

Mauro Cadei, Joseph B. Comerford, Marco Lazzari, Paolo Salvaneschi (1993). "Modelli qualitativi nello sviluppo di sistemi di supporto alle decisioni per la gestione della sicurezza delle dighe", *Atti della giornata di lavoro dell'AI*IA sul ragionamento qualitativo (QUA 93)*, Milano, 10-11 giugno 1993

Modelli qualitativi nello sviluppo di sistemi di supporto alle decisioni per la gestione della sicurezza delle dighe

*Mauro Cadei, Joseph B. Comerford, Marco Lazzari,
Paolo Salvaneschi*

ISMES

viale Giulio Cesare, 29

24124 Bergamo

tel.: 035 307333

Sommario

La gestione della sicurezza delle dighe è compito importante a causa della rilevanza delle possibili conseguenze di malfunzionamenti o cedimenti delle strutture gestite e difficile per la complessità dei problemi che si devono affrontare.

L'intelligenza artificiale può contribuire alla gestione della sicurezza strutturale fornendo nuovi metodi e approcci di modellazione dei sistemi fisici.

In questa nota si presenta un progetto - DAMSAFE - che ha condotto allo sviluppo e al rilascio di sistemi di supporto alle decisioni nel campo della gestione della sicurezza delle dighe. Nell'ambito del progetto DAMSAFE si è fatto uso di modelli causali qualitativi, strutture di rappresentazione gerarchiche orientate agli oggetti e altre forme di rappresentazione integrate in un ambiente per la valutazione dei dati provenienti dal monitoraggio e dalle ispezioni di grandi dighe.

1. INTRODUZIONE

Questa nota deriva da un progetto in corso di sviluppo all'ISMES e finanziato dall'ENEL/DSR/CRIS (Centro Ricerche Idrauliche e Strutturali), il cui obiettivo è l'applicazione di tecniche di intelligenza artificiale nella gestione della sicurezza delle dighe.

Per raggiungere l'obiettivo è stato necessario sviluppare un quadro di riferimento concettuale all'interno del quale potessero essere inserite tecniche di intelligenza artificiale. L'approccio alla gestione della sicurezza adottato in questo progetto è fondato sull'interpretazione della sicurezza come un processo di gestione continua dalla fase di progetto a quella di esercizio; in questa visione essa è una procedura di gestione della qualità (per una discussione dettagliata di questa posizione si vedano Comerford & Blockley, 1992 e Comerford, Salvaneschi et al., 1992).

L'intelligenza artificiale può contribuire alla gestione della sicurezza strutturale fornendo nuovi metodi e approcci di modellazione dei sistemi fisici, quali per esempio i modelli della fisica qualitativa, che possono essere integrati con modelli ingegneristici tradizionali per descrivere sistemi fisici a diversi livelli di dettaglio e da diversi punti di vista (Comerford & Stone, 1992; Garrett, 1990). Conoscenze provenienti da fonti diverse - quali teoria, regolamenti ed esperienza - possono essere integrate e usate per interpretare dati qualitativi e quantitativi di interesse ai fini della valutazione della sicurezza (Comerford, Lazzari et al., 1992). Gli ambienti basati su tecniche di intelligenza artificiale mettono a disposizione meccanismi di comunicazione fra utente, modelli e agenti di ragionamento che contribuiscono a costituire sistemi cooperativi uomo/macchina.

L'approccio alla gestione della sicurezza adottato e l'impiego di tecniche di intelligenza artificiale hanno condotto al progetto e all'implementazione di un sistema basato su conoscenza - DAMSAFE - che usa modelli causali qualitativi, strutture di rappresentazione gerarchiche orientate agli oggetti e altre forme di rappresentazione integrate in un ambiente per la valutazione dei dati provenienti dal monitoraggio e dalle ispezioni di grandi dighe.

Il sistema può essere utilizzato in diversi modi: per la gestione in linea di segnalazioni provenienti da sistemi di monitoraggio automatici, per l'interpretazione di dati fuori linea, per il supporto alle decisioni circa l'allocazione di risorse in programmi di incremento della sicurezza, per l'addestramento del personale destinato alla gestione della sicurezza.

2. IL CONTESTO

La gestione della sicurezza delle dighe è compito importante a causa della rilevanza delle possibili conseguenze di malfunzionamenti o cedimenti delle strutture gestite e difficile per la complessità dei problemi che si devono affrontare.

La prevenzione di cedimenti delle strutture e la mitigazione degli effetti di disastri naturali sono rese possibili dalla disponibilità di dati sulle opere da controllare e dalla valutazione di questi dati allo scopo di stabilirne il significato in termini di stato delle dighe e del loro ambiente.

Per una certa diga è possibile disporre di dati provenienti da sistemi di monitoraggio automatici, da misurazioni manuali, da ispezioni visive condotte da esperti, da esami di laboratorio su campioni prelevati durante campagne di indagini, da prove svolte *in situ*.

Nell'ambito della gestione della sicurezza, ha grande rilievo l'attività di interpretazione dei dati di monitoraggio.

Per raccogliere i parametri utili all'identificazione dello stato di una diga viene installata sull'opera (corpo diga e fondazione) e nell'ambiente circostante una rete strumentale, che permette di acquisire grandezze quali il livello dell'invaso, gli spostamenti del corpo diga e della fondazione, le infiltrazioni d'acqua all'interno della diga.

I valori misurati dagli strumenti possono essere rilevati manualmente dal personale di guardia o acquisiti da un sistema di monitoraggio automatico; in entrambi i casi vengono inseriti in banche dati per consentire la successiva analisi e interpretazione del comportamento dell'opera nel tempo (controllo *fuori linea*). Quando sono presenti sistemi automatici di monitoraggio è possibile effettuare il controllo delle misure durante l'acquisizione per validarle ed eventualmente emettere una segnalazione se le misure non soddisfano i valori di riferimento relativi al comportamento atteso (controllo *in linea*).

3. IL PROBLEMA

Le procedure di valutazione della sicurezza delle dighe sono di norma attuate da esperti che esaminano diagrammi di serie temporali memorizzate in banche dati, resoconti di ispezioni visive, disegni di progetto ed esami di laboratorio.

La valutazione richiede spesso competenze distribuite fra più esperti (ingegneri civili, ingegneri idraulici, geologi, sismologi, ...), competenze teoriche ed empiriche, informazioni quantitative e qualitative.

Procedure automatizzate sono messe a disposizione dai sistemi di monitoraggio. Quelli correntemente in uso eseguono di norma tre tipi di controlli sul valore acquisito da ciascun sensore (Bonaldi et al., 1988):

1. confrontano la singola misura rispetto a valori di soglia;
2. confrontano la velocità di variazione della misura rispetto a valori di soglia;
3. confrontano la misura reale con quella prevista da un modello di comportamento della diga e verificano che la differenza sia interna a un intervallo prefissato.

Di conseguenza il controllo eseguito è limitato nel tempo (un singolo istante) e nello spazio (un singolo sensore). Perciò, qualunque comportamento che non soddisfi i parametri di controllo, sia esso strutturale, strumentale o accidentale, genera una segnalazione di anomalia. Poiché il personale di sorveglianza della diga non ha, in generale, specifiche competenze nel campo della gestione della sicurezza, anche le situazioni di falso allarme richiedono l'interpretazione di esperti.

4. GESTIONE DELLA SICUREZZA E INTELLIGENZA ARTIFICIALE

I programmi tradizionalmente impiegati in ingegneria si sono dimostrati utili nei casi in cui sia richiesta l'esecuzione procedurale di un algoritmo per l'analisi, la predizione o la simulazione, ma sono spesso inadeguati per la gestione della sicurezza per varie ragioni.

Innanzitutto, i modelli di comportamento dei sistemi usati nei calcoli sono rappresentati implicitamente nel codice; di conseguenza il modello risulta poco facilmente accessibile e modificabile alla luce di nuove conoscenze. In secondo luogo, non vi è esplicita rappresentazione dell'incertezza associata al modello usato nei calcoli. Inoltre, neppure i limiti del modello sono espliciti.

Nella gestione della sicurezza di opere di ingegneria civile è necessario modellare esplicitamente la complessità delle strutture e i modelli devono essere esplorabili per rivelare comportamenti del sistema; l'incertezza associata al modello e i suoi limiti devono essere rappresentati.

Inoltre, deve essere possibile modellare due elementi chiave della valutazione esperta nel campo della sicurezza di opere ingegneristiche:

- *ragionamento gerarchico*: nella valutazione vengono comunemente impiegate rappresentazioni gerarchiche delle strutture da controllare;
- *meccanismi causali*: conoscenze empiriche/associative e teorie del dominio vengono usate per individuare legami causali nei comportamenti delle strutture.

Le tecnologie dell'intelligenza artificiale offrono approcci e metodi adeguati a questo scopo, come, per esempio, la modellazione qualitativa, che può essere integrata con la modellazione ingegneristica convenzionale per generare descrizioni di sistemi a diversi livelli di dettaglio e da diversi punti di vista (Cadei et al., 1992; Comerford & Stone, 1992). Conoscenze provenienti da sorgenti diverse - quali teoria, regolamenti, esperienza pratica - e da settori diversi - quali ingegneria idraulica, strutturale, geotecnica - possono essere integrate e usate per manipolare dati qualitativi e quantitativi di interesse (Cadei et al., 1990).

Nel campo della sicurezza delle dighe esiste qualche esempio di applicazione di sistemi esperti come supporto alla gestione. In particolare si ricordano:

- il Kelly System, un sistema a regole sviluppato dalla Texas Instrument per *catturare* la conoscenza di un esperto ingegnere della Southern California Edison al limite della pensione; il sistema genera allarmi quando i dati in ingresso superano certe soglie, valuta semplici legami fra grandezze rilevate da strumenti adiacenti e mette a disposizione strumenti di rappresentazione grafica delle informazioni (Grime et al., 1988);
- un sistema sviluppato all'Università del Minnesota per supportare le ispezioni visive di una diga; il sistema conosce legami causali fra i possibili processi della diga, identifica il rischio associato alla struttura e genera una spiegazione della situazione e delle proprie deduzioni (Franck & Krauthammer, 1987; Wick & Thompson, 1992).

Nell'ambito del progetto DAMSAFE, che si propone di sviluppare sistemi di supporto alle decisioni nel campo della sicurezza delle dighe, sono state scelte tecnologie dell'intelligenza artificiale. In particolare si è fatto uso di analisi, progetto e programmazione orientati agli oggetti per sviluppare modelli gerarchici di sistemi fisici, reti causali di processi rappresentanti comportamenti fisici, agenti di ragionamento che operano su modelli. Obiettivo del progetto è lo sviluppo di sistemi informatici di supporto al processo di valutazione dello stato di una diga, che introducano elementi di automatizzazione nell'interpretazione fuori linea dei dati riguardanti le dighe ed estendano le capacità degli attuali sistemi automatici di monitoraggio.

5. STRUTTURA DEL SISTEMA

La struttura di DAMSAFE è basata sul paradigma *object-oriented*. I diversi tipi di conoscenza rappresentati nel sistema sono integrati usando un modello gerarchico che descrive, con oggetti e attributi, i componenti del sistema.

La struttura gerarchica comprende due modelli (*mondi*) e tre *agenti di ragionamento*. I modelli costituiscono il dominio del problema: il mondo dei dati rappresenta tutti i concetti significativi relativi ai dati ricevuti dal monitoraggio, mentre il mondo della diga contiene tutti i concetti significativi relativi al mondo fisico della diga e dell'ambiente circostante. Gli agenti di ragionamento operano sui modelli e contengono la conoscenza richiesta per ragionare con i concetti dei modelli. Gli agenti svolgono varie funzioni, la principale delle quali è quella di *interpretazione* dei concetti del mondo dei dati in termini di concetti del mondo della diga.

Ogni modello rappresenta una vista del mondo fisico, mentre ogni agente di ragionamento rappresenta una funzione del processo di interpretazione dei dati svolto dai gestori della sicurezza di un impianto.

5.1. Mondo dei dati

I concetti che costituiscono il mondo dei dati sono quelli usati da esperti gestori della sicurezza per discutere e interpretare dati. Essi possono essere espressi sia in modo quantitativo che qualitativo.

Di conseguenza, il modello contiene vari oggetti, ognuno dei quali rappresenta i dati relativi a un singolo strumento del sistema di monitoraggio. Questi dati sono attributi degli oggetti; essi possono essere serie di letture dello strumento, indici statistici estratti dalle serie temporali, informazioni sui tipi di grandezze rappresentate. Vengono inoltre rappresentate le caratteristiche significative individuate nelle serie temporali del modello, quali *picchi*, *tendenze*, *gradini*, *piani*. Le caratteristiche delle serie temporali sono descritte da attributi qualitativi che ne specificano proprietà quali la lunghezza o la pendenza.

L'interfaccia uomo/macchina impiega icone per rappresentare gli oggetti del sistema; l'icona del mondo dei dati può essere espansa per mostrare le icone dei membri del mondo. A ogni oggetto sono associati *metodi*, che permettono all'utente di accedere alla conoscenza legata all'oggetto stesso. In questo modo è possibile leggere i valori degli attributi degli oggetti o mostrare grafici di serie temporali sullo schermo. E' anche possibile assegnare valori ad attributi; questo consente all'utente di agire direttamente sul mondo dei dati, senza l'intermediazione degli agenti di ragionamento.

5.2. Mondo della diga

Il mondo della diga modella il mondo fisico della diga e dell'ambiente circostante, descrivendone i possibili stati e comportamenti. Anche nel caso del mondo della diga si è adottato un tipo di rappresentazione gerarchico, che comprende oggetti quali il corpo diga, le fondazioni, i dreni, il bacino e lo schermo di fondazione.

Gli oggetti del mondo diga hanno attributi che, nel loro insieme, descrivono lo stato della diga. Gli attributi possono essere quantitativi (livello del bacino), qualitativi (qualità del calcestruzzo) o complessi (per esempio, il profilo di sottopressione, ottenuto mostrando sullo schermo una sezione della diga e usando i disegni dei piezometri in fondazione come assi su

cui vengono riportati i valori letti dagli strumenti stessi, collegando poi fra loro i punti così ottenuti).

Associati agli oggetti, inoltre, sono disponibili disegni di progetto e immagini fotografiche e cartografiche che li riguardano.

5.3. Rete causale di processi

Il modello dei comportamenti della diga è rappresentato da un insieme di processi collegati in una rete causale immersa nell'insieme degli oggetti del mondo diga. La rete modella i possibili comportamenti della diga e quelli che possono svolgersi nell'ambiente circostante, esprimendo i collegamenti causali e le condizioni che da un processo possono condurre a un altro e gli scenari che ne risultano.

L'intera rete include oltre novanta processi derivati dalla letteratura riguardante incidenti e crolli di dighe, dalla teoria e dall'intervista di esperti dei settori collegati al progetto e alla gestione della sicurezza delle dighe.

Ogni processo è documentato con una descrizione che ne spiega i meccanismi di attuazione, le evidenze che possono manifestarsi nei dati di monitoraggio, le ispezioni visive che possono permettere di individuarlo.

La rete può essere usata in diversi modi:

- come *base di dati*: ogni processo ha attributi, che descrivono il processo stesso (per esempio, data d'inizio, stato d'attivazione, velocità di variazione). Il sistema mette a disposizione metodi per esaminare questi attributi;
- come *pannello di controllo* del sistema: ogni processo è rappresentato sullo schermo da un rettangolo, che viene evidenziato quando il sistema deduce che il processo è attivo. Di conseguenza, i processi in evidenza danno all'utente un'immagine sintetica dello stato corrente dell'opera controllata. Oltre allo stato di attivazione, altri attributi (reversibilità, velocità) sono rappresentati da zone colorate del rettangolo associato sullo schermo al processo;
- come *meccanismo di inferenza*: i legami causali possono essere usati per costruire catene di eventi nella simulazione della futura evoluzione dello stato del sistema o per identificare le possibili cause di un processo attivo;
- come *base di conoscenza*: ogni processo dispone di documentazione scritta, che descrive il processo e i suoi legami con altre entità (oggetti o processi). In questo modo i fondamenti teorici del sistema possono essere facilmente acceduti tramite l'interfaccia.

5.4. Agenti di ragionamento

Tre agenti di ragionamento sono stati progettati, dei quali due sono disponibili nella versione attuale del sistema, mentre il terzo è in corso di sviluppo.

Il primo (*extractor*) opera solo sul mondo dei dati, dove manipola dati, ne *estrae* le caratteristiche salienti e le classifica.

Questa funzione è attuata tramite l'interfaccia grafica: l'estrattore mostra all'utente diagrammi di serie temporali e, con un processo interattivo, identifica l'insieme di caratteristiche significative ai fini della sicurezza che contraddistinguono il grafico in esame. Esse vengono definite da attributi qualitativi e quantitativi (per esempio lunghezza di un picco, data d'inizio)

e memorizzati nel mondo dati. A questi attributi si può poi accedere, sia da parte di agenti umani che automatici, attraverso i metodi del mondo dati.

Il secondo agente di ragionamento (*mapper*) realizza il processo di *interpretazione*, identificando sia i comportamenti attivi in termini di processi della rete causale, sia i valori di vari attributi della diga, sulla base delle evidenze offerte dai dati.

Questa funzione è attuata attraverso il soddisfacimento di *regole*, definite da esperti di sicurezza, le quali proiettano gli attributi del mondo dei dati nel mondo della diga (tabella 1). Le relazioni fra mondo dati e mondo diga sono definite usando un linguaggio progettato con lo scopo di fornire a esperti che non abbiano dimestichezza con la programmazione uno strumento facile da usare per codificare conoscenza e che produca regole altrettanto facilmente interpretabili (tabella 2). Le regole vengono elaborate da un traduttore, che genera codice C++, poi compilate ed eseguite dall'agente di ragionamento.

Una regola è attivata se sono verificate condizioni sui valori di certi attributi del mondo dati, in particolare degli attributi qualitativi che descrivono le caratteristiche delle serie temporali; in tal caso, lo stato di qualche processo della rete viene dichiarato attivo e opportuni attributi del mondo diga ricevono un valore. L'insieme dei processi attivi viene evidenziato dal sistema e descrive l'evoluzione del comportamento della diga.

Il terzo agente di ragionamento (*enforcer*) agisce sul mondo diga per estendere le implicazioni dello stato identificato dal secondo agente. Questa funzione è attuata tramite il soddisfacimento di regole e vincoli che consentono di evidenziare nella rete causale le catene di processi attivi.

Una volta che lo stato della diga è stato definito in termini di processi e catene attivi, si può confrontare tale stato con *modelli di riferimento* per esprimere un giudizio sullo stato della struttura e dell'ambiente.

6. IMPLEMENTAZIONE E IMPIEGHI DEL SISTEMA

DAMSAFE è stato realizzato su stazioni di lavoro Sun con C++ e la libreria InterViews di X Window System. L'implementazione ha richiesto la scrittura di oltre 100.000 linee di codice originale e l'incapsulamento di codice preesistente; allo scopo è stato progettato e sviluppato un ambiente di integrazione del software denominato MI1 (Salvaneschi, 1991; Gambirasi et al., 1992).

DAMSAFE è attualmente impiegato da due tipi di utente:

1. esperti di sicurezza delle dighe: i ricercatori del settore della sicurezza delle dighe impiegano DAMSAFE come codifica della loro esperienza e come supporto nell'attività di interpretazione fuori linea dei dati di monitoraggio memorizzate in banche dati; inoltre, confrontano i risultati delle elaborazioni con la loro conoscenza, in modo da calibrare il modello di DAMSAFE o affinare conoscenze non ancora definite;
2. nuovi addetti alla gestione della sicurezza: il personale in fase di addestramento usa DAMSAFE come base di conoscenza che contiene informazioni teoriche ed empiriche raccolte dalla letteratura e da esperti del settore.

È stata inoltre sviluppata una versione in linea di DAMSAFE - denominata MISTRAL - che realizza un sottoinsieme delle funzioni progettate per il sistema principale.

L'obiettivo di MISTRAL è la messa a punto e l'implementazione software di una procedura diagnostica che permetta un'organica segnalazione dei risultati ottenuti singolarmente dai controlli di un sistema di monitoraggio, per generare segnalazioni di allarme solo per le condizioni di reale interesse e per indirizzare l'attività dei responsabili al controllo (Lazzari & Salvaneschi, 1992). La procedura opera come filtro e classificatore delle anomalie sulla base di comportamenti strutturali legati a combinazioni degli esiti dei singoli controlli elementari, intercettando segnalazioni dovute a superamenti accidentali delle soglie di controllo. Il sistema costruisce inoltre una spiegazione in linguaggio naturale delle proprie deduzioni.

Ciò permette di effettuare in tempo reale una parte della valutazione esperta, riducendo il ricorso a interventi specialistici e aumentando la *fiducia* nella sicurezza della diga.

Il sistema è stato implementato su un personal computer; il nucleo di interpretazione e spiegazione è stato scritto in Prolog; componente fondamentale del sistema è l'interfaccia grafica, realizzata con Visual Basic, così come i meccanismi di comunicazione con il sistema di monitoraggio.

MISTRAL è installato dall'ottobre del 1992 su un personal computer in comunicazione seriale con un sistema di monitoraggio su una diga ad arco-gravità (altezza massima ca. 100 m., lunghezza ca. 500 m.) in un bacino destinato all'approvvigionamento idrico e, secondariamente, alla produzione di energia elettrica.

Il sistema è impiegato quotidianamente dai gestori della diga come pannello di controllo, che illustra la situazione corrente dell'opera, e come un sistema di supporto alle decisioni; in particolare, la base di dati di MISTRAL permette di seguire la storia della diga attraverso le interpretazioni date dal sistema di controllo e di attivare le azioni necessarie (interventi, sopralluoghi, ...).

7. SVILUPPI FUTURI

È in corso la realizzazione dell'agente di ragionamento per il consolidamento delle deduzioni sulla rete causale e il confronto con modelli di riferimento. E' previsto lo sviluppo di procedure di simulazione per la gestione di scenari di rischio che impieghino la rete dei processi come meccanismo di inferenza.

Inoltre, sono stati sviluppati, usando reti neurali, strumenti di riconoscimento delle caratteristiche di serie temporali, dei quali è prevista l'integrazione nel sistema (Biella et al., 1993).

Per quanto riguarda il sottosistema in linea per il filtraggio degli allarmi, è in fase di realizzazione un nuovo sistema di valutazione da applicare a una seconda diga ad arco-gravità. In questo ambito si intendono sviluppare strumenti di gestione della conoscenza incerta o incompleta, che allo stato attuale è trattata solo marginalmente per determinare la significatività delle deduzioni del sistema a partire dalla significatività degli strumenti funzionanti.

Si sta valutando la possibilità di integrare nel sistema tecniche neurali di elaborazione per la realizzazione di due funzionalità:

- taratura delle funzioni di valutazione a prevalente contenuto euristico: una rete neurale dovrebbe essere usata per generare i parametri delle funzioni di valutazione. Partendo dall'ampia base di informazioni disponibili - raccolte in vari anni di misurazioni - e dalle valutazioni prodotte dagli esperti, una rete neurale potrebbe essere addestrata per

classificare le situazioni passate e impiegata poi per associare alle nuove situazioni da valutare l'opportuno giudizio, ottenuto per generalizzazione dai risultati dell'addestramento;

- gestione di un archivio di valutazioni di esperti: una memoria associativa dovrebbe consentire di memorizzare informazioni relative a interpretazioni di esperti di situazioni *critiche* - interpretazioni eventualmente basate su informazioni aggiuntive rispetto a quelle del monitoraggio - e di individuare le situazioni passate più simili a quella corrente, implementando strategie di ragionamento analogico del tipo *case based*.

9. BIBLIOGRAFIA

Gualtiero Biella, Marco Lazzari, Paolo Salvaneschi, (1993)

The use of neural networks for the interpretation of monitoring data of dams,
Second Specialist Seminar on Integrated CAD of Earthquake Resistant Buildings and Civil Engineering Structures, University of Ljubljana, Slovenia, April 1993.

Paolo Bonaldi, Giorgio Carradori, Michele Fanelli, Gabriella Giuseppetti, Giovanni Ruggeri, (1988)

Modern techniques for dam safety surveillance and evaluation,
Proceedings of the 16th ICOLD Congress, San Francisco, CA, June 1988.

Mauro Cadei, Joseph B. Comerford, Marco Lazzari, Paolo Salvaneschi, (1992)

Una famiglia di sistemi basati su conoscenza per la valutazione della sicurezza di opere di ingegneria civile,
31° Congresso Annuale dell'Associazione Italiana per l'Informatica e il Calcolo Automatico, Torino, Italy, Ottobre 1992, 67-71.

Mauro Cadei, Marco Lazzari, Paolo Salvaneschi, (1990)

Safety management of civil engineering structures using knowledge-based systems,
Third International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems (IEA/AIE 90), Charleston, S.C., July 1990, New York: ACM Press, 618-627.

Joseph B. Comerford, Marco Lazzari, Giovanni Ruggeri, Paolo Salvaneschi, Michele Fanelli, Gabriella Giuseppetti, Guido Mazzà, (1993)

Qualitative causal models and knowledge integration in system monitoring: the DAMSAFE system,
Colloquium on Knowledge-Based Systems in Civil Engineering, Beijing, China, May 1993, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE).

Joseph B. Comerford, Paolo Salvaneschi, Marco Lazzari, Paolo Bonaldi, Giovanni Ruggeri, Michele Fanelli, Gabriella Giuseppetti, Guido Mazzà, (1992)

The role of AI technology in management of dam safety: the DAMSAFE system,
Dam Engineering, 3(4), 1992.

Joseph B. Comerford, John R. Stone, (1992)

Artificial intelligence in risk control, in D.I. Blockley (Ed.), *Engineering Safety*, London: McGraw Hill, 1992.

Bruno M. Franck, Theodor Krauthammer, (1987)

Preliminary safety and risk assessment for existing hydraulic structures - an expert system approach,

Report ST-87-05, Univ. of Minnesota, Dept of Civil and Mineral Eng., Inst. of Technology, October 1987.

Paolo Gambirasi, Paolo Salvaneschi, Andrea Spinelli, (1992)

Virtual reality and software integration: a case study,

31° Congresso Annuale dell'Associazione Italiana per l'Informatica e il Calcolo Automatico, Torino, Ottobre 1992, 281-288.

Don Grime, Terry Phillips, Mark Waage, (1988)

The Kelly system: on-line expertise,

Hydro Review, August 1988, 36-41.

Marco Lazzari, Paolo Salvaneschi, (1992)

MISTRAL - Un sistema esperto per la gestione delle segnalazioni da sistemi di monitoraggio di dighe,

Rapporto Interno, ISMES, Bergamo, 1992.

Paolo Salvaneschi, (1991)

The use of integration tools in software maintenance,

IEEE Conference on Software Maintenance 1991, Sorrento, Ottobre 1991, 261-264.

Michael R. Wick, William B. Thompson, (1992)

Reconstructive expert system explanation,

Artificial Intelligence, **54** (1-2), March 1992.

```

Rule_4(
  CONDITION(Trend OF UnderseepageTimeSeries),
  ASSERT (ChangeInSeepageAroundDam),
  SET (
    StartTime OF ChangeInSeepageAroundDam
      TO StartTime OF Trend OF UnderseepageTimeSeries
    AND
    FinishTime OF ChangeInSeepageAroundDam
      TO FinishTime OF Trend OF UnderseepageTimeSeries
    AND
    ProcessSpeed OF ChangeInSeepageAroundDam TO "slow"
  ),
  MAP (
    Gradient OF Trend OF UnderseepageTimeSeries
    INTO
    RateOfChange OF ChangeInSeepageAroundDam
  )
)

```

Tabella 1: Una regola del linguaggio dell'agente di interpretazione

```

<ANiceRule> ::
  (
    CONDITION( <Condition> ),
    ASSERT( <ListOfDamProcesses> ),
    SET( <SetList> ),
    MAP( <MapList> )
  )

<Condition> ::
  <ExistentialCondition> | <RelationalCondition>

<ExistentialCondition> ::
  <ListOfFeatures>

<ListOfFeatures> ::
  <Feature> OF <DataObject> [ OR <ListOfFeatures> ]

```

Tabella 2: Una parte della grammatica del linguaggio a regole usato dall'agente di interpretazione