MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

Programmi di ricerca cofinanziati - Modello E
Relazione scientifica conclusiva sui risultati di ricerca ottenuti - ANNO 2007
prot. 20077ESJAP

1. Area Scientifico Disciplinare principale	*08: Ingegneria civile ed Architettura*
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	*NOVATI Giorgio*
- Università	*Politecnico di MILANO*
- Facoltà	*Facoltà di ARCHITETTURA e SOCIETÀ*
- Dipartimento/Istituto	*Dip. INGEGNERIA STRUTTURALE*
3. Titolo del programma di ricerca	*Monitoraggio, analisi inversa diagnostica e valutazione della sicurezza strutturale di dighe in calcestruzzo esistenti.*
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	*ICAR/08*
5. Costo originale del Programma:	*263.000 €*
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	*112.000 €*
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	*48.704 €*
8. Finanziamento totale:	*160.704 €*
9. Durata:	*24 mesi*

10. Obiettivo della ricerca eseguita

Il tema della sicurezza strutturale di dighe in calcestruzzo esistenti è oggi di notevole importanza visto che molte delle grandi dighe in calcestruzzo attualmente in servizio in Europa hanno ormai alcuni decenni di vita e risultano dunque inevitabilmente affette da qualche forma di deterioramento. L'analisi dei dati di monitoraggio e la sorveglianza da parte di "esperti" del comportamento strutturale di queste opere sono sempre stati e sono tutt'ora elementi essenziali per la valutazione dello stato di salute di una diga e per decidere l'eventuale realizzazione di interventi di riabilitazione. I progressi che si sono realizzati negli ultimi anni nel campo della modellazione del comportamento dei materiali e della simulazione numerica di sistemi strutturali anche complessi (un sistema diga-fondazione interagente con l'acqua dell'invaso è certamente 'complesso') consentono di prospettare l'utilizzo di nuovi metodi e strumenti finalizzati a rendere più efficace e affidabile la valutazione dell'integrità e della sicurezza di una diga.
La ricerca eseguita è stata sviluppata in coerenza con l'obiettivo appena descritto, focalizzando primariamente l'attenzione sulle seguenti problematiche:
(a) sviluppo di modelli e procedure per simulare la reazione alcali-aggregati (AAR) nel calcestruzzo e per predire l'evoluzione nel tempo degli effetti da essa indotti nelle dighe.
(b) sviluppo di metodi per l'analisi accoppiata di fenomeni di interazione idro-meccanica fra diga e fondazione, tenendo conto della parziale saturazione dell'ammasso roccioso di fondazione e del corpo diga, e di famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso stesso.
(c) sviluppo di metodi basati su test locali in situ per l'identificazione di parametri di modelli costitutivi e di stati di sforzo, combinando i seguenti ingredienti: meccanica sperimentale, simulazioni al computer e analisi inverse.
(d) sviluppo di metodi per simulare la propagazione di fratture nel corpo diga causata da variazioni cicliche del livello di invaso.
(e) sviluppo di tecniche del tipo "Nonlineaer Elastic Wave Spectroscopy" (NEWS) per l'identificazione di zone danneggiate e di superfici di frattura all'interno di un volume di calcestruzzo.
(f) Miglioramenti di metodi per l'identificazione di parametri elastici (assunti costanti-a-zone nel corpo diga) basati su analisi globali dinamiche, svolte nel dominio del tempo, utilizzando filtri di Kalman.
(g) analisi probabilistica della sicurezza del sistema diga-fondazione in presenza di azioni sismiche.

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Sul tema (a) hanno lavorato sia l'Unità di Ricerca (UR) di Milano, sia l'UR di Padova.
La UR di Milano ha apportato miglioramenti ad un modello chemo-elastico a danneggiamento precedentemente proposto dagli stessi ricercatori milanesi: è stato introdotto un danneggiamento anisotropo (che meglio rappresenta la realtà fenomenologica) e si è considerata la dipendenza della reazione alcali-aggregati (AAR) dalla variazione di umidità inserendo nel modello una ulteriore variabile costituita dal grado di saturazione del cls (che risulta influire in modo determinante sulla velocità di reazione e sul livello massimo di espansione osservabili sperimentalmente).
Lavori pubblicati sul tema (a) da UR Milano:
C. Comi, U. Perego (2009) - A damage model for long term degradation in concrete dams due to the alkali-aggregate reaction, Proc. LTBD09 2nd International Conference on Long Term Behaviour of Dams, 12th - 13th October 2009, Graz (Austria), pp. 438-443.
C. Comi, U. Perego (2010) - Anisotropic damage model for concrete affected by alkali-aggregate reaction. Int. J. Damage Mech., in stampa.
C. Comi, R. Pignatelli (2010) - On damage modeling of concrete affected by alkali silica reaction in the presence of humidity gradients. Proc. GIMC2010, September 22-24, 2010, Siracusa (Italy), 4pp CD. ISBN: 978-88-905217-0-6.

Sullo stesso tema (a) l'UR di Padova ha formulato e implementato un modello che prevede l'accoppiamento completo tra il campo solido, termico e fluido nella descrizione del fenomeno AAR. Le equazioni, discretizzate agli elementi finiti, risultano piuttosto complesse visto gli accoppiamenti presenti. E' stato necessario procedere ad una accurata calibrazione dei parametri presenti nelle leggi costitutive adottate, sfruttando dati sperimentali presenti in letteratura. Utilizzando il modello proposto sono state fatte simulazioni di studi sperimentali su provini disponibili in letteratura ottenendo buoni risultati. Sono inoltre svolte analisi su strutture bidimesionali già analizzate da altri autori ottenendo di nuovo risultati che corroborano la validità delle procedure svilupate.
Lavori pubblicati sul tema (a) da UR di Padova:

L.Simoni, S. Secchi, B.A. Schrefler (2008) - Numerical Difficulties and Computational Procedures for Thermo-Hydro-Mechanical Coupled Problems of Saturated Porous Media. Computational Mechanics, vol.43; p.179-189.
B.A. Schrefler, F. Pesavento, L. Sanavia, G. Sciumè, S. Secchi and L. Simoni (2010) - A General Framework for Modelling Long Term Behaviour of Earth and Concrete Dams. Frontiers of Architecture and Civil Engineering, 2010, DOI 10.1007/s11709-010-0070-x (pubblicato online).

Sul tema (b) ha lavorato l'UR del Molise.
Sono state sviluppate procedure numeriche per la simulazione degli effetti delle opearazioni di invaso/svaso sui fenomeni di rottura osservati nel sistema diga-fondazione. Le procedure, implementate in codici agli elementi finiti, tengono conto, oltre che della parziale saturalzione, degli effetti tridimensionali dovuti alla presenza di spalle, sponde e discontinuità presenti nell'ammasso roccioso.
Per rappresentare i fenomeni di rottura localizzata si è utilizzato un metodo agli elementi finiti "enhanced" con discontinuità forti esendendolo al caso di parziale saturazione.
Lavori pubblicati sul tema (b) dalla UR del Molise:
C.Callari, A.Abati (2009) - Finite element methods for unsaturated porous solids and their application to dam engineering problems. Computers & Structures, vol.87, pp.485-501.
C. Callari, F. Armero, A. Abati (2010) - Strong discontinuities in partially-saturated poroplastic solids. Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., vol.199, pp.1513-1535.
CALLARI C. (2009). Three-dimensional interaction between concrete gravity dam and foundation rock mass in presence of coupling with seepage. In: Proc. LTBD09 2nd International Conference on Long Term Behaviour of Dams, pp. 443-449, ISBN/ISSN: 9783851250701.

Il tema (c) è stato sviluppato dalla UR di Milano.
Sono state proposte e analizzate prove in profondità nel corpo diga, eseguite con 'dilatometro', e prove con martinetti piatti, impiegati in modo innovativo, in prossimità di superfici libere. Le procedure proposte sfruttano la combinazione sinergica di prove sperimentali, della loro simulazione numerica e di tecniche di analisi inversa per identificare proprietà elastiche ed inelastiche del calcestruzzo e stati di sforzo locali.
La ricerca svolta si è basata sull'utilizzo di dati 'pseudo-sperimentali'. Sono state sviluppate procedure nelle quali i calcoli da effettuare per stimare i parametri incogniti possano suddividersi in due fasi: una prima fase, più onerosa, da svolgere però una volta per tutte utilizzando mezzi di calcolo adeguati; una seconda fase che, ereditando dalla prima "routines" e/o informazioni specifiche, risulta computazionalmente molto snella.
Lavori pubblicati sul tema (c) da UR di Milano:
G. Maier, G. Bolzon, V. Buljak, T. Garbowski, B. Miller (2010) - Synergic combinations of computational methods and experiments for structural diagnoses. In: 'Computer Methods in Mechanics - Lectures of the CMM 2009', M. Kuczma and K. Wilmanski Editors, Springer-Verlag, pp.453-476.
T. Garbowski, G. Maier, G. Novati (2010) - Diagnosis of concrete dams by flat-jack tests and inverse analyses based on proper orthogonal decomposition, Journal of Mechanics of Materials and Structures, in print.
A. Zirpoli, G. Maier, G.Novati, T. Garbowski (2008) - Dilatometric tests combined with computer simulations and parameter identification for in-depth diagnostic analysis of concrete dams. In: Life-Cycle Civil Engineering (Biondini and Frangopol Eds). Varenna, Lake Como, Italy, June 10-14, 2008, LONDON: Taylor & Francis, p. 259-265.

Il tema (d) è stato sviluppato dalla UR di Torino. Lo studio è stato condotto utilizzando modelli di fessura coesiva in modo I e in modo misto, per il caso in cui nella frattura vi sia acqua in pressione e per il caso di frattura asciutta.
Lavori pubblicati sul tema (d) da UR di Torino:
F.Barpi, S.Valente (2010) - The cohesive frictional crack model applied to the analysis of the dam-foundation joint. Engineering Fracture Mechanics, vol.77, pp.2182-2191.
F.Barpi, S.Valente (2010)Subcritical crack propagatio under cyclic load of concrete structures. Magazine of Concrete Research, vol.62, pp.489-496.

Anche il tema (e) è stato sviluppato presso l'UR di Torino.
Sono state condotte delle prove mediante tecniche NEWS su campioni di dimensioni ridotte, realizzati mediante accoppiamento di due cubetti di cls, soggetti a compressione. Per vari livelli di carico (fino a rottura) si è seguita tramite tecniche NEWS l'evoluzione del danno che si manifestava a partire dala zona prossima all'interfaccia.
Alcuni dei lavori pubblicati sul tema (e) dall'UR di Torino sono i seguenti:
P. Antonaci et al. (2010) - Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete. Cement and Concrete Research, vol.40, pp.340-346.
P.Antonaci et al. (2010) - Nondestructive characterization of concrete joints using the Scaling Subtraction Method. Key Engineering Materials, vol.417, pp.41-44.
P. Antonaci et al. (2010) - Evolutionof damage-induced nonlineariry in proximity of discontinuites in concrete. Int. J. Solids & Structures, vol.47, pp.1603-1610.

Il tema (f) è stato sviluppato presso l'UR di Trieste.
Il problema di identificazione ha riguardato la stima di parametri di rigidezza elastica, assunti costanti-a-zone nel corpo diga, i cui valori sono ritenuti correlabili al deterioramento meccanico subito dal cls. La stima viene effettuata confrontando la risposta misurata (in termini di spostamenti e/o velocità e/o accelerazioni) indotta ad esempio da vibrodine con la risposta calcolata (funzione dei parametri di rigidezza da identificare). La stima ha riguardato il modulo elastico tangenziale e quello volumetrico (ritenuti correlati a processi di danneggiamento indotti da sforzi deviatorici e da sforzi idrostatici).Nel processo di identificazione si è tenuto conto del ruolo sia di errori di misura che di errori di modellazione.
I lavori sul tema (f) pubblicati dall'UR di Trieste sono i seguenti:
A. Nappi, G. Facchin (2009) - System Identification Applied to Dam Safety and Integrity. In: Advances and Trends in Engineering Materials and their Application. Montreal, 6-10 luglio 2009, OTTAWA: Yehia M. Haddad, p. 43-49, ISBN/ISSN: ISBN 0-9780479.
A. Nappi, G. Facchin (2010) - Monitoring of damaged zoness in large dams: an error indicator for a nondestructive testint procedure. AES Technical Reviews; ISBN:1718-5505; di prossima pubblicazione.

Sul tema (g) ha lavorato l'UR del Molise.
Sono state messe a punto metodologie per le analisi di vulnerabilità sismica considerando le incertezze legate alle caratteristiche dei materiali e alle azioni esterne (azione sismica, livello del serbatoio). Dalle analisi si ottengonmo curve di vulnerabilità esprimenti la probabilità che la struttura violi uno o più stati limite per un determinato valore di intensità di misura dell'azione sismica.
Lavori sul tema (g) prodotti dall'UR del Molise:
A. Lupoi, C.Callari (2009) - Probabilistic seismic assessment of concrete dams. In: Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, Furuta, Frangopol & Shinozuka (eds). Osaka, 13-17 September 2009, LONDON: Taylor & Francis Group, p. 1758-1765, ISBN/ISSN: 9780415475570.
A. Lupoi, C.Callari (2010) - A probabilistic method for the seismic assessment of existing concrete gravity dams. Submitted to an international ISI journal.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

NESSUN PROBLEMA RISCONTRATO

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate (da consuntivo)

	(mesi uomo) TOTALE
da personale universitario	*210*
altro personale	*48*
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	*31*

14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

Partecipazioni a convegni:

	Già svolti (numero)	Da svolgere (numero)	Descrizione
in Italia	*5*	*1*	*Le partecipazioni ai convegni già svoltisi sono desumibili dall'elenco delle pubblicazioni su atti di convegno.* *Impegno fondi per 1 partecipazione a convegno nazionale che si svolgerà nel 2011:* *XX Convegno AIMETA (Associaz. Italiana di Meccanica Teorica e Applicata), Bologna, settembre 2011.*
all'estero	*5*	*3*	*Le partecipazioni ai convegni già svoltisi sono desumibili dall'elenco delle pubblicazioni su atti di convegno.* *Impegno fondi per 3 partecipazioni a convegni internazionali che si svolgeranno nel 2011:* *6th Int. Conf. on Dam Engineering, febbr.2011, Lisbona.* *Int. Conf. on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures (CFRAC 2011), June 2011, Barcelona, Spain.* *Conf. on Comp. Methods for Coupled Problems in Science and Engng., June 2011, Kos, Greece.*
TOTALE	**10**	**4**	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Articoli pertinenti pubblicati:

	Numero	Descrizione
su riviste italiane con referee	*0*	
su riviste straniere con referee	*12*	*C. Comi, U. Perego (2010) - Anisotropic damage model for concrete affected by alkali-aggregate reaction. Int. J. Damage Mech., in press.* *T. Garbowski, G. Maier, G. Novati (2010) - Diagnosis of concrete dams by flat-jack tests and inverse analyses based on proper orthogonal decomposition, Journal of Mechanics of Materials and Structures, in print.* *R. Ardito, G. Cocchetti, G. Maier (2010) - Generalized limit analysis in poroplasticity by mathematical programming. Archives of Aplied Mechanics, 80, pp.57-72.* *L.Simoni, S. Secchi, B.A. Schrefler (2008) - Numerical Difficulties and Computational Procedures for Thermo-Hydro-Mechanical Coupled Problems of Saturated Porous Media. Computational Mechanics, vol.43; p.179-189.* *F.Barpi, S.Valente (2010) - The cohesive frictional crack model applied to the analysis of the dam-foundation joint. Engineering Fracture Mechanics, vol.77, pp.2182-2191.* *F.Barpi, S.Valente (2010)Subcritical crack propagatio under cyclic load of concrete structures. Magazine of Concrete Research, vol.62, pp.489-496.* *P. Antonaci et al. (2010) - Nonlinear ultrasonic evaluation of load effects on discontinuities in concrete. Cement and Concrete Research, vol.40, pp.340-346.* *P.Antonaci et al. (2010) - Nondestructive characterization of concrete joints using the Scaling Subtraction Method. Key Engineering Materials, vol.417, pp.41-44.* *P. Antonaci et al. (2010)- Evolutionof damage-induced nonlineariry in proximity of discontinuites in concrete. Int. J. Solids & Structures, vol.47, pp.1603-1610.* *C.Callari, A.Abati (2009) - Finite element methods for unsaturated porous solids and their application to dam engineering problems. Computers & Structures, vol.87, pp.485-501.* *C. Callari, F. Armero, A. Abati (2010) - Strong discontinuities in partially-saturated poroplastic solids. Comp. Meth. Appl. Mech. Engng., vol.199, pp.1513-1535.* *A. Nappi, G. Facchin (2010) - Monitoring of damaged zoness in large dams: an error indicator for a nondestructive testint procedure. AES Technical Reviews; ISBN:1718-5505; di prossima pubblicazione.*
su altre riviste italiane	*0*	
su altre riviste straniere	*0*	
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	*6*	*C. Comi, U. Perego (2009) - A damage model for long term degradation in concrete dams due to the alkali-aggregate reaction, Proc. LTBD09 2nd International Conference on Long Term Behaviour of Dams, 12th - 13th October 2009, Graz (Austria), pp. 438-443.* *C. Comi, U. Perego (2009) - Anisotropic damage model for concrete affected by alkali-aggregate reaction, 7th EUROMECH Solid Mechanics Conference, Lisbona, settembre 7-11.* *A. Zirpoli, G. Maier, G.Novati, T. Garbowski (2008) - Dilatometric tests combined with computer simulations and parameter identification for in-depth diagnostic analysis of concrete dams. In: Life-Cycle Civil Engineering (Biondini*

		and Frangopol Eds). Varenna, Lake Como, Italy, June 10-14, 2008, LONDON: Taylor & Francis, p. 259-265. *F.Barpi and S. Valente: Some issues in the application of the frictional cohesive crack model to dam-foundation joint. In Int.Conference on Crack Paths, Vicenza, Sept.23-25, volume 1, page 119, 2009.* *C. Callari (2009) - Three-dimensional interaction between concrete gravity dam and foundation rock mass in presence of coupling with seepage. In: Proc. LTBD09 2nd International Conference on Long Term Behaviour of Dams, pp. 443-449, ISBN/ISSN: 9783851250701.* *A. Nappi, G. Facchin (2009) - System Identification Applied to Dam Safety and Integrity. In: Advances and Trends in Engineering Materials and their Application. Montreal, 6-10 luglio 2009, OTTAWA: Yehia M. Haddad, p. 43-49, ISBN/ISSN: ISBN 0-9780479.*
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	*4*	*C. Comi, R. Pignatelli (2010) - On damage modeling of concrete affected by alkali silica reaction in the presence of humidity gradients. XVIII Convegno Italiano di Meccanica Computazionale(GIMC2010- Aimeta), Siracusa, settembre 2010, 4pp CD. ISBN: 978-88-905217-0-6.* *G. Cocchetti, T. Garbowski, G. Maier, G. Novati (2009) - Una nuova tecnica basata su martinetti piatti e sull'analisi inversa per la diagnostica di dighe in calcestruzzo. Convegno Associaz. Italiana Prove Non Distruttive (AIPnD), Roma - Ottobre 15-17.* *F. Pesavento, L. Simoni D. Gawin, M. Wyrzykowski: Modelling Alkali-Silica Reaction under non-isothermal conditions in partially saturated cementitious material. XVIII Convegno Italiano di Meccanica Computazionale(GIMC2010-Aimeta), Siracusa, settembre 2010.* *F.Barpi and S. Valente: Fluid driven cohesive crack propagation in quasi-brittle materials. Atti del XIX Convegno AIMETA, Ancona, Sept.14-17, 2009.*
rapporti interni	*0*	
brevetti depositati	*0*	
TOTALE	**22**	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 22/12/2010 15:48 Firma .....

Si autorizza alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali". La copia debitamente firmata deve essere depositata presso l'Ufficio competente dell'Ateneo.