ID_{Sismica} \leq 1$ , con i valori più alti relativi a manufatti caratterizzati da condizioni tecniche più scadenti ai fini della sicurezza nei confronti del rischio sismico.

L'Indice di Danneggiabilità Sismica, così come fin qui definito, prescinde dalla valutazione dello stato di conservazione dell'opera, che può condizionare fortemente la risposta strutturale della stessa. Questo aspetto può essere tenuto in considerazione applicando all'Indice di Danneggiabilità un adeguato fattore di correzione  $\alpha_D$ , definito come:

$$\alpha_D = \frac{1}{1 - CR} \quad (2)$$

Formalmente il parametro CR ("Condition Rating") nella (2) viene determinato, a seguito di valutazioni puramente visive, individuando il rapporto tra la somma effettiva dei valori di danno/degrado osservati durante l'ispezione e la somma dei valori di riferimento di danno/degrado che possono potenzialmente riscontrarsi sulla struttura, presi tutti con il loro valore massimo. La stima di tale parametro si effettua secondo una procedura descritta da (GRECO & RAFFAELE, 2008).

superstructure, and design aspects of piers and abutments.

When appraising  $ID_{Sismica}$ , if  $S_a > A_u$ , unit value is assigned to the index; otherwise, considering  $0 \leq ID_{Sismica} \leq 1$ , higher values refer to structures characterized by worse technical properties, as far as seismic safety is concerned.

The Seismic Damage Index, as defined above, results independent from the assessment of actual conditions of the structure. This aspect should be taken into account, applying to the same index a corrective factor  $\alpha_D$ , defined as follows:

The parameter CR ("Condition Rating") is calculated in expression (2), as a consequence of simple field visual inspections, determining the ratio between the complete amount of damage/degradation values detected during the inspection and the amount of all possible damage/degradation values potentially present on the structure and considered with their maximum value. The estimate of the parameter is developed according to a procedure described in (GRECO & RAFFAELE, 2008).

		S <sub>a</sub> (1.0 sec in unit of g)			
Superstructure	Pier	Design	Slight damage	Complete damage	
Single span	====	Convent. or Seismic	0.80	1.70	
Multiple span	Simply-supported Deck	Single column	Convent. Seismic	0.25 0.50	0.67 1.17
		Multiple columns	Convent. Seismic	0.25 0.50	0.70 1.36
		Wall	Convent. Seismic	0.25 0.50	0.63 0.81 β <sub>s</sub>
	Continuous Deck	Single column	Convent. Seismic	0.25 0.50	1.11 1.41
		Multiple columns	Convent. Seismic	0.60 0.90	1.28 1.50
		Wall	Convent. Seismic	0.60 0.80	1.11 1.28 β <sub>s</sub>
			P <sub>s</sub>	P <sub>c</sub>	

$\beta = 1.555 - \frac{b_{max}/b_{min}}{9} \quad \text{for } \frac{b_{max}}{b_{min}} < 5$	$\beta = 1 \quad \text{for } \frac{b_{max}}{b_{min}} \geq 5$
$\beta = 1.125 - \frac{b_{max}/b_{min}}{40} \quad \text{for } \frac{b_{max}}{b_{min}} < 5$	$\beta = 1 \quad \text{for } \frac{b_{max}}{b_{min}} \geq 5$

Tab. 1 - Funzioni di danno utilizzate nella metodologia - Damage functions adopted in the method

$I_D = \frac{S_a - A_y}{A_U - A_y}$	$A_y = P_s \cdot 2.5 \frac{S_a(0.0sec)}{S_a(0.3sec)} \cdot K_{\alpha} \cdot \frac{1}{K_y}$	$K_y = K_{sp} \cdot K_{asp}$																																									
	$A_U = P_c \cdot K_{sp} \cdot K_{\alpha} \cdot \frac{1}{K_U}$	$K_U = K_{pl} \cdot K_{upl}$																																									
<b>K<sub>sp</sub> = ABUTMENT Damage Coefficient</b>																																											
$K_{sp} = K_{ts} \cdot K_{hs}$	<table border="1"> <tr><th>K<sub>ts</sub></th><th>K<sub>hs</sub></th></tr> <tr><td>Gravity Abutment</td><td>1.20</td></tr> <tr><td>Abutment on piles</td><td>1.10</td></tr> <tr><td>Multi-column Abutment</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>Wall - Abutment</td><td>1.00</td></tr> </table>	K <sub>ts</sub>	K <sub>hs</sub>	Gravity Abutment	1.20	Abutment on piles	1.10	Multi-column Abutment	1.05	Wall - Abutment	1.00	<table border="1"> <tr><th>K<sub>ts</sub></th><th>K<sub>hs</sub></th></tr> <tr><td>15 m &lt; Hip</td><td>1.10</td></tr> <tr><td>10 m &lt; Hip &lt; 15 m</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>Hip &lt; 10 m</td><td>1.00</td></tr> </table>	K <sub>ts</sub>	K <sub>hs</sub>	15 m < Hip	1.10	10 m < Hip < 15 m	1.05	Hip < 10 m	1.00																							
K <sub>ts</sub>	K <sub>hs</sub>																																										
Gravity Abutment	1.20																																										
Abutment on piles	1.10																																										
Multi-column Abutment	1.05																																										
Wall - Abutment	1.00																																										
K <sub>ts</sub>	K <sub>hs</sub>																																										
15 m < Hip	1.10																																										
10 m < Hip < 15 m	1.05																																										
Hip < 10 m	1.00																																										
<b>K<sub>pl</sub> = PIER Damage Coefficient</b>																																											
$K_{pl} = K_{tp} \cdot K_{R}$	<table border="1"> <tr><th>K<sub>tp</sub></th><th>K<sub>R</sub></th></tr> <tr><td>Gravity Pier</td><td>1.20</td></tr> <tr><td>Pier continuous with the superstructure</td><td>1.04</td></tr> <tr><td>Pier disconnected from the superstructure</td><td>1.00</td></tr> </table>	K <sub>tp</sub>	K <sub>R</sub>	Gravity Pier	1.20	Pier continuous with the superstructure	1.04	Pier disconnected from the superstructure	1.00	<table border="1"> <tr><th>K<sub>R</sub></th></tr> <tr><td><math>\frac{H_{max}}{H_{min}} &lt; 0.25</math></td><td>1.15</td></tr> <tr><td><math>0.25 &lt; \frac{H_{max}}{H_{min}} &lt; 0.50</math></td><td>1.10</td></tr> <tr><td><math>0.50 &lt; \frac{H_{max}}{H_{min}} &lt; 0.75</math></td><td>1.05</td></tr> <tr><td><math>0.75 &lt; \frac{H_{max}}{H_{min}}</math></td><td>1.00</td></tr> </table>	K <sub>R</sub>	$\frac{H_{max}}{H_{min}} < 0.25$	1.15	$0.25 < \frac{H_{max}}{H_{min}} < 0.50$	1.10	$0.50 < \frac{H_{max}}{H_{min}} < 0.75$	1.05	$0.75 < \frac{H_{max}}{H_{min}}$	1.00																								
K <sub>tp</sub>	K <sub>R</sub>																																										
Gravity Pier	1.20																																										
Pier continuous with the superstructure	1.04																																										
Pier disconnected from the superstructure	1.00																																										
K <sub>R</sub>																																											
$\frac{H_{max}}{H_{min}} < 0.25$	1.15																																										
$0.25 < \frac{H_{max}}{H_{min}} < 0.50$	1.10																																										
$0.50 < \frac{H_{max}}{H_{min}} < 0.75$	1.05																																										
$0.75 < \frac{H_{max}}{H_{min}}$	1.00																																										
<b>K<sub>α</sub> = BEARINGS Damage Coefficient</b>																																											
$K_{\alpha} = K_{sd} \cdot K_{sd} \cdot K_{sup} \cdot K_{an} \cdot K_{oc}$	<table border="1"> <tr><th>K<sub>sd</sub></th><th>K<sub>sd</sub></th></tr> <tr><td>Metallic</td><td>1.10</td></tr> <tr><td>Roller</td><td>1.08</td></tr> <tr><td>Elastomeric with pin</td><td>1.04</td></tr> <tr><td>with head pin</td><td>1.03</td></tr> <tr><td>spherical</td><td>1.01</td></tr> <tr><td>creeping</td><td>1.00</td></tr> </table>	K <sub>sd</sub>	K <sub>sd</sub>	Metallic	1.10	Roller	1.08	Elastomeric with pin	1.04	with head pin	1.03	spherical	1.01	creeping	1.00	<table border="1"> <tr><th>K<sub>sup</sub></th><th>K<sub>an</sub></th><th>K<sub>oc</sub></th></tr> <tr><td>No</td><td>1.10</td><td></td></tr> <tr><td>Yes</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>Supports Height</td><td>H<sub>b</sub> &gt; 30 cm</td><td>1.05</td></tr> <tr><td></td><td>H<sub>b</sub> &lt; 30 cm</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>Dist. I beam pier cap end</td><td>d<sub>1</sub> &lt; 20 cm</td><td>1.05</td></tr> <tr><td></td><td>d<sub>1</sub> &gt; 20 cm</td><td>1.00</td></tr> <tr><td>N. beam &lt; 3</td><td></td><td>1.10</td></tr> <tr><td>N. beam &gt; 3</td><td></td><td>1.00</td></tr> </table>	K <sub>sup</sub>	K <sub>an</sub>	K <sub>oc</sub>	No	1.10		Yes			Supports Height	H <sub>b</sub> > 30 cm	1.05		H <sub>b</sub> < 30 cm	1.00	Dist. I beam pier cap end	d <sub>1</sub> < 20 cm	1.05		d <sub>1</sub> > 20 cm	1.00	N. beam < 3		1.10	N. beam > 3		1.00
K <sub>sd</sub>	K <sub>sd</sub>																																										
Metallic	1.10																																										
Roller	1.08																																										
Elastomeric with pin	1.04																																										
with head pin	1.03																																										
spherical	1.01																																										
creeping	1.00																																										
K <sub>sup</sub>	K <sub>an</sub>	K <sub>oc</sub>																																									
No	1.10																																										
Yes																																											
Supports Height	H <sub>b</sub> > 30 cm	1.05																																									
	H <sub>b</sub> < 30 cm	1.00																																									
Dist. I beam pier cap end	d <sub>1</sub> < 20 cm	1.05																																									
	d <sub>1</sub> > 20 cm	1.00																																									
N. beam < 3		1.10																																									
N. beam > 3		1.00																																									
$N_{\alpha} = (2.03 + 1.67 L + 6.66 H) \cdot (1 + 0.00125 \alpha^2)$																																											
$H [m] = \frac{1}{2} \left( \frac{L}{\sin \alpha} + \frac{H}{\cos \alpha} \right)$																																											
<table border="1"> <tr><th>K<sub>oc</sub></th></tr> <tr><td>N &lt; N/2</td><td>1.10</td></tr> <tr><td>N/2 &lt; N &lt; N</td><td>1.05</td></tr> <tr><td>N &lt; N</td><td>1.00</td></tr> </table>			K <sub>oc</sub>	N < N/2	1.10	N/2 < N < N	1.05	N < N	1.00																																		
K <sub>oc</sub>																																											
N < N/2	1.10																																										
N/2 < N < N	1.05																																										
N < N	1.00																																										

Tab. 2 - Parametri utilizzati nella definizione dell'Indice di Danneggiabilità Sismica - Parameters used to define the Seismic Damage Index

Per ogni danno/degrado si tiene conto del suo impatto nei confronti degli effetti sulla durabilità e sicurezza complessiva dell'opera o dell'elemento strutturale interessato, dell'impatto del singolo elemento sulla stabilità complessiva dell'opera, dell'intensità del danno e della sua estensione.

Si può quindi definire un Indice di Danneggiabilità sismica adeguatamente corretto per tener conto dell'effettivo stato di conservazione dell'opera:

$$ID_{sismica} = \alpha_D \cdot I_D \quad (3)$$

Il parametro CR (GRECO & RAFFAELE, 2008) assume valori compresi fra 0.05 e 0.5; corrispondentemente il fattore di correzione  $\alpha_D$  può variare da 1.05 a 2.00 passando da una condizione in cui risultano sostanzialmente assenti difetti strutturali, ad una situazione di criticità elevata in termini di danno/degrado.

### INDICE DI DANNEGGIABILITÀ IDRAULICA

L'obiettivo perseguito nell'ambito dello svolgimento di un'analisi multihazard, è stato quello di affiancare all'esistente Indice di Danneggiabilità Sismica un semplice criterio per la stima della vulnerabilità idraulica degli attraversamenti, mediante il quale caratterizzare e confrontare opere, definire rapidamente situazioni di criticità meritevoli di un maggiore approfondimento analitico e di una modellazione più rigorosa, individuare priorità di intervento. Tale scopo è stato raggiunto attraverso l'utilizzo di un modello semplificato di validità generale, costruito in riferimento alle grandezze idrauliche e strutturali ritenute maggiormente rilevanti nei fenomeni di interesse, e ricalcando formalmente il modello proposto in ambito sismico. In prima battuta, la vulnerabilità idraulica di un ponte è considerata unicamente dipendente dalla possibilità di deflusso di portate di piena attraverso la luce libera dell'opera, rimandando a livelli successivi di analisi la valutazione di problematiche più complesse quali i fenomeni di erosione e trasporto solido, o l'analisi delle sollecitazioni strutturali nel corso di una piena.

L'indice di Danneggiabilità Idraulica, rappresentativo degli elementi di rischio connessi alla vulnerabilità intrinseca del ponte, alla pericolosità idraulica del sito in cui l'opera è localizzata, ed alle caratteristiche del bacino imbrifero di riferimento, è definito dalla seguente espressione:

$$ID_{idraulica} = \frac{Q_{200} - Q_{min}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (4)$$

Il parametro  $Q_{200}$  rappresenta un valore di portata che può defluire nella sezione dell'opera con tempo di ritorno pari a 200 anni.  $Q_{max}$  e  $Q_{min}$  definiscono due valori di portata di riferimento caratteristici dell'opera, pari rispettivamente alla portata che può transitare determinando il riempimento totale fino all'intradosso dell'impalcato e a quella che può defluire considerando un franco pari ad un metro (coerentemente con le condizioni di sicurezza idraulica stabilite nelle Norme Tecniche di attuazione del PAI dell'Autorità di Bacino della Puglia).

Each kind of damage/degradation is evaluated with regard to its influence on durability and safety of the bridge or, more specifically, on the specific structural element considered, to the impact that the specific element has on the stability of the structure, and to damage intensity and extent.

So it is possible to define a modified Seismic Damage Index, which takes into account the effective structural maintenance condition:

The parameter CR (GRECO & RAFFAELE, 2008) reaches values between 0.05 and 0.5; at the same time, the corrective factor should be considered between 1.05 and 2.00, varying from a condition in which structural problems are not present, to a condition of high vulnerability considering damage or degradation.

### HYDRAULIC DAMAGE INDEX

The objective pursued with the development of a multihazard risk analysis, is the definition of a connection between the existing Seismic Damage Index and a new index, connected with structural hydraulic vulnerability, which is able to characterize bridges and viaducts, also making comparisons, outline immediately situations of potential risk needing more and complete analysis, define priority lists. This purpose was reached introducing a new simple and general model, built with special attention to those structural and hydraulic parameters that have to be considered more relevant for the analyzed events, and keeping the existing seismic model. During a first level analysis, hydraulic vulnerability has to be connected only with the behavior and the occupation of the bridge cross section during a flood, while more detailed analysis should evidence other relevant aspects, such as sediment erosion and transport and structural stresses during a flood.

Hydraulic Damage Index, that is strictly connected with risk factors associated to the own vulnerability of the bridge, to the natural hydraulic hazard of the geographical area, and to the principal characteristics of the watershed, is defined as follows:

The term  $Q_{200}$  represents the expected value of flood, evaluated at the cross section of the bridge, with 200 years of return period.  $Q_{max}$  e  $Q_{min}$  represent two flow values strictly connected with the bridge configuration, respectively equivalent to the expected maximum flow assuming a complete occupation of the cross section, and to the admitted flow considering 1 m of freeboard (according to the conditions of hydraulic safety reported in "Norme tecniche di attuazione del PAI" of Autorità di Bacino della Puglia).

Eventuali valori negativi assunti da  $ID_{idraulica}$  stanno a significare opere ben dimensionate, in cui la portata bicentenaria può defluire con un'occupazione della sezione caratterizzata da oltre un metro di franco; convenzionalmente si assegna a queste condizioni un valore dell'indice di Danneggiabilità Idraulica pari a 0. Valori poco superiori al valore nullo sono associati ad opere per le quali non ci siano particolari condizioni di criticità, viceversa valori vicini all'unità indicano che la portata bicentenaria tende a defluire in condizioni prossime a quella limite ammissibile. Elevata criticità è da attribuirsi ad opere per le quali l'Indice assuma valore superiore ad 1, in quanto si presume l'insufficienza della sezione di deflusso in relazione ad eventi con tempo di ritorno anche minore di 200 anni.

La valutazione dell'Indice di Danneggiabilità Idraulica proposta nella presente procedura si basa su due ipotesi fondamentali. Una di carattere "geometrico" che consiste nello schematizzare la sezione libera di deflusso come una sezione rettangolare equivalente, di base (B) pari alla larghezza libera in corrispondenza dell'attraversamento (ottenuta sommando le luci nette delle varie campate costituenti l'opera), e di altezza (Y) pari all'altezza libera media tra intradosso e fondo alveo. L'altra di carattere "idraulico" che consiste nell'ipotizzare che il passaggio della corrente in corrispondenza dell'opera avvenga allo stato critico. Tale ipotesi ha lo svantaggio di essere sicuramente la meno cautelativa tra le possibili (considera infatti il transito della massima portata a parità di energia), ma è al tempo stesso la più semplice, richiedendo solo la individuazione dei suddetti dati geometrici. Allo stato critico, infatti, portata e carico sono legate dalla relazione:

$$Y^3 = \frac{(Q/B)^2}{g} \Rightarrow Q = \sqrt{g \cdot Y^3 \cdot B^2} = 3.13 \cdot B \cdot Y^{1.5} \quad (5)$$

Per tener conto di una portata più realistica relativa a condizioni diverse da quella critica occorre applicare alla (4) un opportuno fattore di riduzione adeguatamente calibrato sull'attendibilità delle suddette ipotesi. Nella presente procedura, analisi e considerazioni idrauliche condotte sulle aste fluviali principali afferenti ai bacini più significativi della provincia di Foggia hanno consigliato di utilizzare un fattore particolarmente cautelativo pari a 0.6. In queste ipotesi i valori di riferimento  $Q_{max}$  e  $Q_{min}$ , delle portate caratteristiche dell'opera, così come prima definiti, valgono rispettivamente:

$$\begin{aligned} Q_{max} &= 1.88 \cdot B \cdot Y_{max}^{1.5} \\ Q_{min} &= 1.88 \cdot B \cdot Y_{min}^{1.5} \end{aligned} \quad (6)$$

Il valore di portata  $Q_{200}$ , relativo al tempo di ritorno di 200 anni, può essere invece calcolato attraverso le ordinarie tecniche di modellazione afflussi-deflussi: nella procedura presentata, si è fatto ricorso al metodo del Curve Number e alla formulazione nota come "metodo razionale". Il metodo del CN, considerando anche che ha una applicazione ottimale su bacini di ridotta superficie (Soil Conservation Service SCS, 1972), è stato adoperato per il calcolo delle portate su bacini caratterizzati da area minore di 40 km<sup>2</sup>. Per le superfici maggiori si è fatto invece ricorso al metodo razionale. Si riportano di seguito le relazioni per il calcolo

Negative values of the  $ID_{idraulica}$  are connected with safe structures, in which the 200 years-flow should transit with a freeboard greater than 1m; conventionally the Hydraulic Damage Index should be set to 0 in these situations. If the value results slightly higher than 0 there is no specific risk, but if the value becomes approximately equal to unit, the structures is expected to reach limit conditions. Structures characterized by higher values than the unit are also characterized by high vulnerability, because the bridge appears to be unsafe even considering flood events with a return period lower than 200 years.

The estimate of the hydraulic vulnerability index here proposed, is based on two simple hypothesis. On one hand there is a geometric hypothesis, based on the assumption that the bridge cross section is represented by a rectangular section, in which the dimension "B" is the total free width under the bridge (calculated as the sum of the widths of the spans), and "Y" is the height between the river bed and the bottom of the superstructure. On the other hand there is an hydraulic hypothesis, based on the assumption that the flow should be described considering the critical state. This hypothesis is certainly the less conservative one, but it is also the most simple one, because it allows the calculation of the flow only taking into account geometrical aspects. In fact, considering the critical state, flow and water height are connected as follows:

To get more realistic flow values, considering that the hypothesis of critical state is not completely correct, a correction coefficient should be introduced. In the proposed method, as a result of analysis and evaluations conducted on the most relevant rivers belonging to Foggia region, a precautionary value of 0.6 is set. So, considering all these hypothesis, the values  $Q_{max}$  e  $Q_{min}$  as formerly defined, change as follows:

The flow value  $Q_{200}$ , calculated considering 200 years of return period, is determined in the proposed methodology, through the application of the most commonly used "rainfall-runoff" modeling techniques: the "Curve number" and the "Rational" methods; the former is used for watersheds with an area smaller than 40 km<sup>2</sup>, considering also that this model is usually applied in computations on small watersheds (Soil Conservation Service SCS, 1972), the latter is used for other watersheds. The relationships used in the models presented, are here described:

delle portate alla base delle due metodologie considerate:

$$Q_{RAZ} = \frac{C \cdot A \cdot h_c}{3.6 \cdot t_c} = \frac{C \cdot A \cdot i_T}{3.6} \quad (7)$$

$$Q_{CN} = 0.208 \frac{V \cdot A}{t_a} \quad (8)$$

L'applicazione delle relazioni (7, 8) richiede fundamentalmente la conoscenza della superficie (A) del bacino e dell'intensità critica della precipitazione di assegnato tempo di ritorno  $i_T$  intesa come rapporto tra altezza critica  $h_c$  e tempo di corrivazione  $t_c$  ricavata attraverso le curve di possibilità climatica del VAPI (FIORENTINO & COPERTINO, 1994). In particolare, poi, la formula razionale necessita della stima, non sempre agevole, del coefficiente di deflusso (C) che tiene conto della riduzione dell'afflusso meteorico in funzione delle caratteristiche del bacino, quali uso del suolo, geologia, pendenza dei versanti. Il metodo del CN invece richiede, per la stima del volume (V) di deflusso e del tempo caratteristico  $t_a$  (tempo di accumulo), la determinazione del parametro "CN", un numero adimensionale compreso tra 0 e 100, funzione delle caratteristiche del suolo in termini di natura (essenzialmente litologia), copertura vegetale e condizioni di umidità antecedenti la precipitazione.

A questo scopo si è impostata un'analisi volta a determinare, attraverso il ricorso a strumenti GIS, carte rappresentative del coefficiente di deflusso e del CN per la zona di interesse, attraverso l'analisi dei dati geomorfologici del territorio. Per la stima e taratura ottimale dei valori si è anche fatto un confronto con i risultati derivanti dall'analisi statistica delle serie storiche di dati idrometrici disponibili nelle stazioni strumentate.

Rappresentando graficamente i valori delle portate ottenuti grazie alle metodologie prima citate, in riferimento a gruppi significativi di sottobacini di differente estensione, si è potuto riscontrare in generale l'esistenza di una buona correlazione tra portata e area dei bacini. Ciò è da considerarsi particolarmente utile, in quanto è possibile ottenere una relazione di validità "generale" cioè estendibile a tutte le sezioni del bacino in esame ed utilizzabile per il calcolo della portata di riferimento, operando in dettaglio solo su un numero ridotto di sezioni. Ovviamente questo è un dato di particolare rilievo, soprattutto in considerazione del fatto che il modello proposto deve essere destinato principalmente a valutazioni "speditive" di primo livello della vulnerabilità dei ponti, per effettuare le quali sarebbe eccessivamente dispendioso dover prevedere una completa modellazione afflussi-deflussi.

Si riporta di seguito un quadro sintetico delle relazioni ottenute. In particolare, considerando le significative differenze geomorfologiche tra i vari bacini, si è scelto di ricavare queste relazioni omogenee in maniera distinta per i vari corsi d'acqua indagati (Cervaro, Candelaro, Carapelle). Inoltre, allo scopo di migliorare l'aderenza delle relazioni interpolanti individuate ai dati calcolati di riferimento, si è pensato di "spezzare" l'interpolazione, utilizzando come valore di soglia una superficie pari a 160 km<sup>2</sup>. In sostanza, per bacini di area in-

The application of the formulas above presented (7, 8) requires only the computation of the area of the watershed (A), and of the critical rainfall intensity  $i_T$  calculated as the ratio between the critical rainfall  $h_c$  and the corrivation time  $t_c$ , considering a fixed return period calculated according to VAPI curves (FIORENTINO & COPERTINO, 1994). Moreover, the "rational" method requires also an estimate of the runoff coefficient, a parameter that takes into account the reduction of the total rainfall intensity due to watershed characteristics such as land use, geology, slope. The Curve Number method requires an estimate of the term CN, to determine the total flow volume and the time  $t_a$  (time to peak) that should be used: CN is a number varying between 0 and 100, depending on soil characteristics, lithology, vegetation coverage and antecedent moisture conditions.

A geographical analysis based on GIS software was carried on in order to obtain a graphical representation of runoff coefficient and CN over the analyzed area, using geomorphologic data. Moreover, statistic information regarding rainfall and flow, available for some particular gauged areas were used to improve the estimate of values and coefficients.

As a consequence of the graphical representation of the calculated values of flow, and considering particular groups of watersheds with different values of area, a good relationship between flow and area was detected.

This result is particularly relevant, because it determines the possibility of defining a general relationship useful to calculate the expected flow with a specific return period, in every section of the watershed, starting only from the data calculated in a few significant sections. This fact becomes particularly interesting also considering that the proposed method is meant specifically to be used in "first level" simple vulnerability analysis, in which a complete computation of "rainfall-runoff" models is not appropriate.

A complete graphical synthesis of the relationships obtained is now presented. Particularly, considering also some relevant geomorphological differences between different watersheds, these relationships were determined considering homogeneous river areas (Cervaro, Carapelle, Candelaro). Moreover, the interpolation was divided considering an area threshold value of 160 km<sup>2</sup>, to get better relationships. So, two different relationships were calculated, considering watersheds with area smaller than 160 km<sup>2</sup> or greater than 160 km<sup>2</sup>: they're both power laws, with a unique common value for 160 km<sup>2</sup>, used to calculate the expected flow with a return period of 200 years only considering the area of the watershed. Thus, the problem of overestimating flow values attributed to small watersheds and no-

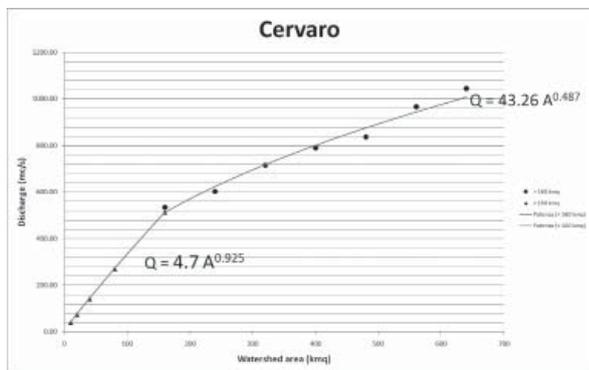


Fig. 1 - Relazioni tra area e portata per il fiume Cervaro  
- Relationship between area and flow for Cervaro river

ticed with the introduction of a unique interpolating curve, is solved.

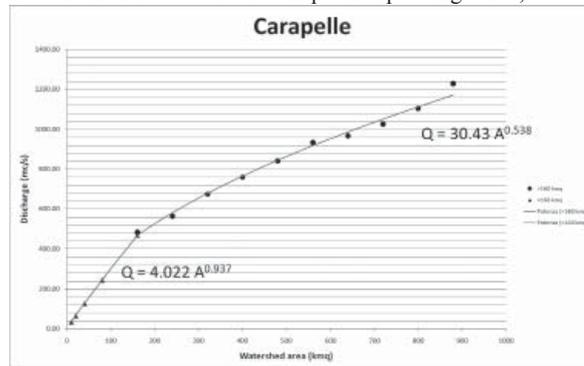


Fig. 2 - Relazioni tra area e portata per il fiume Carapelle  
- Relationship between area and flow for Carapelle river

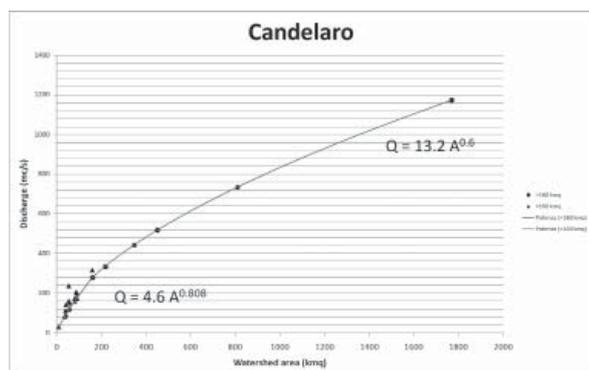


Fig. 3 - Relazioni tra area e portata per il fiume Candelaro  
- Relationship between area and flow for Candelaro river

fiore a 160 km<sup>2</sup>, e per bacini di area superiore a 160 km<sup>2</sup>, sono state dedotte due differenti correlazioni di potenza per calcolare la portata bicentenaria in funzione della superficie di riferimento, imponendo la coincidenza del valore fornito in corrispondenza della soglia. In questo modo si supera un problema di sovrastima dei valori di portata caratteristici per bacini di ridotte dimensioni, riscontrato a seguito dell'applicazione di una unica curva di interpolazione.

Il valore di portata defluente nella sezione dell'opera, così valutato, può essere però ancora condizionato da una serie di aspetti locali particolarmente rilevanti, spesso riconducibili a situazioni desumibili da semplice osservazione e rilievo, che quindi possono essere tenuti in considerazione con un grado di approssimazione compatibile con il livello di analisi in atto.

Il valore di portata defluente nella sezione viene infatti, nel modello proposto, ulteriormente corretto considerando quelli che possono essere effetti in grado di determinare ostruzioni o riduzioni al deflusso in corrispondenza dell'attraversamento: in particolare si è ritenuto di considerare come rilevanti la presenza di vegetazione, la contrazione in altezza e in larghezza della sezione naturale dell'alveo prodotta dalla presenza dell'opera, l'inclinazione della corrente rispetto all'asse delle

The expected flow value in the bridge cross section, estimated as above described, should be also influenced by different local aspects, sometimes particularly relevant, which are often associated with factors that could be observed and evaluated by means of simple field analysis. These factors are considered with an approximation completely compatible with a first level analysis.

The expected flow value in the bridge cross section, as determined in the proposed model, is corrected considering local effects that should cause obstructions or determine flow limitations: particularly, we focused on the presence of vegetation, on a width or height reduction due to the presence of the structure in the river bed, on the inclination between the stream and the piers' axis, on the local river curvature.

Considering the effect of vegetation, a flow reducing coefficient was assumed as 0.8 if the vegetation appears to be thick or as 0.9 if the vegetation is thin. A unit coefficient was assumed if vegetation was not present.

As far as the contraction of the cross section is concerned, considering the natural river section, it is possible to determine if the structure causes a significant reduction in the width of the section

pile o la curvatura del corso d'acqua in corrispondenza dell'opera.

In merito alla presenza di vegetazione, si è attribuito un fattore riduttivo della portata transitante pari a 0.8 o 0.9 rispettivamente nel caso di vegetazione in alveo fitta e rada, attribuendo coefficiente unitario nel caso di assenza di vegetazione.

In relazione alla contrazione di sezione rispetto alla sezione originaria d'alveo, la presenza dell'opera può determinare una sensibile riduzione della sezione di deflusso, sia in larghezza (ad esempio per ingombro delle spalle in alveo, ovvero per eccessivo ingombro delle spalle), sia in altezza (ad esempio qualora l'intradosso sia sensibilmente più basso delle quote arginali). Nella presente procedura tale eventualità è controllata da un coefficiente di riduzione cui viene attribuito un valore variabile in funzione dell'entità della contrazione, fino ad un minimo di 0.75.

Infine, per quanto attiene l'inclinazione della direzione della corrente rispetto all'asse delle pile, i valori delle portate di riferimento vengono ridotte di un fattore variabile fino a 0.85 per angoli compresi tra 0° e 30°, e fino ad un minimo di 0.7 per angoli superiori a 30°.

### INDICE DI FUNZIONALITÀ

Accanto agli Indici di Danneggiabilità, strettamente connessi ai rischi presi in esame nella procedura multihazard, grande rilievo assumono quegli indicatori correlati all'importanza dell'opera nell'ambito della rete di appartenenza e alla posizione strategica dell'opera nell'ambito della comunità servita. Questi parametri, insieme ad altri particolarmente significativi quali il volume di traffico ed il tipo di ostacolo sovrappassato, concorrono a definire l'Indice di Funzionalità, sintetico degli elementi di rischio correlati all'esposizione del manufatto.

Con l'obiettivo di primo livello di definire liste di priorità nell'ambito di una stessa rete infrastrutturale, è opportuno che tali parametri siano selezionati in maniera tale da risultare qualitativamente essenziali ed in numero ridotto.

L'Indice di funzionalità è costruito come somma pesata di fattori calibrati sui suddetti parametri (MEZZINA & RAFFAELE, 2007) e (GRECO & RAFFAELE, 2008), secondo la seguente relazione:

$$IF = \sum_{i=1}^n \Phi_i \cdot P_{\Phi_i} \quad (9)$$

I fattori  $\Phi_i$  considerati possono al più assumere valore unitario, pertanto l'indice di funzionalità sarà compreso tra 0 e 1. Naturalmente la quantificazione dei fattori  $\Phi_i$  e dei pesi  $P_{\Phi_i}$  atti a definire il suddetto indice dipende da giudizi altamente soggettivi, e si presta ad essere calibrata in funzione delle finalità e degli obiettivi specifici che il gestore di una rete si propone di raggiungere nell'ambito della definizione di liste di priorità.

I fattori selezionati nella presente procedura per la quantificazione dell'Indice di Funzionalità, e i relativi pesi adottati sono ripresi da (MEZZINA & RAFFAELE, 2007) e qui di seguito sintetizzati:

- categoria della strada di appartenenza del ponte, in quanto fattore rappresentativo della rilevanza socio-economica dell'opera ( $P_{\Phi_1}=18\%$ ); fattore  $\Phi_1$  descritto in Tab. 3.

(as a consequence of the presence of piers or abutments) or in the height of the section (if the intrados of the superstructure results lower than the embankments). In the proposed method, the width or height reduction is considered by means of a reducing coefficient, that varies according to the contraction entity, assuming 0.75 as minimum value.

Finally, as far as the inclination between the stream and the piers' axis is concerned, flow values are usually reduced using a variable coefficient that reaches the value of 0.85 if the inclination angle is between 0° and 30°, and a minimum value of 0.7 if the inclination angle is greater.

### FUNCTIONALITY INDEX

Besides these Damage Indexes, strictly connected with the kind of risk considered in the multihazard analysis, a great importance is assumed by particular indicators correlated with the importance of the bridge in the infrastructural system to which it belongs, and with the relevance of the structure in the served community. All these parameters, also with other particularly significant ones, such as traffic volume and kind of obstacle passed, contribute to define the Functionality Index, that summarizes risk elements connected with the exposure of the bridge.

Considering the objective of defining priority lists on a specific infrastructural network, it is necessary to use a few, simple and synthetic indexes.

The Functionality Index is determined as the weighted sum of factors connected to the parameters above mentioned (MEZZINA & RAFFAELE, 2007) and (GRECO & RAFFAELE, 2008), according to the following relationship:

The considered factors  $\Phi_i$  have the unit value as maximum, so the Functionality Index is between 0 and 1. Obviously, the computation of the factors  $\Phi_i$  and of the weights  $P_{\Phi_i}$  used to define the previously introduced Index, is due to subjective evaluations and should be calibrated according with the purposes and the specific objects that the infrastructural net's director has while compiling a priority list.

The factors defined to evaluate the Functionality Index, and their corresponding weights, are taken from (MEZZINA & RAFFAELE, 2007) and here summarized:

- belonging class of the street considered, that represents social and economical relevance of the structure ( $P_{\Phi_1}=18\%$ ); factor  $\Phi_1$  described in Tab. 3.
- significance and typology of the river passed ( $P_{\Phi_2}=18\%$ ); factor

Class of the considered infrastructure	$\Phi_1$
European corridor	1.0
Highway	0.9
State road	0.8
Regional or provincial road	0.7
Primary communal road	0.5
Others	0.3

Tab. 3 - Valori del coefficiente  $\Phi_1$   
- Values of coefficient  $\Phi_1$

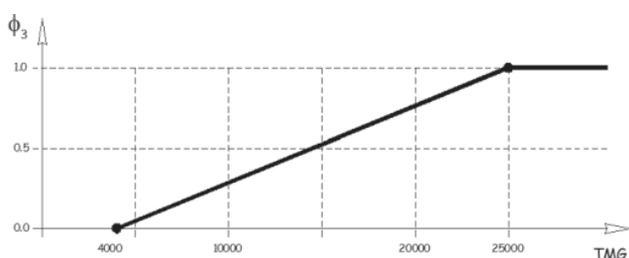


Fig. 4 - Valori del coefficiente  $\Phi_3$   
- Values of coefficient  $\Phi_3$

- importanza e tipologia del corso d'acqua sovrappassato ( $P_{\Phi_2}=18\%$ ); fattore  $\Phi_2$  descritto in Tab. 4.

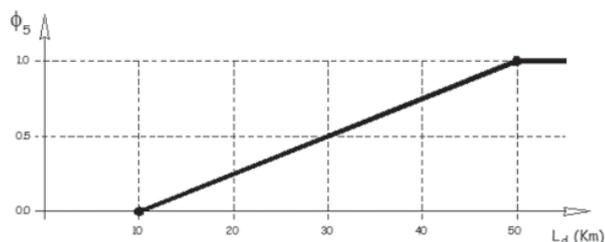


Fig. 6 - Valori del coefficiente  $\Phi_5$   
- Values of coefficient  $\Phi_5$

- livello di traffico (definito dal TGM) ( $P_{\Phi_3}=24\%$ ); fattore  $\Phi_3$  descritto in Fig. 4.
- lunghezza complessiva dell'opera L (m), (se maggiore, maggiore risulta l'esposizione) ( $P_{\Phi_4}=12\%$ ); fattore  $\Phi_4$  descritto in Fig. 5.
- lunghezza della deviazione del traffico  $L_d$ (m) nelle ipotesi di percorso alternativo (un'opera è tanto più importante, nell'ambito di una rete stradale, quanto minori sono le alternative che la rete presenta al suo attraversamento) ( $P_{\Phi_5}=15\%$ ); fattore  $\Phi_5$  descritto in Fig. 6.
- posizione dell'opera, e quindi natura dell'area e delle attività servite dalla stessa ( $P_{\Phi_6}=13\%$ ); fattore  $\Phi_6$  descritto in Tab. 5.

### ANALISI MULTHAZARD: IL METODO PROPOSTO

Nella presente procedura, riprendendo e completando l'impostazione utilizzata in (MEZZINA & RAFFAELE, 2007), agli Indici di Danneggiabilità Sismica ed Idraulica ed all'Indice di Funzionalità descritti ai punti precedenti, si affida il compito di definire parametri di

Typology of river passed	$\Phi_2$
Navigable river	1.0
River $L \geq 50$ m	0.9
River $25 \leq L < 50$ m	0.8
River $5 \leq L < 25$ m	0.7
River $L < 5$ m	0.5
Hollows without water	0.3

Tab. 4 - Valori del coefficiente  $\Phi_2$   
- Values of coefficient  $\Phi_2$

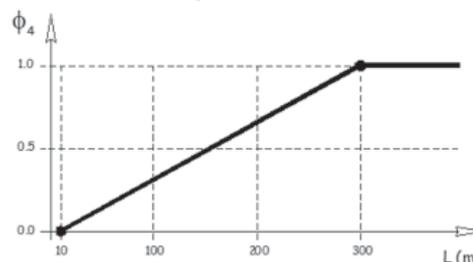


Fig. 5 - Valori del coefficiente  $\Phi_4$   
- Values of coefficient  $\Phi_4$

- $\Phi_2$  descritto in Tab. 4.
- traffic level (as defined by TGM) ( $P_{\Phi_3}=24\%$ ); fattore  $\Phi_3$  descritto

Area	$\Phi_6$
Industrial	1.0
Historical	0.9
Urban	0.8
Mountain	0.7
Semi-urban	0.5
Rural	0.3

Tab. 5 - Valori del coefficiente  $\Phi_6$   
- Values of coefficient  $\Phi_6$

- in Fig. 4.
- total length of the structure L(m), (if it increases, the exposure increases too) ( $P_{\Phi_4}=12\%$ ); fattore  $\Phi_4$  descritto in Fig. 5.
- length of the detour  $L_d$ (m) that becomes necessary if an alternative course is considered (the importance of a structure in an infrastructural net increases if there are few alternatives to its use) ( $P_{\Phi_5}=15\%$ ); fattore  $\Phi_5$  descritto in Fig. 6.
- position of the structure, and kind of areas and activities served ( $P_{\Phi_6}=13\%$ ); fattore  $\Phi_6$  descritto in Tab. 5.

### MULTHAZARD ANALYSIS: THE PROPOSED MODEL

In the proposed model, also considering and completing the methodology introduced in (MEZZINA & RAFFAELE, 2007), the first level priority analysis is conducted exploiting and combining the Seismic, Hydraulic and Functionality Index, as described above.

priorità utili per analisi di primo livello.

Nell’ottica di un’analisi multihazard, è possibile tenere conto contestualmente dei tre indici suddetti, introducendo un Indice di Priorità, così definito:

$$IP = \sqrt{(v_1 \cdot ID_{sismico})^2 + (v_2 \cdot ID_{idraulico})^2 + v_3 \cdot IF^2} \quad (10)$$

Va innanzitutto considerato che il significato dei tre indici è analogo da un punto di vista qualitativo: al raggiungimento del valore unitario o in prossimità di esso, l’opera si trova, in termini prestazionali o di funzionalità, prossima al limite superiore assunto come riferimento; ciononostante i criteri alla base della definizione dei tre indici sono sostanzialmente differenti, e ciò richiede nella (10) l’utilizzo di coefficienti  $v$  che tendono a conferire peso diverso ai suddetti indici.

I due Indici di Danneggiabilità utilizzati nella presente procedura sono caratterizzati da una differenza di fondo. In ambito sismico si assume come condizione limite la condizione ultima, prossima al collasso strutturale, al raggiungimento della quale è associata una situazione di totale inservibilità dell’opera. È assunto infatti, quale riferimento, un sisma la cui entità sia tale da condurre l’opera verso uno stato limite in cui *“la costruzione subisce gravi rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali”*.

In ambito idraulico, invece, la condizione che porta alla definizione dell’indice corrispondente ed in particolare al raggiungimento per lo stesso del valore limite unitario, non è correlata univocamente e necessariamente ad una condizione *“ultima”* della struttura, ma ad una situazione legata piuttosto a condizioni limite di *“operatività”* contestuale all’evento. È pertanto opportuno pesare l’indice di Danneggiabilità Idraulica rispetto al Sismico con un fattore opportuno, eventualmente variabile in funzione della possibilità che si instaurino al di sotto dell’opera condizioni di deflusso in pressione.

With the purpose of conducting a multihazard risk analysis, it is possible to consider simultaneously these three indexes, defining a Priority Index as follows:

First of all it appears necessary to consider that the qualitative sense of the three indexes is similar: when the value is unit or near to unit, the structure has to be considered in a limit condition, as far as functionality or performances are concerned; but it has also to be noticed that the principles used to define the indexes are surely different, this unlikeness requires the introduction in (10) of corrective coefficients  $v$  to weight the different indexes.

The Damage Indexes introduced in the presented procedure, are characterized by a substantial difference. In fact, according to the seismic definition, the limit condition is associated with failure or structural collapse, and so it represents a condition in which the structure is completely not usable. In this analysis an earthquake able to conduct the structure towards the limit condition is assumed as reference: in this condition *“the structure undergoes great breakings and collapses of non-structural and plant elements, and serious damages of structural elements”*.

On the other hand, according to the hydraulic definition, the limit condition described by the unit value of the Hydraulic Damage Index is not directly connected with a *“collapse”* condition of the structure, but with an *“effectiveness”* one during the flood event. So, it appears necessary to weight the Hydraulic Damage Index in comparison with the Seismic Damage Index, introducing a weight factor associated with the possibility of pressure flow under the bridge.

The weight factor associated with the Functionality Index is instead determined by the directors of infrastructural networks, accord-

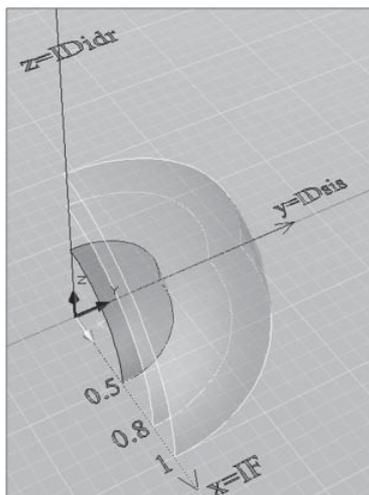


Fig. 7 - Spazio di Priorità  
- Priority space

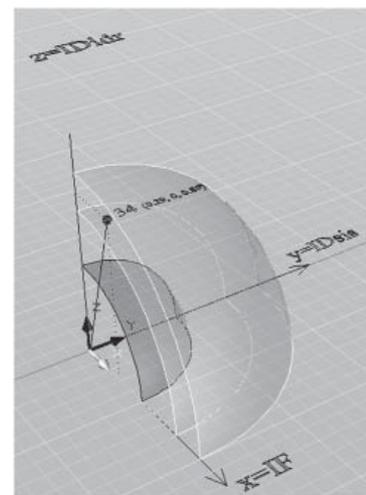


Fig. 8 - Vulnerabilità di un ponte rappresentata nello Spazio di Priorità  
- A bridge’s vulnerability represented in the priority space

Il peso da dare all'Indice di Funzionalità è, invece, prerogativa dei gestori delle reti infrastrutturali; generalmente il coefficiente  $v_1$  è assunto variabile nell'intervallo 0.4 - 0.8 in funzione degli obiettivi fissati.

Se in uno spazio a tre dimensioni del tipo in Fig. 7 e Fig. 8 (Spazio di Priorità) vengono rappresentati sugli assi coordinati i tre indici adeguatamente pesati, il punto di coordinate  $(v_1 \cdot ID_{sismico}, v_2 \cdot ID_{idraulica}, v_3 \cdot IF)$  individua la posizione del manufatto nello Spazio di Priorità, mentre l'indice di priorità IP ne definisce la distanza dall'origine.

Complessivamente l'Indice di Priorità sintetizza il livello di rischio totale associato alla singola opera nell'ambito della rete analizzata, e graficamente la posizione del punto nello Spazio di Priorità consente di individuare quale tipo di hazard causa il livello di rischio riscontrato.

**APPLICAZIONE DEL MODELLO**

Si riportano quindi i risultati dell'applicazione della procedura ad un gruppo di opere localizzate su aste fluviali afferenti ai principali bacini localizzati nella Provincia di Foggia. È stato preso in esame un rilevante numero di attraversamenti secondo le ubicazioni riportate in Fig. 9 (trascurando le sole opere interessate da contributi provenienti da bacini imbriferi di area minore di 25 Km<sup>2</sup>). Prima di procedere è importante fare alcune considerazioni operative. In primo luogo si sottolinea come l'analisi di vulnerabilità idraulica sia stata effettuata su tutte le opere censite (quindi anche tombini e ponticelli), mentre l'analisi sismica abbia naturalmente riguardato in maniera esclusiva le opere più significative (essenzialmente ponti e viadotti con luci notevoli). Pertanto il modello di analisi multihazard è stato applicato su una parte delle opere complessivamente indagate. Inoltre è importante sottolineare come l'analisi proposta si presti ad una duplice interpretazione: da un lato la definizione delle liste di priorità può avere un interesse "fisico - naturale", quindi può riguardare ad esempio opere localizzate da monte verso valle lungo una particolare asta fluviale; dall'altro lato, una lista di priorità può essere definita a livello "infrastrutturale", e quindi può essere finalizzata alla individuazione

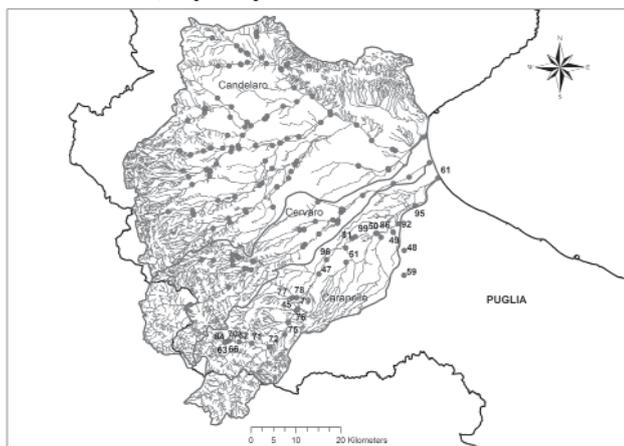


Fig. 9 - Posizione delle strutture analizzate  
- Position of the analyzed structures

ing to specific necessities, and should vary between 0.4 and 0.8.

In a graphical representation of the Indexes introduced, appropriately weighted, on the axis of a three-dimensional space, as in Fig. 7 and in Fig. 8 (Priority Space), each point defined by three coordinates  $(v_1 \cdot ID_{sismico}, v_2 \cdot ID_{idraulica}, v_3 \cdot IF)$  identifies the position of every single structure in the priority Space, and the index IP determines the distance from the origin.

On the whole, Priority Index summarizes the total risk level associated to the single structure in the network analyzed, and the graphical representation of each point in the Priority Space permits to establish which hazard causes the individuated risk level.

**MODEL APPLICATION**

The results obtained after the implementation of the procedure described on a significant group of structures, located on rivers belonging to the principal watersheds of Foggia region are now presented. The bridges analyzed are numerous and located as in Fig. 9 (only if the watershed contributing has an area lower than 25 Km<sup>2</sup>, the bridge is neglected). First of all some operative considerations are necessary. The hydraulic analysis was conducted on all the structures assessed (also culverts and small bridges), while the seismic analysis was conducted only on the principal structures (bridges and viaducts). So the multihazard model proposed was applied only on a portion of the structures assessed in all. Moreover, it is important to specify that this analysis should be interpreted according to two different points of view: on one hand the definition of priority lists may have a "phys-

OPERA	$Id_{s}$	$Id_{d}$	IF	$v_1$	$v_2$	$v_3$	IP
45	0.67	0.00	0.653	1	0.40	0.4	<b>0.71</b>
47	0.00	0.00	0.653	1	0.40	0.4	<b>0.26</b>
50	0.45	0.00	0.709	1	0.40	0.4	<b>0.53</b>
53	0.49	0.66	0.599	1	0.40	0.4	<b>0.61</b>
58	0.91	0.16	0.647	1	0.40	0.4	<b>0.95</b>
61	0.35	0.91	0.641	1	0.40	0.4	<b>0.57</b>
72	0.29	0.00	0.528	1	0.40	0.4	<b>0.36</b>
75	0.00	0.00	0.572	1	0.40	0.4	<b>0.23</b>
76	0.74	0.00	0.578	1	0.40	0.4	<b>0.77</b>
79	0.09	2.30	0.498	1	0.59	0.4	<b>1.36</b>
86	0.00	0.00	0.59	1	0.40	0.4	<b>0.24</b>
92	0.00	3.59	0.518	1	0.80	0.4	<b>2.88</b>
95	0.66	0.68	0.596	1	0.40	0.4	<b>0.75</b>
96	0.00	0.00	0.673	1	0.40	0.4	<b>0.27</b>
99	0.00	0.00	0.667	1	0.40	0.4	<b>0.27</b>
44	0.87	0.00	0.629	1	0.40	0.4	<b>0.91</b>
48	0.52	0.00	0.655	1	0.40	0.4	<b>0.59</b>
49	0.58	0.00	0.655	1	0.40	0.4	<b>0.63</b>
51	1.00	1.50	0.572	1	0.40	0.4	<b>1.19</b>
59	0.48	1.88	0.569	1	0.53	0.4	<b>1.13</b>
62	0.95	0.00	0.59	1	0.40	0.4	<b>0.98</b>
63	0.31	0.00	0.524	1	0.40	0.4	<b>0.38</b>
64	0.31	0.00	0.524	1	0.40	0.4	<b>0.38</b>
66	0.17	0.00	0.524	1	0.40	0.4	<b>0.27</b>
70	0.00	0.00	0.524	1	0.40	0.4	<b>0.21</b>
71	0.20	0.00	0.554	1	0.40	0.4	<b>0.30</b>
77	0.35	1.06	0.512	1	0.40	0.4	<b>0.59</b>
78	0.35	1.66	0.512	1	0.50	0.4	<b>0.93</b>
81	0.49	3.44	0.512	1	0.80	0.4	<b>2.80</b>

Tab. 6 - Risultati per il fiume Carapelle  
- Results for Carapelle river

dei livelli di rischio associati ad opere localizzate lungo una particolare via di comunicazione (tratta ferroviaria, autostrada...). In Tab. 6 sono sintetizzati i valori assunti dai tre indici che caratterizzano la procedura descritta, in corrispondenza di ogni opera analizzata per il Carapelle; in Fig. 10 sono, invece, diagrammati i risultati dell'analisi condotta in termini di liste di priorità, utilizzando per l'Indice di Danneggiabilità Sismica un peso  $v_1=1$ , per l'Indice di Funzionalità un peso  $v_3=0.4$  e per l'indice di Danneggiabilità Idraulica un peso  $0.4 \leq v_2 \leq 0.8$ . In relazione a quest'ultimo indice, si precisa che se l'opera è caratterizzata da  $ID_{idraulica} < 1$ , nella procedura è stato utilizzato un coefficiente costante e pari a 0.4, mentre negli altri casi si è adottato un peso variabile in proporzione al tirante corrispondente al deflusso della portata  $Q_{200}$ , fino ad un valore massimo di  $v_2=0.8$ .

Infine gli stessi risultati dell'analisi, relativi alle opere più a rischio, possono essere proiettati nello Spazio di Priorità. La procedura proposta ha consentito, pertanto, attraverso un numero ridotto di campagne di sopralluogo, di definire delle liste di priorità e quindi un quadro complessivo della vulnerabilità sismica ed idraulica di ponti e viadotti localizzati nel territorio sotto osservazione, mettendo facilmente in evidenza da un lato le più rilevanti situazioni di criticità e dall'altro, la gradualità dei livelli di rischio. In questa fase il "censimento" delle opere è stato condotto attraverso schede opportunamente strutturate, e di seguito è stata effettuata l'immissione dei

ical-natural" interest, so it may interest groups of structures located on the same river from upstream to downstream; on the other hand a priority list may be defined according to an "infrastructural" interest, and so it may be oriented to the individuation of risk levels of bridges located on a specific road (highways, railways...). In Tab. 6 the values assumed by the three indexes proposed for each structure on Carapelle river, according to the described method, are presented; in Fig. 10 the results of the analysis conducted in terms of priority lists, assuming a weight factor  $v_1=1$  for the Seismic Damage Index, a weight factor  $v_3=0.4$  for the Functionality Index and a varying weight factor  $0.4 \leq v_2 \leq 0.8$  for the Hydraulic Damage Index, are represented. With specific reference to the Hydraulic Damage Index, if the structure has an  $ID_{idraulica} < 1$  the coefficient is set to 0.4, otherwise the weight factor varies proportionally with the  $Q_{200}$  flow height expected, from 0.4 to 0.8.

Finally, the same results, associated to the structures with higher risk level, could be projected in the Priority Space.

The proposed methodology permitted, only requiring a few inspections, to define priority lists and to determine a complete outline of the seismic and hydraulic vulnerability of bridges and viaducts located in the area of interest, evidencing also on one hand the most relevant situations of risk, and on the other hand the gradualness of risk levels. This first level analysis was conducted using prepared

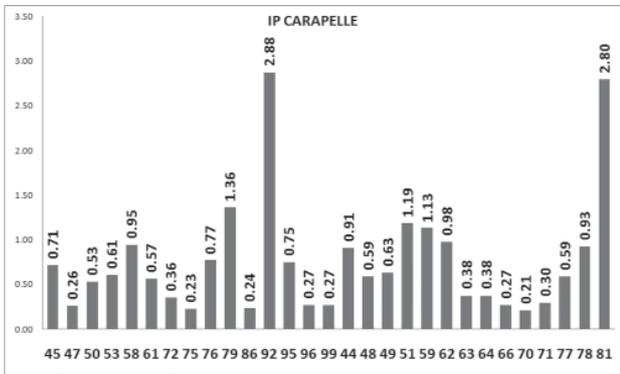


Fig. 10 - IP per le strutture sul fiume Carapelle  
- IP for structures on Carapelle river

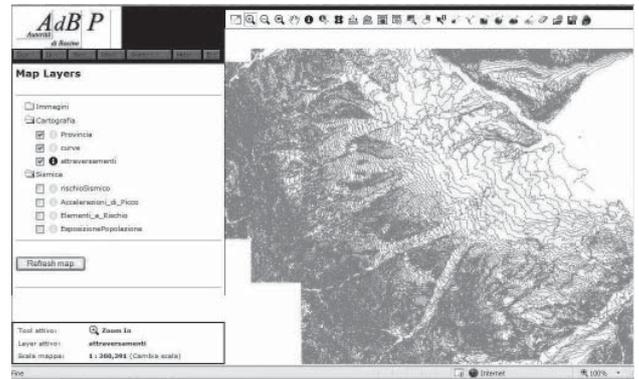


Fig. 11 - Struttura del Web-GIS  
- Structure of the Web-GIS

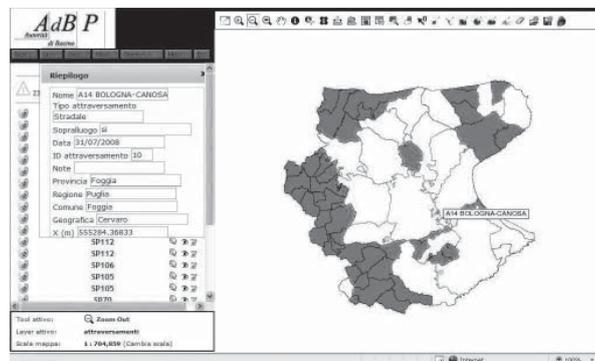


Fig. 12 - Struttura del Web-GIS  
- Structure of the Web-GIS

dati in un server, a servizio di un Web-GIS realizzato dall'Autorità di Bacino della Puglia. Tale strumento, attualmente in fase di perfezionamento, sarà gestibile e modificabile da utenti autorizzati (ad esempio a seguito dei sopralluoghi di aggiornamento da prevedersi con opportuna cadenza, laddove si riscontrino modifiche significative sullo stato delle opere), e risulterà anche consultabile ed interrogabile on-line da utenti interessati.

Si riportano anche alcune immagini significative per descrivere la struttura e le principali funzioni del Web-GIS (Fig. 11 e Fig. 12). Da esse si evince in particolare la possibilità di inserire dati cartografici di riferimento (limiti comunali e regionali, curve di livello, reticolo idrografico...), modificabili ed interrogabili con le tipiche funzioni di un GIS. Inoltre è possibile visualizzare graficamente la localizzazione delle opere e accedere alla scheda di censimento, la quale può essere facilmente esportata, stampata e se necessario modificata.

## CONCLUSIONI

La procedura proposta nella presente nota è improntata alla massima semplicità e maneggevolezza e, se supportata da schede di censimento adeguatamente predisposte, e da una opportuna evoluzione e sviluppo del Web-GIS dell'AdB Puglia, può essere utilmente impiegata per produrre, nell'ambito di un'assegnata rete stradale o in riferimento ad un reticolo idrografico, liste di priorità per ponti e viadotti in un'analisi multihazard di primo livello, in grado di considerare esposizioni sia a rischio sismico che a rischio idraulico.

La procedura, ampiamente testata presso il Dipartimento ICAR del Politecnico di Bari nell'ambito del "Progetto *ANTAEUS*", è completata anche con un'efficace rappresentazione grafica nello Spazio di Priorità. In tale spazio lo status di ogni singola opera è rappresentato da un raggio vettore uscente dall'origine e l'insieme dei raggi relativi a tutte le opere afferenti al network analizzato fornisce una visione sintetica delle caratteristiche prestazionali dell'intera rete. L'inclinazione, rispetto agli assi coordinati, del raggio vettore rappresentativo delle condizioni di ogni singola opera consente inoltre di valutare in maniera immediata il tipo di hazard principale responsabile della vulnerabilità riscontrata per l'opera in esame.

## OPERE CITATE/REFERENCES

- COPERTINO V.A. & FIORENTINO M. (1994) - *Valutazione delle Piene in Puglia*. Dipartimento di Ingegneria e fisica dell'ambiente, Università degli Studi della Basilicata, Potenza, Gruppo Nazionale per la Difesa Dalle Catastrofi Idrogeologiche.
- FEMA (2003) HAZUS-MH MR1 - *Technical Manual. Vol. Earthquake Model*. Federal Emergency Management Agency, Washington DC.
- FERRO V. (2006) - *La sistemazione dei bacini idrografici*. MacGraw-Hill Companies, Milano.
- GRECO R. & RAFFAELE D. (2008) - *Assessment e liste di priorità*. In: MEZZINA M., GRECO R. & UVA G. (2008) - *Sicurezza e conservazione delle prime costruzioni in calcestruzzo armato*. Ed. CittàStudi.
- MEZZINA M. & D. RAFFAELE (2007) - *Vulnerabilità sismica dei ponti in c.a. e c.a.p.: proposta per un condition rating*. XII Convegno Anidis, Pisa.
- WEN-I LIAO & CHING-HSIUNG LOH. (2004) - *Preliminary study on the fragility curves for highway bridges in Taiwan*. Journal of the Chinese Institute of Engineers, **27** (3): 367-375.

forms, and then all the data collected were inserted in a server, on which a Web-GIS service realized by Autorità di Bacino della Puglia works. This system, that is now improving, should soon be easily utilized and modified by authorized users (for example, if significant modifications in the structural conditions are detected during one of the periodic programmed inspections), and should also be usable and questioned on-line by interested users.

A few images representing the structure and the functions of the Web-GIS are now presented (Fig. 11 e Fig. 12). It can be noticed that cartographic data (such as communal or regional boundaries, contours, stream network...) are available, and they can be modified and questioned with the typical GIS functions. Moreover it is possible also to visualize the location of the bridges, and to access to the chart with the data collected, which can be easily exported, printed or modified if it is necessary.

## CONCLUSIONS

The methodology here discussed is characterized by a substantial simplicity and should be immediately handled and, if accompanied on one hand by well structured inspection-tables and on the other hand by the development of the Web-GIS of AdB Puglia, should be immediately applied to build priority lists connected with the results of a first level multihazard risk analysis: so, the results of this analysis, in terms of hydraulic and seismic vulnerability of bridges and viaducts, should be produced for a specific network.

This methodology, widely used and tested in ICAR Department of Technical University of Bari as a part of "Progetto *ANTAEUS*", is also completed by a clear graphical representation in the Priority Space. In this space, each structure is represented by a vector starting from the origin, and the complete representation of the vectors corresponding to the different structures belonging to the analyzed network, gives an idea of the condition of the entire network. The inclination of the vector, in the space represents the condition of each structure and is strictly associated to the specific kind of hazard that determines the vulnerability of the structure.

*Received January 2010 - Accepted May 2010*