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. 2007SZSZ7L

1. Area Scientifico Disciplinare principale	*08: Ingegneria civile ed Architettura*
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	*MAIORANA Carmelo*
- Università	*Università degli Studi di PADOVA*
- Facoltà	*Facoltà di INGEGNERIA*
- Dipartimento/Istituto	*Dip. COSTRUZIONI E TRASPORTI*
3. Titolo del programma di ricerca	*Modelli ed algoritmi numerici per l'analisi del degrado e della vulnerabilità di elementi strutturali di infrastrutture civili e industriali soggette ad azioni meccaniche e termochimiche.*
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	*ICAR/08*
5. Costo originale del Programma:	*390.200 €*
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	*165.000 €*
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	*70.716 €*
8. Finanziamento totale:	*235.716 €*
9. Durata:	*24 mesi*

10. Obiettivo della ricerca eseguita

Unità di ricerca n. 1 (Padova) - L'obiettivo del progetto di ricerca proposto è consistito nello sviluppo di un modello numerico tridimensionale per lo studio del comportamento di strutture di calcestruzzo ad alte prestazioni, in esercizio e in condizioni limite, al fine di controllare il comportamento meccanico e la durabilità in caso di penetrazione di agenti esterni, nonché nei casi di aggressione da parte di ioni radioattivi a bassa-media attività e di sali fusi a temperature dell'ordine dei 300°C - 600°C. Il modello è in grado di analizzare il comportamento strutturale sotto l'effetto di alte temperature e di incendio, come comprovato dall'esperienza maturata dal proponente in questo campo. La formulazione FEM adottata ha consentito di generare un nuovo codice di calcolo denominato NEWCON3D. La ricerca si è sviluppata in quattro fasi. Il primo periodo è stato dedicato allo sviluppo di un nuovo modello chemo-termo-igro-meccanico in grado di descrivere i fenomeni occorrenti in strutture di calcestruzzo ad alte prestazioni, soggette a differenti tipi di aggressione; il secondo periodo all'esame delle relazioni costitutive e termodinamiche. In particolare si è analizzata la relazione tensioni-deformazioni in connessione con i risultati di sperimentazioni disponibili; il terzo periodo è stato dedicato alla collezione di dati dei materiali utilizzabili per strutture di calcestruzzo ad alte prestazioni, nonché alla calibrazione del codice di calcolo mediante l'esame di casi test; il quarto periodo è stato impiegato per utilizzare il codice FEM generato fin dall'inizio della ricerca, per studiare strutture tridimensionali di calcestruzzo HPC, nell'ambito dei settori sopracitati.
Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - L'obiettivo della ricerca svolta dall'Unità di Ricerca nell'ambito di questo progetto era quello di sviluppare un modello numerico di tipo spettrale (SAFE) per la simulazione della propagazione di onde guidate. In particolare, a partire da una formulazione capace di modellare tali onde in guide d'onda di sezione generica, composte da materiali elastico-lineari, si intendeva estendere la formulazione al fine di contemplare anche materiali visco-elastici, nonché valutare l'effetto di gradienti termici applicati alla guida d'onda sul comportamento delle onde in parola. Lo sviluppo consente, in generale, una più accurata modellazione della propagazione di onde guidate in componenti strutturali formati da materiali dissipativi, ed in particolare, permette di estrarre le curve di attenuazione delle onde guidate, che sono alla base dello sviluppo di qualsiasi tecnica non distruttiva volta ad ispezione i componenti analizzati. Inoltre, conoscendo il comportamento delle onde guidate per vari valori o gradienti di temperatura applicati alla guida d'onda, risulta possibile contestualizzare tali tecniche in vari scenari operativi. Ad esempio, il considerare l'effetto della temperatura sulla propagazione delle onde guidate potrebbe essere rilevante nell'ispezione di tubi percorsi da un fluido caldo, come anche nell'ispezione di componentistica aerospaziale in composito che opera a diversi valori di temperatura (da 60°C a terra fino a -40° in volo).
Unità di ricerca n. 3 (Napoli) - Il programma di ricerca proposto ha previsto lo sviluppo di aspetti teorici e computazionali legati alla modellazione costitutiva e all'analisi strutturale di elementi in conglomerato ad alta resistenza. Le strutture realizzate con calcestruzzi ad alta resistenza sono di grande interesse per le applicazioni dell'ingegneria strutturale e giocano un ruolo di spicco nelle tecnologie rivolte a risolvere le problematiche connesse con la durabilità, il danneggiamento e la riduzione del peso strutturale. Pertanto si è affrontata la problematica della formulazione di un modello costitutivo non-locale per il calcestruzzo ad alta resistenza che tenga conto dei fenomeni non-locali di elasto-plasticità e di danneggiamento e che sia suscettibile di applicazione nell'analisi strutturale di elementi mono e bidimensionali. Successivamente si è analizzato il problema della nucleazione, formazione e propagazione della frattura basata sulla rivisitazione critica della trattazione recentemente proposta da Gurtin considerando l'evoluzione della transizione di fase come un'onda d'urto che si propaga nel materiale. In tal modo la meccanica della frattura per calcestruzzi ad alta resistenza è inquadrata nell'ambito della teoria dei fenomeni di transizione di fase. Infine si sono analizzati algoritmi computazionali per l'analisi del modello di frattura e di elasto-plasticità con danneggiamento non-locale sulla base degli modelli costitutivi sviluppati nelle precedenti fasi della ricerca. Inoltre si sono indagate le potenzialità di un nuovo metodo che fornisce una semplice espressione dell'operatore di rigidezza tangente algoritmica nel caso della plasticità locale.
Unità di ricerca n. 4 (Catania) - L'oggetto della ricerca è consistito nell'analisi del comportamento meccanico di elementi strutturali in calcestruzzo soggetti a degrado di natura meccanica e chimica. Fra le sorgenti di degrado meccanico si è centrata l'attenzione sul fenomeno della fessurazione; in particolare si è esaminata la fessurazione dovuta a carichi meccanici (macrofessurazione). Fra le sorgenti di degrado di natura chimica si è esaminato il fenomeno della decalcificazione e la penetrazione di sali e agenti chimici e l'interazione di questi con la pasta cementizia in termini di danneggiamento meccanico, che a sua volta incrementa la permeabilità del materiale. E' stato studiato il danneggiamento causato dall'ossidazione delle armature, e la conseguente perdita di efficacia nel limitare l'ampiezza

delle fessure. Si è scelto di analizzare uno scenario costituito da un ambiente particolarmente aggressivi (marino). L'attività si è svolta all'interno dei WP 4 e 5 , ed ha riguardato la formulazione di modelli costitutivi di natura multifisica tri-dimensionali per il calcestruzzo e la loro implementazione numerica nell'ambito di codici di calcolo agli elementi finiti. Le applicazioni effettuate sono state indirizzate a simulare casi studio significativi, e da essi sono state tratte importanti conclusioni relativamente alla efficacia del modello e soprattutto al tipo di modellazione numerica necessaria per affrontare in maniera efficiente simulazioni su grande scala. Ne è derivata una serie di linee di ricerca futura, alcune delle quali hanno già dato dei buoni risultati.
Unità di ricerca n. 5 (Cosenza) - L'obiettivo principale della ricerca eseguita è consistito nell'analisi dei fenomeni di danneggiamento nei materiali e nelle strutture avanzate, costituite in parte o integralmente da materiali compositi fibro-rinforzati. Si sono inoltre sviluppati modelli in grado di determinare le effettive proprietà costitutive macroscopiche di tali materiali, tenendo in conto l'evoluzione della loro microstruttura. A tal riguardo, nell'ambito della ricerca si è affrontato il problema dell'analisi dell'evoluzione del danneggiamento che può avvenire a livello della micro, macro o meso-scala. In particolare, sono stati analizzati fenomeni di delaminazione a partire da difetti iniziali di forma arbitraria in piastre multistrato, attraverso l'utilizzo di modelli d'interfaccia e modelli di piastra. In tale ambito sono stati studiati i problemi di danneggiamento per distacco nelle strutture in calcestruzzo armato rinforzate con piastre laminate in composito. Lo studio dei fenomeni di danneggiamento diffusi all'interno delle lamine delle piastre composite è stato affrontato utilizzando un modello basato sul classico approccio termodinamico, capace di analizzare i fenomeni di plasticità e di danneggiamento. Al fine di valutare, poi, gli effettivi macrolegami costitutivi di compositi fibrorinforzati o a matrice porosa è stato proposto un modello micromeccanico accoppiato alla Meccanica della Frattura, in grado di tenere in conto le varie eterogeneità presenti.

---

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

Unità di ricerca n. 1 (Padova) - Lo scopo principale di questo progetto di ricerca è stato quello di sviluppare un modello numerico tridimensionale per lo studio del comportamento di strutture di calcestruzzo ad alte prestazioni, in esercizio e in condizioni limite, al fine di controllare il comportamento meccanico e la durabilità non solo nel caso in cui tali strutture siano soggette all'azione di agenti esterni, ma anche nei casi di aggressione da parte di ioni radioattivi a bassa-media attività e di sali fusi a temperature dell'ordine dei 300°C - 600°C. Il modello è in grado di analizzare il comportamento strutturale sotto l'effetto di alte temperature e di incendio. La formulazione FEM adottata ha consentito di generare un nuovo codice di calcolo denominato NEWCON3D. Il modello utilizzato in questa ricerca considera il calcestruzzo come un mezzo poroso multifase. La possibilità di studiare i suddetti fenomeni in un contesto strutturale in cui alle tre dimensioni spaziali si aggiunge quella temporale, permette di tener conto in modo realistico dei fenomeni in gioco e di descrivere compiutamente l'evoluzione temporale del sistema. 1° periodo - Nel primo periodo della ricerca, a partire dalle conoscenze acquisite in passato e avvalendosi dei modelli esistenti, è stato sviluppato il nuovo modello tridimensionale, adatto allo studio dei fenomeni chemo-termo-igro-meccanici nelle strutture di calcestruzzo ad alte prestazioni considerate, tenendo conto delle varie forme di aggressione dichiarate. Il modello consiste di un gruppo di base di tre o quattro equazioni, rispettivamente nelle versioni fenomenologica (VISCO3D) e meccanicistica (HITECOSP) di base. Le suddette equazioni sono ottenute per mezzo di una tecnica di Volume Averaging nella quale il materiale è trattato come un mezzo poroso multifase e sono tenuti in considerazione tutti i più importanti cambiamenti di fase dell'acqua e le relative sorgenti di calore e massa. 2° periodo - Leggi costitutive e relazioni termodinamiche. Il modello è completato da un insieme di leggi costitutive ed equazioni di stato, nonchè da alcune relazioni termodinamiche. Le equazioni generali del modello sono espresse in funzione delle variabili di stato scelte. Nel caso dell'attacco da ioni attivati, si considera l'umidità relativa quale vettore di trasporto degli ioni, per cui cambiano le caratteristiche di diffusione-convezione. Per quanto riguarda le leggi costitutive descriventi il comportamento meccanico del calcestruzzo, si considera una forma modificata del principio delle tensioni efficaci di Bishop che sono da ritenere responsabili delle deformazioni meccaniche nel calcestruzzo. L'intero set di equazioni è poi completato da un insieme di condizioni iniziali e al contorno dove i parametri relativi al materiale rivestono un ruolo importante, quindi condizioni convettive e di irraggiamento. 3° periodo - Dati del materiale per strutture in conglomerato ad alte prestazioni; calibrazione ed esempi mediante tests sperimentali. La cinetica e l'ampiezza dei processi precedentemente descritti sono controllati dalle proprietà del materiale, il che significa che le equazioni generali del modello e le relazioni costitutive contengono una serie di coefficienti descriventi il comportamento non lineare del materiale. Le proprietà del materiale includono quelle termiche e quelle relative al trasporto di massa (conducibilità e capacità termica, permeabilità al vapore acqueo e all'acqua liquida), quelle relative al trasporto degli ioni attivati (coefficienti di diffusione) e quelle meccaniche (resistenza, creep termico, rigidezza, ecc.). Queste proprietà evolvono in maniera significativa in presenza di un'alta sebbene non elevatissima temperatura, dando origine ad aumenti degli stress, principalmente come cambiamento della microstruttura del calcestruzzo (porosità, permeabilità intrinseca, microcracking, distribuzione del raggio dei pori). 4° periodo - Il modello proposto è stato utilizzato per studiare strutture tridimensionali realizzate con calcestruzzi ad alte prestazioni. Questi calcestruzzi sono molto compatti, con una porosità e una permeabilità assoluta molto basse, tali da non consentire facilmente la migrazione dell'acqua contenuta all'interno da un'estremità all'altra del getto. Un ulteriore problema applicativo di interesse in questa ricerca ha riguardato i contenitori di calcestruzzo per lo stoccaggio di scorie radioattive a bassa o media intensità. Analogamente è stato possibile investigare la tenuta di manufatti cilindrici rispetto alle alte temperature generate dai sali fusi in impianti per captazione solare. In questo caso sono stati utilizzati i modelli già disponibili per temperature elevatissime e per incendi, sviluppati da questa unità operativa nel corso degli ultimi dieci anni ed ampiamente citati nella letteratura riportata.
Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - L'aspetto viscoelastico è stato introdotto nella formulazione spettrale mediante modellazione costitutiva. In particolare, si è considerata nella formulazione la viscoleasticità lineare semplicemente utilizzando matrici costitutive complesse e dipendenti dalla frequenza. Infatti, nell'ambito della modellazione costitutiva, il vantaggio dei metodi SAFE si fonda sulla possibilità di considerare modelli costitutivi dipendenti dal tempo, senza eccessive complicazioni matematiche. Questo è possibile formulando l'equazione governante il problema (equazione d'onda) nel dominio delle frequenze, dove un modello reologico per viscoelaticità lineare si distingue da un modello elastico lineare per il solo aspetto costitutivo. Ad oggi sono stati implementati nel modello SAFE esistente due differenti modelli reologici, comunemente impiegati in campo ultrasonico, per contemplare materiali dissipativi: il modello isteretico e il modello di Kelvin-Voigt. I predetti modelli sono stati inseriti nell'algoritmo SAFE, una volta posta l'equazione d'onda nel dominio delle frequenze, attraverso l'utilizzo di equazioni di legame complesse dipendenti dalla frequenza di propagazione delle onde, in forza dell'ipotesi di viscoelasticità lineare. In particolare, il modello isteretico è caratterizzato da equazioni di legame che sono indipendenti dalla frequenza di propagazione delle onde, mentre il modello di Kelvin-Voigt presenta legami dipendenti dalla frequenza. La validità dell'algoritmo SAFE sviluppato è stata verificata positivamente attraverso la comparazione con svariate soluzioni analitiche note in letteratura per casi semplici. Alcuni dei risultati originali ottenuti attraverso la nuova formulazione SAFE per casi non standard (guide d'onda di forma generica) sono stati validati mediante confronto con simulazioni agli elementi finiti implementate ad hoc. Queste complesse e computazionalmente onerose simulazioni sono state sviluppate in Abaqus explicit 6.9. Il modello proposto è stato utilizzato in svariate ricerche sperimentali, volte al monitoraggio e alla valutazione non distruttiva mediante onde guidate di diversi componenti strutturali, sia in ambito civile che aerospaziale. In particolare si ricordano qui, tra le altre, le applicazioni a strutture reticolari, a cavi da ponte e a binari ferroviari che hanno dato luogo a pubblicazioni scientifiche di rilevanza internazionale. E' stata poi sviluppata una interfaccia grafica (Graphical User Interface) dell'algoritmo spettrale sviluppato per il tracciamento delle curve di dispersione. Questa interfaccia consente una maggiore fruibilità del codice sia da parte di eventuali utilizzatori esterni, sia degli altri componenti del progetto di ricerca. La formulazione è poi stata ulteriormente estesa al fine di considerare l'influenza di carichi termici. L'effetto della temperatura è stato introdotto a livello di elemento finito mediante modellazione costitutiva. Per validare questa ulteriore estensione è stata recentemente condotta una campagna di prove sperimentali, al fine di verificare la capacità del modello proposto di predire l'effetto della temperatura sul comportamento delle onde guidate (curve di dispersione e risposta strutturale). In particolare, sono state effettuate serie di test su una piastra in alluminio a svariati valori di temperatura, da meno 40° C a 60° C. In questi test, le onde guidate venivano generate e rilevate mediante trasduttori piezoelettrici posti ad una distanza assegnata, per svariati valori di frequenza di generazione. I segnali raccolti ed analizzati hanno, così, permesso di correlare la risposta del sistema alla temperatura applicata. Il Gruppo di lavoro sta al momento verificando la bontà dell'algoritmo SAFE proposto nel simulare questa correlazione.
Unità di ricerca n. 3 (Napoli) - L'attività di ricerca sviluppata ha affrontato la tematica della modellazione meccanica dei calcestruzzi ad alta resistenza. L'indagine ha riguardato la modellazione costitutiva e l'analisi di elementi mono e bidimensionali che consentano una efficace rappresentazione di strutture in conglomerato ad alta resistenza. In accordo con il programma proposto, nella prima fase dell'attività è stata affrontata la problematica relativa alla formulazione di un modello costitutivo non locale per la modellazione del comportamento del calcestruzzo ad alta resistenza. In particolare sono stati sviluppati gli aspetti teorici connessi con la formulazione di un modello costitutivo non locale per il calcestruzzo ad alta resistenza che tiene conto dei fenomeni non locali in campo elastico. Inoltre, è stato sviluppato un modello costitutivo elastoplastico in cui la non località è limitata alla fase inelastica. L'analisi teorica è stata inizialmente orientata alla definizione degli spazi funzionali in cui studiare le proprietà di buona posizione del modello variazionale e la convergenza dei metodi di approssimazione della soluzione. I modelli proposti di elasticità e di elastoplasticità non locali sono inquadrati nell'ambito delle formulazioni variazionali non locali di tipo debole in cui lo stato interno del materiale è definito attraverso variabili interne locali e non locali. Successivamente è stata affrontata la tematica dello studio teorico di modelli di plasticità non locale ideati per superare le specifiche difficoltà insite nei modelli continui di plasticità che possono condurre a problemi strutturali mal posti. La perdita di ellitticità delle equazioni alle derivate parziali che governano il comportamento del modello strutturale può condurre infatti alla localizzazione delle deformazioni dando luogo a bande di taglio di spessore tendente a zero. Nel modello continuo classico ciò conduce al paradosso che il collasso avviene con dissipazione nulla di energia. Inoltre quando si effettua la discretizzazione di un modello strutturale con legame plastico locale si manifesta spesso una patologica dipendenza della soluzione dalla discretizzazione adottata. Per tali motivi si è proposto un nuovo legame plastico non locale capace di simulare una condizione di collasso con localizzazione delle deformazioni, tipica dei materiali quasi fragili quali i calcestruzzi ad alte prestazioni. La trattazione è svolta nell'ambito del modello costitutivo di materiale standard generalizzato e di plasticità di tipo associato. Una delle caratteristiche principali del modello proposto è rappresentata dal fatto che è possibile estendere i risultati classici della plasticità locale al caso di comportamento non locale. Allo scopo di definire un modello costitutivo elastoplastico quanto più possibile semplice, ma che consenta nel contempo di garantire l'efficacia della regolarizzazione, si è considerato un modello non locale ottenuto attraverso la definizione di una sola variabile

non locale di incrudimento isotropo mentre tutte le altre variabili interne sono considerate quali variabili locali. Inoltre si è proceduto all'esame di numerosi modelli di plasticità non locale proposti in letteratura e si pervenuti alla formulazione di un nuovo modello costitutivo che consente di unificare molti modelli esistenti in un unico modello. Il passaggio dalle formulazioni variazionali al continuo, ricavate durante la presente ricerca, a quelle discrete è condotto mediante la definizione di opportuni sottospazi lineari degli spazi funzionali. Questa impostazione teorica ha consentito di affrontare il problema della convergenza e della stabilità della formulazione discreta del problema non locale. Inoltre si è giunti ad una opportuna formulazione variazionale discreta che è stata adoperata per ricavare la formulazione agli elementi finiti del problema non locale. L'algoritmo risolutivo numerico del tipo predittore elastico - correttore plastico non locale è stato formulato sulla base di un nuovo principio di minimo per il problema non locale. Si è proposta una condizione sufficiente per la convergenza dello schema iterativo predittore elastico - correttore plastico non locale e una condizione necessaria e sufficiente per l'unicità della soluzione del problema elastoplastico non locale. L'analisi della stabilità in termini delle variabili statiche e cinematiche ha mostrato che il problema non locale soddisfa la proprietà di non espansività. Infine si è mostrato che una particolare scelta delle variabili interne non locali conduce alla formulazione di un modello coesivo. La valutazione della rigidezza tangente algoritmica associata al problema inelastico consente di ottenere una migliore prestazione in termini di convergenza. La metodologia per ricavare tale rigidezza tangente algoritmica è stata analizzata secondo un approccio geometrico in cui le espressioni esatte e approssimate della rigidezza tangente algoritmica in elastoplasticità sono discusse in termini delle proprietà geometriche del dominio di plasticizzazione. L'analisi condotta nell'ambito del progetto di ricerca è computazionalmente conveniente perché evita inversioni matriciali usualmente coinvolte nel calcolo della rigidezza algoritmica e conserva una significativa velocità di convergenza asintotica. Un ulteriore filone di ricerca ha riguardato l'analisi non lineare di piastre sottili partendo dalla definizione del modello cinematico di Kirchhoff-Love e prendendo, poi, in considerazione il modello di piastra deformabile a taglio e il modello polare di piastra. L'analisi è stata condotta con un approccio svincolato dall'uso di un sistema esplicito di coordinate e ha portato alla formulazione di un modello che appare conveniente dal punto di vista computazionale. E stata, infine, affrontata la tematica della modellazione del danneggiamento nei calcestruzzi ad alte prestazioni.
Unità di ricerca n. 4 (Catania) - WP4. Formulazione di modelli costitutivi. Il modello meccanico utilizzato per il calcestruzzo è di tipo elasto-plastico danneggiativo. Il danneggiamento viene modellato attraverso una variabile interna, che rappresenta fenomenologicamente il livello di microfessurazione presente nel materiale. Il modello è descritto in L. Contrafatto, M. Cuomo, "Comparison of two forms of strain decomposition in an elastic-plastic damaging model for concrete", Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 15 (2007) S405-S423. Il modello descritto in questo lavoro è di tipo continuo, non ammettendo la presenza di cracks macroscopici. Una altra linea di ricerca, motivata dai risultati ottenuti con questo modello, è stata invece dedicata alla sviluppo di un modello fisico discontinuo. Per la modellazione del degrado chemo-meccanico è stato utilizzato un modello multifisico poro-elasto-plastico, basato sul concetto del Volume Averaging., che utilizza la teoria dei materiali porosi multifase. Il modello include, oltre al danneggiamento meccanico, un danneggiamento di tipo chimico considerato come un aumento di porosità. Oltre le variabili di stato cinematiche, di danno e la porosità, viene considerata la concentrazione delle specie ioniche la cui evoluzione chimica è regolata dai relativi. potenziali chimici Le interazioni chimiche sono descritte localmente mediante processi irreversibili dipendenti dal tempo, basati su un bilancio dei potenziali chimici (affinità). L'affinità si presenta generalmente accoppiata con le variabili di natura meccanica, per cui ne risulta la necessità di risolvere il problema costitutivo locale mediante algoritmi di tipo plasticità generalizzata. Il modello considera il trasporto delle specie ioniche sia per diffusione sia per convezione determinata dal gradiente di pressione. Il trasporto avviene sia nel liquido sia nel solido, per cui il coefficiente di diffusione è relativo ad un RVE omogeneizzato. Il coefficiente di diffusione dipende dalla porosità del materiale dalla microfessurazione (danneggiamento). Inoltre esso dipende anche dalla concentrazione stessa di ioni, includendo nella dipendenza anche gli effetti elettrostatici. Nei processi diffusivi considerati gli ionio possono essere assorbiti dalla pasta cementizia (bound ions) e reagire con essa, per cui la dipendenza del coefficiente di diffusione è dai soli ioni liberi. Dati sperimentali mostrano che la relazione fra gli ioni liberi e quelli legati è ragionevolmente indipendente dal tipo di calcestruzzo. Similmente è stato possibile estrapolare da dati indiretti la relazione fra il coefficiente di diffusione apparente e la porosità, che risulta anch'essa indipendente dal tipo di calcestruzzo. Si ottiene così, alla fine, una correlazione fra il coefficiente di diffusività apparente e il rapporto acqua/cemento, cioè in ultima analisi con la classe di calcestruzzo. WP 5. Il modello così elaborato è stato utilizzato per simulazioni della evoluzione del degrado per decalcificazione del calcestruzzo soggetto a flussi di acqua e per penetrazione di sali (cloruri) che portano alla de passivizzazione delle armature. Per il problema della corrosione sono state effettuate analisi non lineari relative ad una struttura da ponte situata in zona marina. Dipendentemente dal tipo di esposizione sono state ottenute le previsioni di vita utile affinché la concentrazione di cloruri non superi la soglia critica di de passivizzazione dell'armatura, che dipende dalla qualità del calcestruzzo. Le zone maggiormente a rischio sono quelle denominate "zone degli spruzzi", immediatamente al di sopra del pelo d'acqua. L'analisi riportata considera il calcestruzzo non danneggiato. In presenza di macrofessure, dovute ad azioni meccaniche la penetrazione degli ioni mostra dei picchi in corrispondenza delle fessure. La simulazione è stata eseguita modellando le fessure mediante elementi solidi in cui il coefficiente di diffusione assume valori prossimi a quello proprio della diffusione in acqua, secondo i risultati ottenuti da Djerbi et a. (2008), che concordano con quelli riportati da Shah (2008). Le analisi dimostrano che è necessario inserire nell'analisi oltre il danneggiamento dovuto alla micro fessurazione anche quello dovuto alla macrofessurazione. Pertanto nell'ambito del WP 5 dedicato alle analisi numeriche si è studiato un modello cinematico e costitutivo di tipo discontinuo che consentisse di inserire la presenza di discontinuità nei campi delle variabili di stato associati all'apertura di cracks. Il modello meccanico scelto è quello delle Elements with Embedded Discontinuities (EED) che implementa la cinematica delle discontinuità forti (SDA). Nell'ambito di questo metodo è stato dato un contributo innovativo nella formulazione consistente del principio variazionale che regge il problema, e nella specificazione delle condizioni di natura cinematica cui deve soddisfare il campo di arricchimento affinché non siano violate le condizioni al contorno e sia garantita la convergenza del metodo. Il metodo delle discontinuità forti è stato esteso al caso dell'equazione della diffusione, introducendo una discontinuità nel flusso, che genera una singolarità nella concentrazione di massa.
Unità di ricerca n. 5 (Cosenza) - Nell'ambito del progetto di ricerca è stato formulato un accurato modello per l'analisi dei tipici problemi di debonding all'estremità nelle travi rinforzate mediante piastre in laminato composito incollate esternamente. L'applicazione di piastre costituite da materiali fibro-rinforzati plastici (FRP) alla superficie esterna di elementi strutturali garantisce un tangibile miglioramento delle prestazioni meccaniche, con il minimo impatto sul sistema grazie alle ridotte modifiche apportate alla struttura stessa, in termini di peso e dimensioni. D'altro canto, gli studi sperimentali hanno mostrato come le migliorie in termini di rigidezza e resistenza apportate dall'applicazione del rinforzo siano accompagnate da una progressiva diminuzione della duttilità legata al fenomeno del debonding tipico dei sistemi rinforzati mediante piastre in FRP. A tal riguardo nell'ambito del progetto di ricerca è stato sviluppato uno studio numerico del problema del danneggiamento per delaminazione all'estremità di travi rinforzate mediante piastre in composito incollate sulla superficie esterna della trave stessa. I risultati ottenuti per via numerica, confrontati mediante accurate analisi 2D agli elementi finiti, mostrano la capacità del modello proposto di prevedere in maniera efficace il comportamento del sistema strutturale in presenza di debonding. Nell'ambito del progetto si è sviluppato, inoltre, un modello generale multiscala che si pone l'obiettivo di valutare le interazioni che sussistono tra modalità di degradazione differenti sia nella valutazione dell'energia di rilascio (ER) che nelle stima del percorso di frattura. In particolare, i meccanismi di danneggiamento e la loro interazione durante il processo di carico sono descritti attraverso variabili di caratterizzazione dello stato interno del materiale. La formulazione si basa su un modello termodinamicamente consistente, che fa uso del metodo delle variabili interne (MVI), sia per la stima dei processi di degradazione intralaminari che dei meccanismi di delaminazione. Altro obiettivo del progetto di ricerca è stato quello di proporre metodologie di analisi per lo studio dei fenomeni di delaminazione in ambito dinamico. I laminati sono usualmente realizzati da diversi strati incollati tra loro con un'elevata rigidezza del materiale composito nella direzione delle fibre, ma con una scarsa resistenza all'interfaccia tra gli strati stessi, che rappresenta, dunque, il più probabile percorso di frattura. Inizialmente il modello si è sviluppato secondo un approccio dinamico in crescita stazionaria, indirizzando successivamente l'analisi in un contesto completamente dinamico. In relazione alla complessità delle equazioni in gioco, la fase di calcolo ha fatto uso di tecniche numeriche agli elementi finiti in modo da proporre una metodologia di analisi sufficientemente generale per condizioni di carico e geometrica complessa. Nell'ambito del progetto di ricerca sono stati, inoltre, sviluppati modelli omogeneizzati in grado di valutare le proprietà macroscopiche di materiali compositi con microstruttura fortemente eterogenea, in presenza di evoluzione della stessa per fratture e contatto. In tale ambito è stata investigata, utilizzando il metodo degli elementi finiti accoppiato ai modelli di interfaccia, l'influenza dei fenomeni di danneggiamento microscopico e del contatto tra le superfici dei micro-cracks sulle effettive leggi costitutive macroscopiche dei materiali eterogenei. Si è osservato come, tenendo in conto l'evoluzione della microstruttura, associata alla crescita dei micro-cracks nonché all'attivazione delle forze di contatto tra le superfici danneggiate, nel modello micromeccanico proposto, i macrolegami costitutivi presentino un comportamento fortemente non-lineare. La non-linearità di tali leggi costitutive macroscopiche si riflette in una progressiva perdita di rigidezza del materiale, che può condurre alla rottura sotto un'assegnata macrodeformazione omogenea, accompagnata da una crescita di tipo instabile dei micro-cracks presenti, come osservato anche nelle simulazioni realizzate.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Unità di ricerca n. 1 (Padova) - Nessun problema riscontrato.
Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - Nessun problema riscontrato.
Unità di ricerca n. 3 (Napoli) - Nessun problema riscontrato.
Unità di ricerca n. 4 (Catania) - L'applicazione del metodo degli elementi con discontinuità inserite (EED) ha mostrato la necessità di affinare la procedura, in quanto la formulazione adottata relativamente ad un salto nel flusso ionico non modella correttamente il flusso parallelo alla fessura. Sviluppi futuri della ricerca perciò saranno tesi ad introdurre l'anisotropia nei riguardi della diffusione all'interno del modello di interfaccia. Il maggiore problema riguarda tuttavia la scarsità di dati sperimentali disponibili e attendibili, dato che la sperimentazione si presenta difficoltosa e soprattutto molto lenta.
Unità di ricerca n. 5 (Cosenza) - Nessun problema riscontrato.

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

	(mesi uomo) TOTALE
da personale universitario	*164*
altro personale	*142*
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	*16*

14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

Partecipazioni a convegni:

	Già svolti (numero)	Da svolgere (numero)	Descrizione
in Italia	*25*	*0*	*Unità di ricerca n. 1 (Padova) - 10 Convegni:* *1) Carmelo Majorana, Valentina Salomoni, Fabiana Gramegna, Luigi Prete and Beatrice Pomaro, "Mechanical analysis of materials and structures used as radiation shielding within SPES project, in the construction of a radioactive beam facilty", EURISOL Design Study Town Meeting, Pisa, 30 March - 1st April 2009. 2) C.E. Majorana, G.A. Khoury, V.A. Salomoni, "Effects of polypropylene fibres in concrete under fire conditions", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 3) G. Mazzucco, V. Salomoni, C. Majorana, C. Pellegrino, "Three-dimensional modelling of bond behaviour between concrete and FRP reinforcement", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 4) V.A. Salomoni, C.E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, "Structural Design of Parabolic-Trough Solar Concentrators", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 5) Giovanna Xotta, Valentina Salomoni, Carmelo Majorana and Gianluca Mazzucco, "Meso-scale modelling of concrete as a fully coupled porous material", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 6) Beatrice Pomaro, Valentina Salomoni, Fabiana Gramegna, Luigi Prete and Carmelo Majorana, "Radiation damage in the target area shielding of a facility for Selective Production of Exotic Species (SPES) Project", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 7) G. Mazzucco, V. Salomoni, C.Pellegrino, C. Majorana, "Role of normal and shear stresses at interface in three-dimensional behaviour of FRP strengthened concrete elements", XVIII Convegno GIMC, Siracusa, 22-24 Settembre 2010. 8) V.A. Salomoni, C.E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, "Stability analysis of steel liners within below-grade concrete tanks in solar power plants", XVIII Convegno GIMC, Siracusa, 22-24 Settembre 2010. 9) Giovanna Xotta, Valentina Salomoni and Carmelo Majorana, "Creep and Shrinkage Analysis of Concrete at 3D Meso-Scale", XVIII Convegno GIMC, Siracusa, 22-24 Settembre 2010. 10) Beatrice Pomaro, Valentina Salomoni, Fabiana Gramegna, Luigi Prete and Carmelo Majorana, "Effects of high energy atomic collisions and material behaviour of concrete barriers in nuclear physics experiments", XVIII Convegno GIMC, Siracusa, 22-24 Settembre 2010.* *Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - 3 Convegni.* *Unità di ricerca n. 3 (Napoli) - 1 Convegno.* *Unità di ricerca n. 4 (Catania) - 1 Convegno.* *Unità di ricerca n. 5 (Cosenza) - 10 Convegni.*
all'estero	*40*	*0*	*Unità di ricerca n. 1 (Padova) - 8 Keynote e invited papers nel 2008. 7 keynote e invited papers nel 2009. 8 keynote e invited papers nel 2010. (Descrizione di alcuni di questi):* *1) C.E.Majorana, V.A.Salomoni, "Coupled Analysis of Concrete and Reinforce Concrete Structures Subjected to Thermal Cyclic Loads", Minisymposium organisers, in Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2009, Ischia, Italy, June 8-11, 2009. 2) M.Guarnieri, C.E.Majorana, "Coupled Electrical-Magnetic-Thermal-Mechanical Modeling of Materials and Structures", Minisymposium organisers, in Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering, COUPLED PROBLEMS 2009, Ischia, Italy, June 8-11, 2009. 3) G.A.Khoury, C.E.Majorana, "NewCon - New Concrete Design Against Fire", Symposium organisers, International Symposium, London, U.K., 2010. 4) C.E. Majorana, V.A. Salomoni, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, "Analysis of thermally-induced vibrations in a pipe component of parabolic-trough solar concentrators, by a nonlinear dynamics approach", Keynote lecture, TCN CAE 2008, International Conference on Simulation based Engineering and Sciences, Venice, 16-17 October 2008. 5) C.E.Majorana, F.Corsi, K.Both, "Upgrading Safety in Tunnels Against Fire Hazard", Keynote lecture, Proc. of the 4rd Int. Conf. on Protection of Structures against Hazards, Beijing, China, October 22nd-25th, 2009, T.S.Lok, J.S.Y.Tan Eds, CI-Premier Ed., Singapore, 2009. 6) G.Khoury, C.E.Majorana, V.Salomoni, "Polypropylene fibres and explosive spalling", keynote paper, First International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Leipzig, Germany, September 3-5, 2009. 7) C.E.Majorana, V.Salomoni, G.Mazzucco, G.A.Khoury, "Analysis of concrete spalling process as a finite strain problem", keynote paper, First International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Leipzig, Germany, September 3-5, 2009. 8) C.E.Majorana, V.A.Salomoni, G.A.Khoury, "Computational and experimental analysis of spalling process in heated concrete", Keynote paper, 16th International Symposium, Plasticity 2010, St. Kitts, West Indies, Jan. 3-8, 2010. 9) V.Salomoni, C.E.Majorana, G.Mazzucco, G.Zavarise, "Dynamic thermo-electro-mechanical nonlinear behaviour of shell-to-shell in contact", invited paper, 16th International Symposium, Plasticity 2010, St. Kitts, West Indies, Jan. 3-8, 2010. 10) C.E.Majorana, G.Mazzucco, C.Pellegrino, V.A.Salomoni, "Numerical vs. experimental approach in steel welding processes", invited paper in Minisymposium "Numerical Simulation of Impact and Material Forming Problems" by C. Agelet de Saracibar, 16th International Symposium, Plasticity 2010, St. Kitts, West Indies, Jan. 3-8, 2010. 11) C.E.Majorana, G.A.Khoury, "Concrete and concrete structures subject to high temperature and fire", Minisymposium organisers, n. 80, ECCM10, Paris, France, 2010. 12) C.E.Majorana, F.Gramegna, "Computational methods for radiation shielding on nuclear facilities", Minisymposium organisers, n. 147, ECCM10, Paris, France, 2010.* *Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - 3 Convegni.* *Unità di ricerca n. 3 (Napoli) - 6 Convegni.* *Unità di ricerca n. 4 (Catania) - 4 Convegni.* *Unità di ricerca n. 5 (Cosenza) - 4 Convegni.*
TOTALE	**65**	**0**	

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	*42*	*Unità di ricerca n. 1 (Padova) - 12 articoli:* *1) C.E.Majorana, L.Sgarbossa, V.A.Salomoni, "New Methodologies in Teaching e-Structural Mechanics using www", Computer Applications in Engineering Education, J.Wiley & Sons, DOI 10.1002/cae.20167, Vol. 16, n. 3, October 2008, pp.189-210. (ISSN: 1061-3773). 2) V.A.Salomoni, C.E.Majorana, G.M.Giannuzzi, A.Miliozzi, "Thermal-fluid flow within innovative heat storage concrete systems for solar power plants", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow (Special Issue), Emerald Group Publishing Limited, ISSN: 0961-5539, DOI10.1108/09615530810899051, Vol. 18, No. 7/8, 2008, pp. 969-999. 3) C.E.Majorana, R.M.O.Pauletti, V.A.Salomoni, "Large Membrane Roofs Analysis: Non-linear Modelling of Structures, Connectors and Experimental Evidences", 2008, in press, ASCE's Journal of Architectural Engineering, 2010. 4) C.E.Majorana, V.Salomoni, "Dynamic nonlinear material behaviour of thin shells in finite displacements and rotations", Computer Modeling in Engineering & Sciences, Tech Science Press, ISSN: 1526-1492, vol. 33, n.1, pp. 49-84, 2008. 5) C.E.Majorana, V.Salomoni, G.Zavarise "Contact behaviour of elastoplastic damaged shells undergoing finite displacements and rotations", submitted for publication in Engineering Computations, 2009. 6) V.Salomoni, C.E.Majorana, M.Cristani, "Knowledge Representation in Civil and Structural Engineering", Recent Patents in Computer Science, Bentham Science Publ. Ltd., UK, 1(3), 2008. (ISSN: 1874-4796), 7) G. Mazzucco, V.A. Salomoni, C. Pellegrino, C.E. Majorana, "Three-dimensional modelling of bond behaviour between concrete and FRP reinforcement", in press in Engineering Computations, 2010. 8) C.E. Majorana, V.A. Salomoni, G. Mazzucco, G.A. Khoury, "An approach for modelling concrete spalling in finite strains", Mathematics and Computers in Simulation, doi:10.1016/j.matcom.2009.05.011, 80 (2010), pp. 1694-1712. 9) C.E.Majorana, B.Pomaro, "Dynamic stability of an elastic beam with viscoelastic-damaged translational and rotational supports", submitted for publication in ASME Journal. September 2009. 10) C.E.Majorana, B.Pomaro, "Dynamic stability of an elastic beam with viscoelastic translational and rotational supports", in press in Engineering Computations. May 2010. 11) B.Pomaro, V.A.Salomoni, F.Gramegna, G.Prete, C.E.Majorana, "Radiation damage evaluation on concrete within a facility for Selective Production of Exotic Species (SPES Project) at LNL", submitted for publication in Journal of Hazardous Materials, 2010. 12) B.Pomaro, V.A.Salomoni, F.Gramegna, G.Prete, C.E.Majorana, "An energy appraoach for radiation damage evaluation on concrete within a facility for Selective Production of Exotic Species (SPES Project) at LNL", submitted for publication in ASSM, 2010.* *Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - 9 articoli.* *Unità di ricerca n. 3 (Napoli) - 6 articoli.* *Unità di ricerca n. 4 (Catania) - 6 articoli.* *Unità di ricerca n. 5 (Cosenza) - 9 articoli.*
su altre riviste italiane	*0*	
su altre riviste straniere	*8*	*LIBRI O CAPITOLI DI LIBRI INTERNAZIONALI* *Unità di ricerca n. 1 (Padova) - 3 articoli e 1 libro. 1) C.E.Majorana, V.A.Salomoni, G.A.Khoury, "Stress-strain experimental-based modeling of concrete under high temperature conditions", Book Chapter, in B.H.V. Topping (Ed.), "Civil Engineering Computations: Tools and Techniques", Ch.14, Saxe-Coburg Publications, 319-346, 2007 (ISBN 978-1-874672-32-6). 2) V.A.Salomoni, C.E.Majorana, G.Mazzucco, G.Xotta, G.A.Khoury, "Multiscale Modelling of Concrete as a Fully Coupled Porous Medium", Book Chapter, Nova Science Publishers, Inc., 2009. 3) M.Grantham, C.E.Majorana, V.A.Salomoni, Eds., Concrete Solutions, Proc. of the 3nd Int. Conf. on Concrete Solutions, Padua, 29th June-2nd July 2009, CRC Press - Taylor & Francis Group, ISBN: 978-0-415-55082-6, pp. 1-466, 2009. 4) V.A.Salomoni, C.E.Majorana, G.M.Giannuzzi, A.Miliozzi, "New trends in designing parabolic trough solar concentrators and heat storage concrete systems in solar power plants", in "Solar Energy", ISBN 978-953-307-052-0, pp. 267-292, In-Tech, Vienna, 2009.* *Unità di ricerca n. 5 (Cosenza) - 4 articoli.*
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	*23*	*Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - 10 comunicazioni.* *Unità di ricerca n. 3 (Napoli) - 6 comunicazioni: 1. MAROTTI DE SCIARRA F. (2010). A thermodynamic approach to nonlocal strain damage. In: Advances and Trends in Structural Engineering, Mechanics and Computation. Cape Town (Sud Africa), 6-8 September 2010CRC Press/Balkema, p. ID#-632, ISBN/ISSN: 9780415584722. 2. MAROTTI DE SCIARRA F. (2010). On nonlocal strain damage, Inverse Problems. In: Design and Optimization Symposium. João Pessoa (Brazil), 25-27 August 2010, p. ID#-IPDO-049. 3. MAROTTI DE SCIARRA F. (2009). A thermodynamic approach to nonlocal elastoplasticity and related consistent tangent operator. In: Recent Advances in Nonlinear Mechanics. Kuala Lumpur (Malaysia), 24-27 August 2009, p. 45-46. 4. MAROTTI DE SCIARRA F. (2009). A symmetric formulation for nonlocal finite element analysis. In: 18th International Conference on Computer Methods in Mechanics. Zielona Gora (Polonia), 18-21 May 2009, p. 411-412. 5. Romano G., Barretta R., Barretta A.; 2008; On the least action principle; ISBN: 978-84-96736-55-9; 8th WCCM08 - 5th ECCOMAS 2008, B.A. Schrefler and U. Perego (eds), CIMNE, Barcelona, Spain. 6. Romano G., Barretta R., Diaco M.; 2008; The First Principle of Thermodynamics and the Virtual Temperatures Theorem; Symposium on Trends in Applications of Mathematics to Mechanics (STAMM), Levico (Trento), Italy, September 22-25, 2008.* *Unità di ricerca n. 4 (Catania) - 7 comunicazioni.*
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	*12*	*Unità di ricerca n. 1 (Padova) - 6 comunicazioni:* *1) Carmelo Majorana, Valentina Salomoni, Fabiana Gramegna, Luigi Prete and Beatrice Pomaro, "Mechanical analysis of materials and structures used as radiation shielding within SPES project, in the construction of a radioactive beam facilty", EURISOL Design Study Town Meeting, Pisa, 30 March - 1st April 2009. 2) C.E. Majorana, G.A. Khoury, V.A. Salomoni, "Effects of polypropylene fibres in concrete under fire conditions", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 3) G. Mazzucco, V. Salomoni, C. Majorana, C. Pellegrino, "Three-dimensional modelling of bond behaviour between concrete and FRP reinforcement", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 4) V.A. Salomoni, C.E. Majorana, G.M. Giannuzzi, A. Miliozzi, "Structural Design of Parabolic-Trough Solar Concentrators", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 5) Giovanna Xotta, Valentina Salomoni, Carmelo Majorana and Gianluca Mazzucco, "Meso-scale modelling of concrete as a fully coupled porous material", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. 6) Beatrice Pomaro, Valentina Salomoni,*

		Fabiana Gramegna, Luigi Prete and Carmelo Majorana, "Radiation damage in the target area shielding of a facility for Selective Production of Exotic Species (SPES) Project", XIX Congresso AIMETA, Ancona, 14-17 Settembre 2009. *Unità di ricerca n. 2 (Bologna) - 3 comunicazioni.* *Unità di ricerca n. 3 (Napoli)- 1 comunicazione.* *Unità di ricerca n. 4 (Catania) - 2 comunicazioni.*
rapporti interni	*0*	
brevetti depositati	*0*	
TOTALE	**85**	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 19/12/2010 05:33 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.