



**UNA PROCEDURA SISTEMICA PER LA
VALUTAZIONE DEI FATTORI DI IMPORTANZA
DELLE VARIABILI DI RISCHIO IDROLOGICO DEL
SISTEMA STRADALE**

**Gaetano Bosurgi
Antonino D'Andrea
Orazio Pellegrino
Franco Trifirò**

Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate
Università di Messina – Salita Sperone 31 – 98166 – Vill. S. Agata (ME) – Italy

Tel: +39.090.6765619

Fax: +39.090.395022

E-mail: bosurgi@ingegneria.unime.it

E-mail: dandrea@ingegneria.unime.it

E-mail: opellegrino@ingegneria.unime.it

E-mail: frantrif@tin.it

UNA PROCEDURA SISTEMICA PER LA VALUTAZIONE DEI FATTORI DI IMPORTANZA DELLE VARIABILI DI RISCHIO IDROLOGICO DEL SISTEMA STRADALE

GAETANO BOSURGI - Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate – Università di Messina

ANTONINO D'ANDREA - Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate – Università di Messina

ORAZIO PELLEGRINO - Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate – Università di Messina

FRANCO TRIFIRO' – Dipartimento di Costruzioni e Tecnologie Avanzate – Università di Messina

SOMMARIO

La funzionalità della rete stradale è un obiettivo da perseguire, soprattutto in condizioni particolarmente critiche, per garantire l'interscambio e la comunicazione di beni, mezzi e risorse in genere.

Negli ultimi anni sono stati sviluppati alcuni filoni di ricerca in relazione al controllo della vulnerabilità delle infrastrutture stradali, specialmente riguardo agli eventi sismici ed idrogeologici.

In questo articolo si è studiata una metodologia per la valutazione del rischio idraulico in caso di eventi di pioggia particolarmente intensi, connesso al funzionamento degli organi di captazione delle acque superficiali posti a corredo delle opere stradali.

Poiché l'esame di un'infrastruttura stradale comporta un numero estremamente grande di variabili da controllare, è stata adottata una trattazione di tipo sistemico in modo da valutare con più precisione e con maggiore speditezza eventuali punti critici.

Considerato, come già detto, che nel caso stradale il numero di sottobacini e di opere idrauliche è notevole, anche per strade di sviluppo sufficientemente limitato, si porrebbe ad un sistema complesso caratterizzato da una molteplicità di variabili e componenti da gestire. Al fine di ovviare a tale problema, si propone una procedura facente capo a studi in settori vicini alla ricerca operativa, che consente di quantificare l'importanza dei componenti coinvolti nell'analisi e, pertanto, un monitoraggio più rapido dell'infrastruttura per la gestione ed il controllo degli eventi temuti.

La procedura, le cui linee guida sono state individuate in una precedente ricerca presentata al XXI Congresso Mondiale AIPCR svoltosi a Kuala Lumpur [1], è stata applicata per l'analisi di una strada provinciale presente nel territorio del comune di Messina che, più volte, ha manifestato condizioni di vulnerabilità idraulica, determinando situazioni di drammatica riduzione della sicurezza della circolazione.

L'applicazione, pur svolta su un breve tratto dell'arteria, ha consentito di evidenziare i vantaggi che si determinano in termini di gestione territoriale per le necessità della protezione civile.

ABSTRACT

The functionality of road net is a target to assure, especially in very critical conditions, the communication of goods and resources.

In the last years, some researches in relation with vulnerability of the roads have

been dealt with, particularly for quake and hydrological events.

In this paper, a method to evaluate hydraulic risk if by chance rain events very intense has been studied, linked to working of the handmade to tap superficial water near roads.

Since the exam of a road infrastructure involve a great number of variable, a systemic treatment has been adopted so that evaluate with more precision and speed eventual critical points.

Because of the number of catchment basins and hydraulic works are very high, also for short roads, authors arrived at a complex system characterised by many variables and components. To avoid the necessity of this problem, a procedure enveloped in some fields near operative research is proposed; this method permit to quantify the importance of components involved into the analysis and, therefore, a monitoring speeder of the road net to manage and control fearful events.

The guidelines of the procedure have been located in a previous paper presented at XXI World Road Congress in Kuala Lumpur [1] and applied to analyse a main road in the municipality of Messina. This road in the past has showed many times some vulnerable hydraulic conditions, determining a dramatic reduction of safety of the circulation.

The application, carried out on a short section of the road, has permitted to highlight the vantage in form of management of the civil protection.

1. POSIZIONE DEL PROBLEMA

I fenomeni di natura idrologica, talvolta, rappresentano delle vere e proprie calamità a causa delle gravi ripercussioni sul territorio. Alla base di tali fenomeni esistono svariate cause che, a prescindere dall'evento climatico, prendono origine da situazioni di squilibrio generate, il più delle volte, da attività umane esercitate non in sintonia con l'assetto territoriale. Ci si riferisce, ad esempio, agli insediamenti in prossimità di corsi d'acqua o allo sfruttamento indiscriminato di materiale lapideo dagli alvei che hanno determinato, nel tempo, mutamenti delle condizioni di deflusso e, quindi, sconvolgimenti nelle funzioni delle opere di regimazione idraulica esistenti [2] [3].

Le infrastrutture di trasporto, in quanto facenti parte della rete dei collegamenti nel territorio, sono direttamente interessate da tali fenomeni che, spesso, ne compromettono seriamente la funzionalità, creando disagi e, a volte, perdite di vite umane.

La ricerca dei fattori di vulnerabilità del complesso sistema che comprende il territorio e la rete dei trasporti, rappresenta un problema che, certamente, non può essere affrontato valutando localmente l'efficienza delle singole opere.

Il ruolo primario che si attribuisce alle reti di trasporto deriva dalla necessità di garantire la funzionalità dei collegamenti e, di conseguenza, di tutte le attività umane connesse alla mobilità di persone e merci nel territorio; ciò assume maggior rilievo se tali attività sono finalizzate ad operazioni di soccorso a seguito di eventi calamitosi.

Per conferire ordine e semplicità a tali studi, in genere molto complessi a causa del numero delle variabili coinvolte, questo articolo affronta il problema in forma sistemica, individuando i componenti vulnerabili ed i parametri da cui sono direttamente influenzati. In particolare, è stata proposta una metodologia che consente di monitorare i manufatti idraulici facenti parte del corpo stradale e di individuarne le condizioni di criticità in termini probabilistici rispetto al funzionamento globale [4].

Lo schema elaborato nella presente memoria è stato sviluppato in forma generale per i componenti che contribuiscono alla protezione idraulica di un piccolo bacino

caratterizzato da una notevole pericolosità ed attraversato dalla strada provinciale “Nuova Panoramica dello Stretto” all’interno del Comune di Messina. Gli aspetti metodologici esposti costituiscono la base di una più ampia ricerca finalizzata ad un monitoraggio dell’intera strada in modo da ricavare utili indicazioni per eventuali interventi preventivi da parte degli enti gestori.

Di seguito e prima di procedere all’illustrazione dell’approccio sistemico proposto, si ritiene utile svolgere qualche breve richiamo sulle problematiche idrauliche per le opere stradali.

2. IL RUOLO DEI DISPOSITIVI IDRAULICI A DIFESA DEL CORPO STRADALE – BREVI RICHIAMI

Le infrastrutture terrestri al servizio del trasporto, quali strade e ferrovie sono generalmente opere aventi un grande sviluppo lineare e, pertanto, intercettano ed attraversano con grande frequenza, torrenti, canali o anche semplici incisioni del terreno. I manufatti interessati, quali le cunette, i fossi si guardia ed i tombini, devono garantire non solo l’attraversamento dell’opera ma anche il mantenimento delle condizioni di continuità idraulica, pena l’instaurarsi di condizioni pericolose per pile di ponti, rilevati, trincee, ecc.

Generalmente si dice che le opere idrauliche a corredo delle strade riguardino problematiche idrauliche minori in quanto interessano portate più piccole, ma possono rappresentare anelli di debolezza per l’infrastruttura stessa ed il territorio su cui insistono [5]. Per quanto concerne le cunette, il moto che si instaura è vario a superficie libera, con portata affluente dalla sede stradale generalmente costante per unità di lunghezza, con un transitorio iniziale, uno stato intermedio stazionario se la durata della pioggia è sufficientemente lunga ed uno finale di esaurimento. Con tali ipotesi l’impegno di calcolo sarebbe sproporzionato ai risultati raggiungibili che, com’è noto, sono affetti da variabili grandemente aleatorie. Per tale ragione, conviene riferirsi a condizioni di moto permanente in cui, cioè, la portata è linearmente crescente nel senso di percorrenza dell’acqua. Con tale ipotesi (figura 1) si possono indicare le seguenti grandezze [6]:

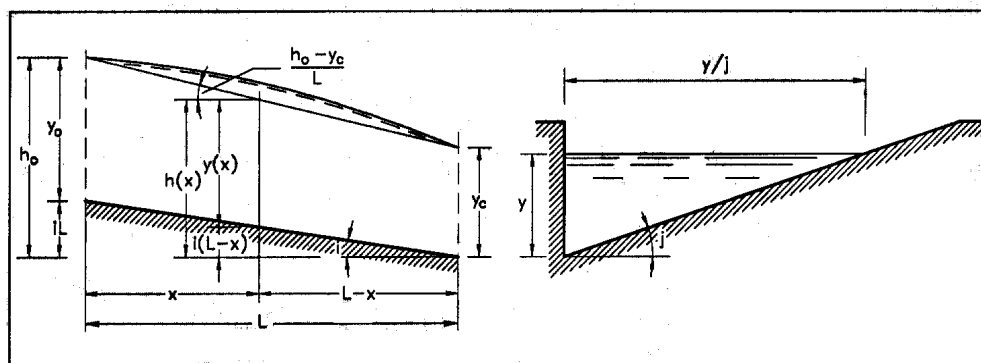


Figura 1 – Variabili interessate nel moto permanente di una cunetta

$$\tau = \gamma \times R_H \times J \quad (2.1)$$

è la tensione tangenziale unitaria media, con x ascissa contata a partire da monte dalla sezione iniziale dell’immissione e J pari a:

$$J = v^2 / (K_s^2 \times R_H^{4/3}) \quad (2.2)$$

dove v è la velocità dell’acqua, K_s è il coefficiente di scabrezza ed R_H è il raggio idraulico. La portata all’ascissa x ed all’ascissa L sarà, rispettivamente:

$$Q = Q(0) + qx \quad (2.3)$$

$$Q(L) = Q(0) + qL \quad (2.4)$$

Secondo le notazioni di figura 1 si ha che la spinta totale S, somma della spinta idrostatica e della quantità di moto ha, notoriamente, l'espressione:

$$S = \gamma \times A \times y_b + \rho \times Q \times v \quad (2.5)$$

L'equazione del moto è, allora:

$$\frac{dS}{dx} = \gamma \times A \times (i - J) \quad (2.6)$$

da integrare assumendo che sia $y=y_0$ per $x=0$, con l'ipotesi che per $x=L$ si realizzi l'altezza critica $y=y_c$. La situazione approssimata $i = \bar{J}$, accettabile per brevi tratti, dove con \bar{J} si indica il valore medio nel tratto, conduce al calcolo della perdita di carico ΔE con l'obiettivo di assegnare al collettore la pendenza $i = \bar{J}$. Un'ulteriore approssimazione si ottiene assumendo che la superficie libera del canale abbia andamento lineare tra $x=0$ ($y=y_0$) ed $x=L$ ($y=y_c$). Pertanto, si può dare alla $y=y(x)$ la seguente espressione:

$$y(x) = y_0 - \frac{y_0 - y_c}{L} \times x \quad (2.7)$$

si può, quindi, procedere al calcolo di $\bar{J} = \Delta E/L$, assumendo la relazione di Chezy per le perdite di carico:

$$J = \frac{Q^2}{\chi^2 \times A^2 \times R_H} \quad (2.8)$$

Il dimensionamento dei fossi di guardia è simile alle cunette, mentre per quanto riguarda i tombini la trattazione si complica leggermente in virtù, soprattutto, di una molteplicità di casi che possono presentarsi. Le caratteristiche del moto dipendono, infatti, principalmente dalla forma dell'imbocco e dello sbocco, dal tipo di sezione, dalla scabrezza, dalla pendenza, dalle condizioni idrometriche di monte e di valle. La letteratura riconduce le situazioni possibili a sei casi principali, in funzione dello stato idrometrico dello sbocco (sommerso o meno), del rapporto tra carico H^* (contenuto energetico di riferimento) ed il carico E esistente all'imbocco e delle caratteristiche del deflusso all'interno del tombino. In genere l'imbocco e la sua forma si caratterizzano tramite due parametri r/D e w/D , essendo r il raggio di curvatura del raccordo e w l'altezza dello smusso, mentre il tombino può essere classificato per mezzo del rapporto tra la lunghezza ed il suo diametro L/D .

Solitamente, il caso del tombino completamente in pressione è quello più cautelativo. Il dislivello Δh tra il carico di monte e di valle, trascurando a favore di sicurezza la velocità nel canale all'imbocco ed allo sbocco, è fornito dalla nota formulazione:

$$\Delta h = k_i \times \frac{v^2}{2 \times g} + \frac{2 \times g \times L}{k_s^2 \times R_H^{4/3}} \times \frac{v^2}{2 \times g} + k_s \times \frac{v^2}{2 \times g} \quad (2.9)$$

dove k_i e k_s rappresentano i coefficienti di imbocco e sbocco. Posto:

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2 \times g \times L}{K_s^2 \times R_H^{4/3}} + k_i + k_s \quad (2.10)$$

si può ricavare la portata dalla formula seguente:

$$Q = C \times A \times \sqrt{2 \times g \times \Delta h} \quad (2.11)$$

3. APPROCCIO SISTEMICO E MISURE DI IMPORTANZA DEI COMPONENTI

Alla luce di quanto già esposto, le opere idrauliche a difesa del corpo stradale possono essere rappresentate come un sistema di componenti collegati fra loro; è così possibile:

- misurare l'affidabilità delle singole parti e dell'intero organismo;
- controllare ed, eventualmente, migliorare con interventi di manutenzione le prestazioni nel tempo.

Si comprende che la qualità iniziale dei costituenti e la loro posizione abbiano una ripercussione diretta sull'affidabilità totale.

La rappresentazione può servirsi di configurazioni in serie dei componenti o in parallelo o, ancora, misti [4] per cui, in teoria, è possibile riprodurre contesti di qualunque complessità [1], così come sarà possibile vedere dalle figure 3, 7 e 8.

Indicando con la seguente notazione:

x_i = l'unità i-esima funzionante

\bar{x}_i = l'unità i-esima guasta

$P(x_i)$ = la probabilità che l'unità i-esima sia funzionante

$P(\bar{x}_i)$ = la probabilità che l'unità i-esima sia guasta

R = l'affidabilità del sistema

P_f = l'inaffidabilità del sistema

Nel caso di componenti connessi tutti in serie, perché il sistema sia affidabile, questi devono essere funzionanti. L'algoritmo che valuta la R è il seguente:

$$R = P(x_1) \times P(x_2/x_1) \times (P(x_3/x_1 \times x_2)) \times \dots \times (P(x_n/x_1 \times x_2 \times x_3 \times \dots \times x_{n-1})) \quad (3.1)$$

Quando si può ritenere che i singoli guasti siano indipendenti, la precedente espressione si può, così, semplificare:

$$R = P(x_1) \times P(x_2) \times P(x_3) \times P(x_n) \quad (3.2)$$

o nella forma:

$$R = \prod_{i=1}^n P(x_i) \quad (3.3)$$

Invece, nel caso di configurazione degli elementi in parallelo, il guasto di una o più unità non conduce necessariamente al collasso generale. In altre parole, l'affidabilità, in tale evenienza, è la probabilità che almeno un percorso all'interno della grafo sia operativo e, cioè:

$$R = [P(x_1) + P(x_2) + P(x_3) + P(x_n)] - [P(x_1 \times x_2) + (P(x_1 \times x_3) + \dots + P_{i \neq j}(x_i \times x_j))] + \dots + (-1)^{n-1} \times P(x_1 \times x_2 \times x_3 \times \dots \times x_n) \quad (3.4)$$

Nell'ipotesi in cui gli elementi si possano ritenere indipendenti, si ha:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n P(\bar{x}_i) \quad (3.5)$$

E' buona norma suddividere i sistemi molto complessi in parti più semplici e, quindi, trattarli in forma di rappresentazioni serie o parallelo.

Ad esempio, una configurazione parallelo-serie in cui si hanno m percorsi in parallelo ed n unità connesse in serie e dove con $P(x_{ij})$ si indica l'affidabilità del componente j sul percorso i , si ricava l'affidabilità di quest'ultimo dalla seguente espressione:

$$P_i = \prod_{j=1}^n P(x_{ij}) \quad \text{con } i=1, 2, \dots, m \text{ e } j=1, 2, \dots, n \quad (3.6)$$

L'affidabilità del sistema è data dalla:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^n P(x_{ij}) \right] \quad (3.7)$$

In un sistema serie-parallelo, in cui si hanno n sottosistemi in serie con m unità in parallelo, si avrà invece:

$$R = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - P(x_{ij})) \right] \quad (3.8)$$

3.1 Importanza dei Componenti

Quando si voglia controllare un'opera già realizzata può sorgere il problema di identificare le debolezze dei componenti che sono cruciali al funzionamento globale. Tale accertamento è utile non solo per riconoscere eventuali punti deboli di quanto costruito, ma anche per indirizzare nel modo migliore le spese di manutenzione ed ottenere così la massimizzazione dell'affidabilità in rapporto ai vincoli del problema ed, in particolare, a quello economico.

Negli ultimi anni, con lo sviluppo delle analisi di rischio, si sono affermate molte procedure che aiutano a quantificare tali grandezze e tra le più conosciute vi sono senz'altro quelle che si riconducono agli studi di Birnbaum, di Gandini e di Fussell-Vesely [7]. Va detto, comunque, che quasi tutte le teorie si basano sull'affidabilità del sistema in relazione al funzionamento o meno del componente ispezionato. La misura finale è, pertanto, dedotta da manipolazioni algebriche di queste quantità.

Ad esempio, nel caso in cui vi siano n unità ($N=1, 2, \dots, n$) elementari, si supponga che il sistema possa essere solamente in uno stato di funzionamento, caratterizzato dal valore 0 dell'inaffidabilità, o sia in fase di guasto, uguagliando allora a 1 tale variabile.

Dato che lo stato del sistema dipende solo da quello dei suoi componenti, si indichi con $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ il vettore di variabili aleatorie che rappresenta lo stato dei componenti ad un dato istante t. Se con $\Phi(x)$ si designa la Funzione Struttura del sistema in termini aleatori, cioè la funzione che rappresenta il funzionamento del sistema in base alla configurazione dei componenti, si può affermare che quando $\Phi(x)=0$ il sistema funziona regolarmente, mentre quando $\Phi(x)=1$ si ha uno stato di guasto. Dato che $P[\Phi(x)=1] = E[\Phi(x)]$ ed assumendo che le X_i siano variabili indipendenti, con $P[X_i=1] = q_i$, si avrà che $E[\Phi(x)]$ è una funzione del vettore $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$. Se $G(q) = E[\Phi(x)]$, allora $G(q)$ è chiamata la Funzione di Inaffidabilità del sistema ed è utilizzata per la valutazione dell'importanza degli elementi. Nel seguito si forniranno alcuni dettagli sulle teorie proposte dagli autori prima menzionati.

3.1.1 Misura di Importanza di Birnbaum

L'importanza $I_B^i(t)$ del componente i in termini di affidabilità è la probabilità che l'i-esimo componente sia critico al funzionamento del sistema al tempo t. L'espressione rappresentativa assume la seguente forma:

$$I_B^i(t) = \frac{\partial G(q(t))}{\partial q_i(t)} = G(1_i, q(t)) - G(0_i, q(t)) \quad (3.1.1.1)$$

oppure:

$$I_B^i(t) \equiv \Delta G_i(t) \quad (3.1.1.2)$$

in cui la simbologia indica che:

- $G(1_i, q(t))$ è l'inaffidabilità del sistema quando il componente i è guasto;
- $G(0_i, q(t))$ è l'inaffidabilità del sistema quando il componente i è funzionante.

Secondo altri autori (Henley e Kumamoto) il coefficiente di importanza si può esprimere nel seguente modo:

$$I_B^i(t) = E[\Phi(1_i, X(t)) - \Phi(0_i, X(t))] \\ = 1 \times P[\Phi(1_i, X(t)) - \Phi(0_i, X(t)) = 1] + 0 \times P[\Phi(1_i, X(t)) - \Phi(0_i, X(t)) = 0] \quad (3.1.1.3)$$

che si può scrivere anche nella forma:

$$I_B^i(t) = P[\Phi(1_i, X(t)) - \Phi(0_i, X(t)) = 1] \quad (3.1.1.4)$$

3.1.2 Importanza Critica di Gandini

Tale misura corrisponde alla probabilità condizionale che il sistema sia guasto al tempo t , posto che il componente critico i sia guasto. La quantificazione avviene attraverso la seguente espressione:

$$I_{CR}^i(t) = \frac{\partial G(q(t))}{\partial q_i(t)} \times \frac{q_i(t)}{G(q(t))} \quad (3.1.2.1)$$

che può essere riscritta nel modo seguente:

$$I_{CR}^i(t) = \frac{[G(1_i, q(t)) - G(0_i, q(t))] \times q_i(t)}{G(q(t))} \quad (3.1.2.2)$$

3.1.3 Importanza di Fussell-Vesely

La misura proposta da Fussell-Vesely del componente i suggerisce considerazioni sulla probabilità che la vita del sistema coincida con il guasto di un Cut Set contenente il componente i . Si può esprimere tramite la:

$$I_{FV}^i(t) = \frac{G_i(q(t))}{G(q(t))} \quad (3.1.3.1)$$

dove $G_i(q(t))$ è la probabilità del componente i di contribuire al guasto del Cut Set.

Un Cut Set è un insieme di componenti che interrompono la connessione tra i terminali di inizio e fine del sistema quando sono rimossi dal diagramma a blocchi. Il Minimal Cut Set è l'insieme del numero minimo di componenti che quando sono guasti provocano il danneggiamento del sistema, intendendo con ciò che se uno di questi elementi continua a funzionare il sistema lo farà anche.

4. ANALISI DI UN CASO REALE

Il caso esaminato si riferisce ad una strada provinciale, chiamata "Nuova Panoramica dello Stretto" posta all'interno del Comune di Messina che si sviluppa per circa 11 km a mezzacosta su un sito di grande pregio ambientale, pur se caratterizzato da terreni con potenziale pericolo di erosione superficiale; tale arteria è stata costruita da circa un trentennio con lo scopo di decongestionare la vecchia SS 113, posta ai margini della linea di costa ed ormai al collasso a causa del notevole incremento del volume di traffico, dovuto essenzialmente ad una costante espansione verso la zona nord del tessuto urbano messinese (Figura 2a).



Figura 2a – Vista aerea della strada provinciale Nuova Panoramica dello Stretto

Figura 2b - Particolare del tronco trattato

Tale sviluppo, però, non è stato accompagnato nel tempo da un adeguamento delle caratteristiche geometriche, funzionali e strutturali dell'asse viario. Le conseguenze di ciò sono testimoniate dai dati riportati negli archivi del Comando dei Vigili Urbani, dove è stato possibile appurare che:

- Gli incidenti totali nel periodo 01.09.1996 al 31.12.1999 sono 107.
- Gli incidenti in presenza di pioggia rappresentano il 15% del totale.
- Gli incidenti con lesioni costituiscono il 75%.

Le aliquote eccessivamente alte indicano che, in condizioni meteo avverse, vi è un brusco decadimento della sicurezza che ha condotto gli autori a verificare l'efficienza idraulica degli organi preposti allo smaltimento delle acque che provengono sia dalla pavimentazione che dal bacino di competenza.

Anche allo scopo di illustrare in forma sintetica la procedura, in questa sede si è scelto di applicarla ad un percorso sufficientemente breve della Strada Provinciale individuato tra quelli più critici dell'intera arteria (Figura 2b). Le caratteristiche geometrico-costruttive possono essere così definite:

- La tratta in esame fa parte di un tronco omogeneo per tipologia di sezione e caratteristiche costruttive che va dal torrente Contemplazione al torrente S. Agata, coprendo uno sviluppo di circa 5 km.
- La sezione trasversale è costituita da due carreggiate complanari, tranne nella parte terminale, dove vengono sfalsate per una lunghezza di circa 300 m.
- La sezione lato monte, con verso di percorrenza nord-sud, è costituita da tre corsie da 3.00 m ciascuna, mentre quella di valle, con verso sud-nord, ha solo due corsie da 3.00 m.
- Sono presenti due marciapiedi da 1.40 m ciascuno posti all'estremità della sezione, di cui quello lato mare è provvisto di barriera di sicurezza.
- Lo spartitraffico di larghezza compresa tra 2.50 m e 4.00 m, è piantumato ma non vi è alcun dispositivo di ritenuta.

- Non vi sono fossi di guardia a protezione delle scarpate e dei muri, a loro volta sprovvisti di drenaggi, né tombini, mentre le cunette sono di sezione insufficiente e le caditoie sono in pessimo stato di manutenzione.
- La carreggiata a monte presenta le maggiori insidie, in quanto le maggiori dimensioni della piattaforma stradale, la separazione con il senso di marcia opposto e la geometria consentono agli utenti il mantenimento di una velocità operativa molto alta.

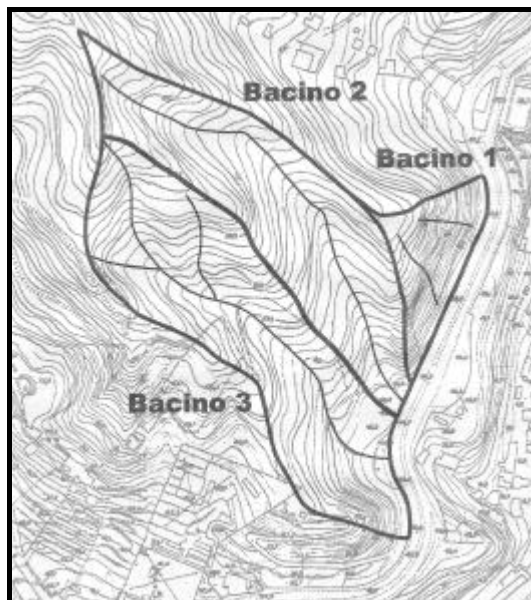


Figura 3 – Bacino in studio e suddivisione di questo in sottobacini

Il bacino scelto (Figura 3), compreso tra i principali di Grotta e di Pace, verificato nelle condizioni attuali, ha denunciato, com'era prevedibile, condizioni di elevata inaffidabilità. Pertanto, la metodologia proposta è stata applicata ad un ipotetico progetto di adeguamento che prevede l'inserimento di un tombino nell'impluvio principale, la costruzione di fossi di guardia a protezione del muro e l'efficienza delle cunette, il cui dimensionamento, pure effettuato, non può essere illustrato in questo articolo per ovvie considerazioni di spazio disponibile.

I dati sull'orografia e sulla morfologia del terreno sono stati desunti da cartografie opportunamente digitalizzate e rese in forma numerica, mentre le caratteristiche delle opere idrauliche e della strada sono state oggetto di un più dettagliato rilievo topografico mediante una stazione totale. La superficie molto contenuta del bacino in studio ricade interamente sotto il controllo di una sola stazione pluviografica, quella di Ganzirri, così come è stato possibile verificare mediante il metodo dei topoi. Da questa sono stati reperiti i dati relativi agli anni che vanno dal 1964 al 1996 per durate di pioggia di 1, 3, 6, 12 e 24 ore. Una volta determinato il tempo di corrivazione mediante il metodo di Viparelli, la portata è stata calcolata con la formula razionale, anche perché quelle empiriche regionali si applicano su bacini di estensione di gran lunga maggiore e, pertanto, possono dar luogo ad errori macroscopici. Per schematizzare nel migliore dei modi il funzionamento delle opere idrauliche, il bacino è stato ulteriormente suddiviso in tre sottobacini, aventi le caratteristiche riportate in figura 3 e in tabella 1.

I dati di pioggia, come detto, sono stati trattati in modo tale da dedurre con il metodo razionale le portate per ognuno dei tre sottobacini indicati. Queste sono state configurate come variabili aleatorie e, pertanto, è stato possibile definire una funzione di densità di

probabilità di tipo Gamma che è risultata la più idonea tra una serie di distribuzioni indagate (Log Normale, Gumbel, ecc.).

	Bacino Totale	Bacino 1	Bacino 2	Bacino 3
Superficie (m ²)	117.000	13.000	45.000	59.000
Dislivello (m)		51	140	145
Lunghezza asta (m)		87	507	490
Pendenza media (%)		58.6%	27.7%	29.6%
Coeff. Deflusso medio		0.4	0.4	0.4
Tempo di corrivazione (ore)		0.05	0.10	0.10

Tabella 1 – Caratteristiche del bacino

Nella tabella 2 si riportano le statistiche principali della funzione di densità, che, com'è noto, è del tipo:

$$fdp = \frac{\alpha \cdot (\alpha \cdot x)^{\gamma-1} \cdot e^{-\alpha \cdot x}}{\Gamma(\gamma)} \quad (4.1)$$

dove α e γ sono coefficienti di forma e la media e la deviazione standard sono ricavate, rispettivamente, dalle:

$$\mu = \frac{\gamma}{\alpha} \quad (4.2)$$

$$dev = \sqrt{\frac{\gamma}{\alpha^2}}$$

	Bacino Totale	Bacino 1	Bacino 2	Bacino 3
Coefficiente α	2.5677	23.541	6.6969	5.1397
Coefficiente γ	4.7261	4.7196	4.7197	4.7209
Media	1.841	0.2	0.705	0.919
Deviazione St	0.847	0.092	0.324	0.423

Tabella 2 – Statistiche principali del bacino

La figura 4 illustra l'andamento delle fdp della portata, dove l'argomento 0 indica che la funzione si riferisce al bacino intero, mentre con 1, 2 e 3 si intende il numero del sottobacino.

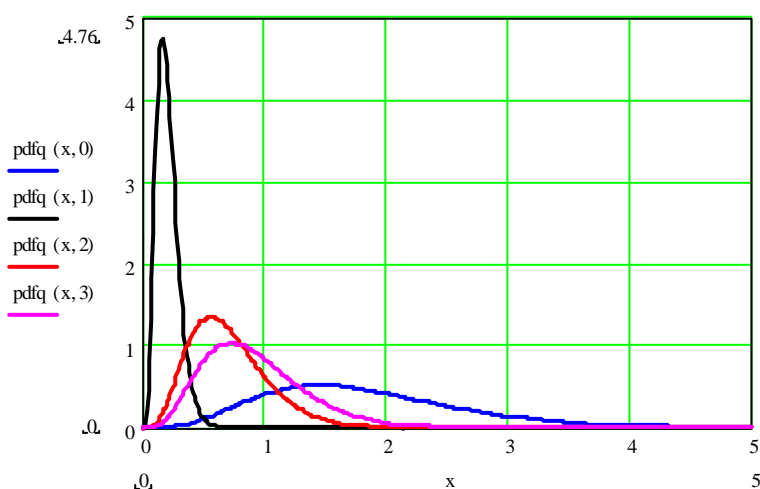


Figura 4 – Funzioni di densità di probabilità delle Portate

Naturalmente è possibile dedurre anche le funzioni di distribuzione e di rischio, di

cui si riportano i grafici in figura 5 e 6.

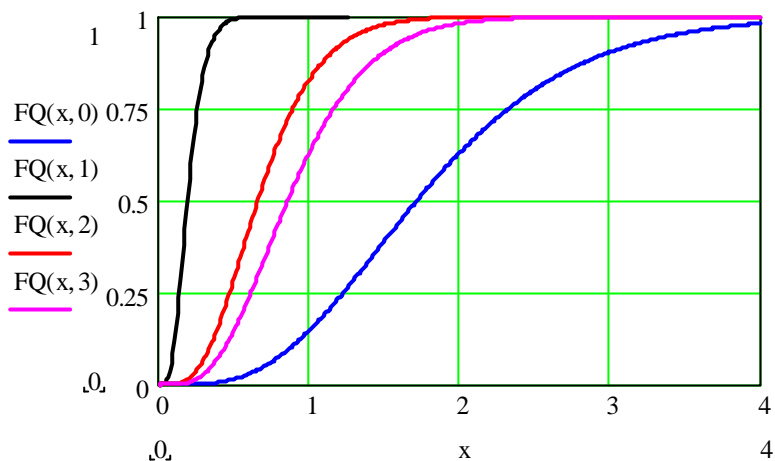


Figura 5 – Funzioni di distribuzione di probabilità delle Portate

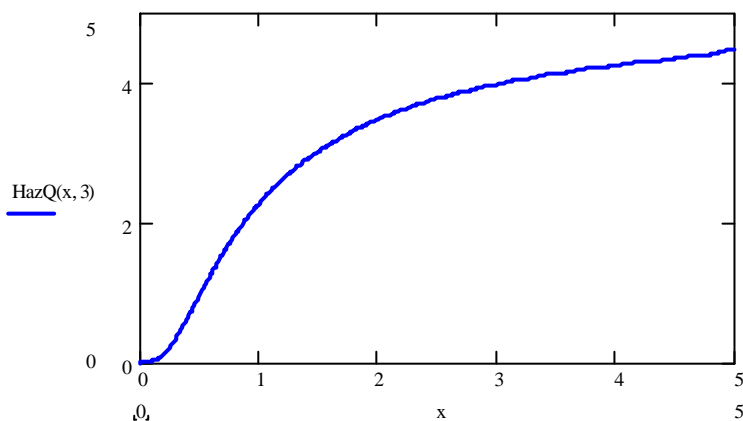


Figura 6 – Funzione di rischio della variabile Portata nell'intero bacino

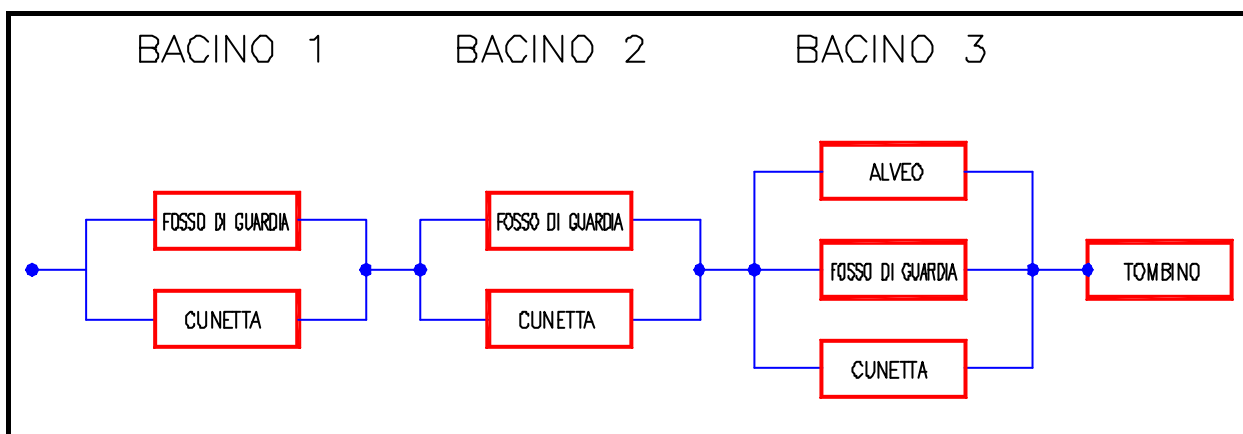


Figura 7 – Schematizzazione in forma sistemica del bacino

Il funzionamento del sistema idraulico-stradale è stato schematizzato secondo la figura 7. In particolare, si è ritenuto di studiare uno scenario già mitigato rispetto a quello attuale, dove, come già accennato, si sono introdotte delle migliorie come l'inserimento di un tombino in corrispondenza dell'impluvio del sottobacino 3 e la messa in opera del fosso di guardia al di sopra del muro di sostegno.

In tale configurazione, con la geometria della strada e degli elementi marginali dedotta dai rilievi, si è potuto ipotizzare con una certa esattezza il moto delle acque superficiali. Per una maggiore precisione delle quantificazioni successive si sono suddivisi il fosso di guardia al di sopra del muro e la cunetta in tre parti, in relazione al bacino sotteso. In particolare, il funzionamento avverrà secondo la seguente logica e in base allo schema riportato in figura 8:

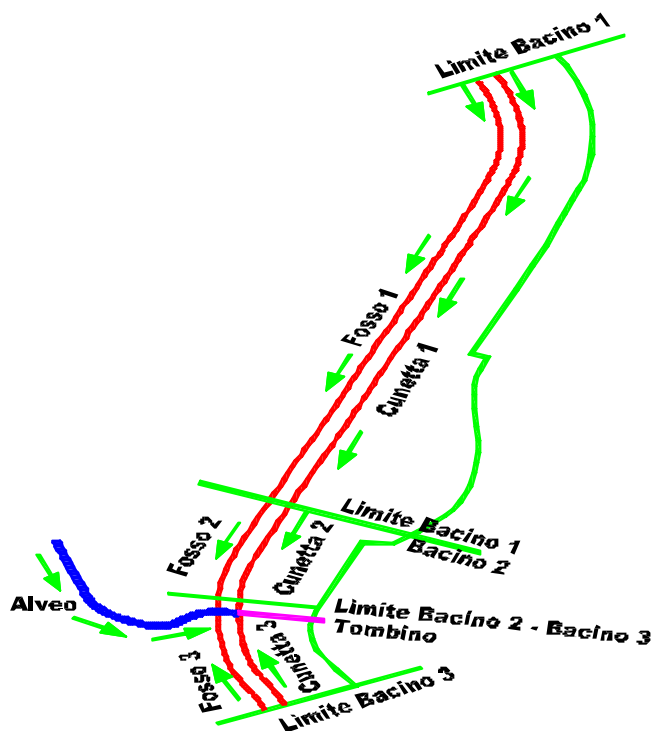


Figura 8 – Schema di funzionamento idraulico

- L'acqua proveniente dal sottobacino 1 viene raccolta dal fosso denominato 1.
- L'acqua proveniente dalla pavimentazione sottesa dal sottobacino 1, viene raccolta dalla cunetta denominata 1.
- L'acqua proveniente dal sottobacino 2 viene raccolta dal fosso denominato 2, sul quale scorre anche la portata proveniente dal fosso 1.
- L'acqua proveniente dalla pavimentazione sottesa dal sottobacino 2 viene raccolta dalla cunetta denominata 2, sulla quale scorre anche la portata proveniente dalla cunetta 1.
- L'acqua proveniente dal sottobacino 3 in piccola parte viene raccolta dal fosso 3, sul quale scorre anche la portata proveniente dal fosso 1 e 2, ma in maggior misura viene raccolta nell'alveo che defluirà direttamente nel tombino di nuova costruzione.
- L'acqua proveniente dalla pavimentazione sottesa dal sottobacino 3 viene raccolta dalla cunetta denominata 3, sulla quale scorre anche la portata proveniente dalla cunetta 1 e 2.
- Il tombino raccoglierà le acque convogliate dal fosso di guardia, dalla cunetta e dall'alveo del sottobacino 3. Data l'esiguità delle portate interessate non si ritiene opportuno incanalare anche le acque provenienti dalle incisioni presenti sui sottobacini 1 e 2 che, invece, verranno raccolte dai fossi di guardia.

- La particolare disposizione dei componenti suddetti in serie o parallelo dipende dall'eventualità che comporta il mancato convogliamento della portata attraverso la sezione: ad esempio, si suppone che un'eventuale esondazione dal fosso di guardia posto a coronamento del muro possa essere mitigato dalla sottostante cunetta. Pertanto, questi due elementi possono essere messi in parallelo tra loro. La disposizione in serie, al contrario, comporterà il "guasto" del sottosistema quando uno dei componenti entrerà in crisi.

Per quantificare l'importanza dei componenti, è stato necessario conferire un'affidabilità ad ognuno di essi. Ciò è stato possibile in quanto è stata calcolata in modo deterministico la portata convogliabile in moto permanente da ognuno degli organi idraulici ed è stata confrontata con la funzione di densità di probabilità della portata effettivamente affluente in quell'elemento. Pertanto, si tratta di un calcolo semiprobabilistico, ma che consente di determinare il grado di affidabilità per ognuno di essi.

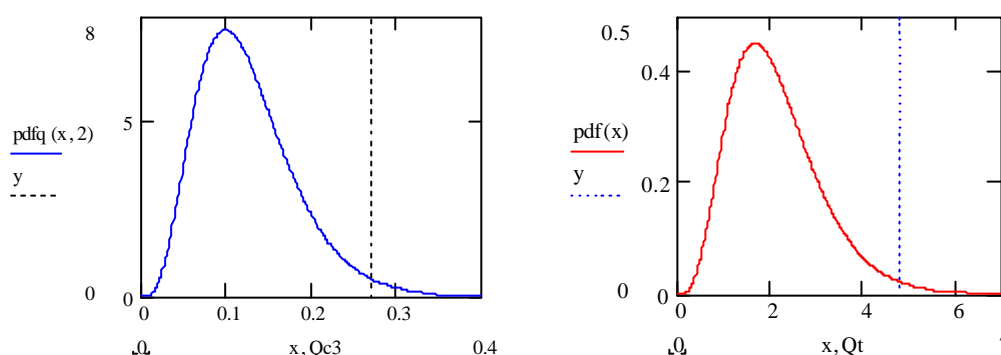


Figura 9 – Valutazione dell'affidabilità della portata per la cunetta e per il tombino

I grafici di figura 9 illustrano alcune delle verifiche effettuate nei riguardi della cunetta e del tombino. La tabella 3 raccoglie tutte le verifiche affidabilistiche i cui valori saranno utilizzati nella fase successiva della valutazione dell'importanza di ognuno dei componenti.

NOME	Fosso 1	Fosso 2	Fosso 3	Cunetta 1	Cunetta 2	Cunetta 3	Alveo	Tombino
N°	1	2	3	4	5	6	7	8
R	1	0.558	0.540	0.834	0.800	0.406	1	0.985

Tabella 3 – Affidabilità R dei componenti del sistema

A questo punto è possibile applicare le procedure per la determinazione dei coefficienti di importanza. Per il sistema proposto, la Funzione Struttura, direttamente legata alla particolare disposizione dei costituenti, è la seguente:

$$\text{FunStr} = [1 - (1 - q_{f1} \times q_{c1}) \times (1 - q_{f2} \times q_{c2}) \times (1 - q_{f3} \times q_{c3} \times q_a) \times (1 - q_t)] \quad (4.3)$$

dove si è indicato con:

$q_{f1} = (1 - R_{f1})$ l'inaffidabilità del componente 1 – fosso di guardia relativo al bacino 1

$q_{f2} = (1 - R_{f2})$ l'inaffidabilità del componente 2 – fosso di guardia relativo al bacino 2

$q_{f3} = (1 - R_{f3})$ l'inaffidabilità del componente 3 – fosso di guardia relativo al bacino 3

$q_{c1} = (1 - R_{c1})$ l'inaffidabilità del componente 4 – cunetta relativa al bacino 1

$q_{c2} = (1 - R_{c2})$ l'inaffidabilità del componente 5 – cunetta relativa al bacino 2

$q_{c3} = (1 - R_{c3})$ l'inaffidabilità del componente 6 – cunetta relativa al bacino 3

$q_a = (1 - R_a)$ l'inaffidabilità del componente 7 – alveo relativo al bacino 3

$q_t = (1 - R_t)$ l'inaffidabilità del componente 8 – tombino

Si riporterà a titolo di esempio e, soprattutto, per motivi di brevità, solo qualcuno dei numerosi calcoli svolti anche se, per ognuno dei tre metodi applicati si forniranno i risultati finali.

4.1 Metodo di Birnbaum

Valutazione dell'importanza del componente 5 – Cunetta relativa al bacino 2:

Supponendo il componente 5 in stato di collasso, si avrà che la sua inaffidabilità sarà pari a 1: $q_{c2} = 1$. Pertanto la funzione struttura assumerà il valore $FunStr = 0.453$. Nell'ipotesi in cui il componente 5 risulti pienamente efficace e, cioè, $q_{c2} = 0$ si avrà che la $FunStr = 0.02$. Il coefficiente di importanza di Birnbaum IB_5 sarà allora pari a 0.433.

La tabella 4 riassume le quantificazioni svolte con tutti gli altri elementi con tale metodologia.

Componente	1	2	3	4	5	6	7	8
IB	0.148	0.196	0	0	0.433	0	0.244	0.912

Tabella 4 – Coefficienti di Importanza secondo Birnbaum

4.2 Metodo di Gandini

Valutazione dell'importanza del componente 5 – Cunetta relativa al bacino 2:

Supponendo il componente 5 in stato di collasso, si avrà che la sua inaffidabilità sarà pari a 1: $q_{c2} = 1$. Pertanto la funzione struttura assumerà il valore $FunStr = 0.453$. Nell'ipotesi in cui il componente 5 risulti pienamente efficace e, cioè, $q_{c2} = 0$ si avrà che la $FunStr = 0.02$. Il coefficiente di importanza di Gandini IG_5 sarà allora pari a:

$$IG_5 = \frac{(FunStr_1 - FunStr_0) \times q_{c2}}{FunStr} = 0.812 \quad (4.2.1)$$

Componente	1	2	3	4	5	6	7	8
IG	0	0.812	0	0	0.812	0	0	0.171

Tabella 5 – Coefficienti di Importanza secondo Gandini

4.3 Metodo di Fussell-Vesely

Come detto in precedenza, tale misura di importanza riferita ad un componente i fornisce indicazioni sulla possibilità che la vita del sistema coincida con il guasto di un Cut Set contenente il componente i. Pertanto non si applica a componenti singoli ma ad insiemi di componenti che potrebbero causare il guasto dell'intero sistema. In quello in esame sono stati individuati i seguenti Cut Set:

1. Contiene il Fosso di guardia e la Cunetta relativi al bacino 1
2. Contiene il Fosso di guardia e la Cunetta relativi al bacino 2
3. Contiene il Fosso di guardia, la Cunetta e l'Alveo relativi al bacino 3
4. Contiene il Tombino

Ad esempio, nel caso del Cut Set 2, si ha che la probabilità del componente 3 e 4 di contribuire al guasto del sistema è dato dalla $FV_2 = q_{f2} \times q_{c2}$. La misura di importanza dei due componenti secondo Fussell-Vesely è, allora $IFV_2 = FV_2 / FunStr = 0.064$.

I risultati globali possono essere valutati attraverso l'esame della tabella 6.

Cut Set	1	2	3	4
IFV	0	0.829	0	0.188

Tabella 6 – Coefficienti di Importanza secondo Fussell-Vesely

5. COMMENTO AI RISULTATI OTTENUTI

Lo studio dei coefficienti di importanza assume significato in sistemi con un gran numero di elementi. Infatti, anche se l'applicazione è stata svolta su un bacino molto piccolo, sia per speditezza di trattazione sia in quanto rappresenta un tronco molto critico della strada provinciale, l'individuazione di anelli deboli risulta particolarmente utile quando la complessità delle opere potrebbe fuorviare l'attenzione del manutentore. Infatti si può notare che i coefficienti di importanza anche se strettamente dipendenti dall'affidabilità dei singoli elementi, tuttavia forniscono un'indicazione della criticità del componente così come inserito all'interno di quel particolare sistema.

Per tale ragione, si spiega ad esempio la differente importanza che assumono i fossi di guardia relativi ai bacini 2 e 3, pur avendo un'affidabilità molto simile. Infatti, nel caso del bacino 3 la criticità decade del tutto per la particolare disposizione del fosso di guardia che raccoglie una minima portata, in quanto la maggiore aliquota di quella proveniente dal bacino è trasportata lungo l'alveo e da questa smaltita attraverso il tombino.

Molto interessante anche la situazione che emerge dalla quantificazione dell'elemento 5 e, cioè, la cunetta relativa al sottobacino 2. Teoricamente questa ha un'affidabilità simile alla cunetta relativa al tratto 1. Ma data la disposizione in parallelo con i fossi di guardia, ecco che l'importanza del componente 5 diventa più grande proprio perchè l'affidabilità del fosso di guardia che sottende il bacino 2 è minore rispetto a quello che raccoglie le acque dal sottobacino 1. Pertanto, un'intepretazione miope del dato di affidabilità condurrebbe ad una sottostima dell'importanza della cunetta in quel tratto.

Per le stesse ragioni, per quanto abbia di per sé un'altissima affidabilità, il tombino rappresenta l'anello finale del sistema idraulico-stradale esaminato e, pertanto, ha un elevato grado di importanza, anche se con la valutazione di Gandini questa viene un po' a decadere. Infatti, con tale metodologia si quantifica una dipendenza più stretta dall'affidabilità del componente esaminato rispetto ai valori dedotti con Birnbaum e ciò si traduce in un risultato finale inferiore. Vale, comunque, quanto detto per la procedura di Birnbaum in merito alla disposizione degli elementi all'interno del sistema.

La determinazione con Fussell-Vesely, invece conferisce alla configurazione sistemica un'importanza prioritaria e, forse, eccessivamente rigida per un'applicazione prettamente stradale. Infatti, con tale metodo si privilegia una disposizione degli elementi in parallelo e, cioè, si attribuisce al sistema una certa capacità di ridondanza degli elementi impegnati, mentre le unità in serie si ritengono, peraltro a ragione, strettamente legate all'affidabilità singola. Per tale motivo si spiega un'importanza praticamente nulla del sottobacino 1 e 3, in quanto vengono coinvolti elementi ad affidabilità massima, mentre sono da sottoporre a valutazioni più attente gli elementi del bacino 2 e, per quanto detto in precedenza, del tombino.

Da quanto sopra, si deduce che il tombino, pur se progettato correttamente, rappresenta l'elemento da monitorare con più attenzione in quanto risente delle eventuali criticità delle altre opere idrauliche. A questo punto, se si vuole limitare la pericolosità dell'insieme, conviene non tanto migliorare la capacità convogliabile del tombino (ad esempio migliorando le condizioni di imbocco e sbocco), ma agire direttamente sulle unità meno affidabili.

6. CONCLUSIONI

La conoscenza della probabilità di crisi dei componenti e della loro importanza

all'interno del sistema è essenziale per la valutazione del rischio una volta acquisite le informazioni relativamente alla funzionalità del ramo stradale rispetto alla rete di appartenenza ed alle eventuali ripercussioni nel territorio circostante.

La metodologia fin qui esposta consente di mettere a punto una procedura estremamente flessibile che, rispetto agli approcci tradizionali per lo studio della vulnerabilità, manifesta i seguenti vantaggi:

1. Possibilità di trattare i vari elementi sia singolarmente che in dipendenza tra loro con metodi strettamente analitici, avendo schematizzato la rete stradale e le opere di corredo in forma sistemica.

2. Possibilità di variare il livello di dettaglio in funzione della motivazione delle indagini e delle risorse a disposizione.

3. Possibilità di indagare differenti configurazioni che possono aiutare il manutentore non solo verso il ripristino della funzionalità degli elementi indagati ma anche nei confronti di un'eventuale riprogettazione del sistema di convogliamento delle acque superficiali.

A fronte di un lavoro impegnativo nella prima fase di predisposizione della metodologia, il successivo controllo avviene con un dispendio di risorse minimo e che consiste soltanto nel tenere aggiornato lo stato dei luoghi e, conseguentemente, delle variabili interessate dall'analisi, in tempo reale, cosa, peraltro, facilitata da mezzi di ispezione satellitare e software di tipo GIS.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] Bosurgi, G., D'Andrea, A., Pellegrino, O. *"Vulnerability Of Road Networks Following Severe Hydrogeological Events"*. PIARC XXI World Road Congress – Kuala Lumpur, 1999.

[2] Benedini, M., Gisotti, G., *"Il Dissesto Idrogeologico"* - NIS

[3] Maione, U., Brath, A., *"Moderni Criteri di Sistemazione degli Alvei Fluviali"* – Editrice Bios.

[4] Rao, S.S., *"Reliability Based Design"* Mc Graw-Hill 1992

[5] Da Deppo, L., Datei, C., *"Le Opere Idrauliche nelle Costruzioni Stradali"* – Editrice Bios.

[6] Chow V. T., *"Open Channel Hydraulics"* – McGraw-Hill, 1959

[7] Elsayed E., *"Reliability Engineering"* – McGraw-Hill