

# METODOLOGIE INNOVATIVE PER LA VALUTAZIONE E LA RIDUZIONE DEL RISCHIO ASSOCIATO AGLI IMPIANTI DI GENERAZIONE ELETTRICA

Guido Mazzà\*, Luciano Nigro\*, Flavio Parozzi\*

\*CESI, Via Rubattino 54, 20134 - Milano (Italy)

gmazza@cesi.it

nigro@cesi.it

parozzi@cesi.it

## SOMMARIO

Nella presente memoria sono descritti alcuni dei risultati della ricerca effettuata da CESI nel triennio 2000-2003, con il finanziamento del Fondo per la Ricerca di Sistema per il settore elettrico istituito con il Decreto MICA del 26 gennaio 2000, relativamente alla sicurezza degli impianti per la produzione di energia elettrica e del territorio circostante.

Più precisamente vengono presentate metodologie e modelli di calcolo, sviluppati a supporto dei potenziali beneficiari dell'attività di ricerca (gestori degli impianti, responsabili della pianificazione e sicurezza del territorio, Autorità di controllo e Pubbliche Amministrazioni, pubblica opinione), relativi ai seguenti temi:

- sicurezza degli impianti idroelettrici e del territorio circostante, con particolare riferimento all'interazione con fenomeni naturali catastrofici;
- sicurezza degli impianti termoelettrici nei riguardi di esplosioni ed incendi.

## 1. INTRODUZIONE

Come avviene per ogni tipologia di impianto industriale, anche nell'esercizio degli impianti di generazione dell'energia elettrica è richiesta la capacità di prevenire e gestire in modo consapevole situazioni di pericolo determinate sia da potenziali eventi incidentali correlati all'impianto stesso, sia da eventi naturali (terremoti, frane, inondazioni) che interagiscono con esso.

La diffusione capillare degli impianti sull'intero territorio nazionale ne aumenta il rischio potenziale, nella misura in cui gli effetti di tali incidenti, se non opportunamente controllati, possono travalicare il perimetro dell'impianto e ricadere sul territorio circostante e sulla popolazione che vi risiede. Da qui la necessità di porre particolare attenzione ai problemi della sicurezza, alla riduzione della vulnerabilità degli impianti e alla mitigazione del rischio.

Nell'ambito delle attività di ricerca svolte da CESI su finanziamento del Fondo Ricerca di Sistema per il settore elettrico nazionale, istituito con Decreto MICA del 26 gennaio 2000, è stato condotto un progetto specifico, denominato SISIGEN, sul tema della sicurezza dei sistemi di generazione. In tale progetto sono stati sviluppati metodologie, tecnologie e strumenti che possano essere di aiuto agli operatori e ai beneficiari del sistema elettrico nelle attività di valutazione e mitigazione del rischio, nella pianificazione del territorio e nella gestione dell'emergenza.

In particolare, le principali linee di ricerca perseguite in SISIGEN con riferimento alla sicurezza degli impianti di generazione elettrica sono di seguito brevemente sintetizzate.

### a) Impianti idroelettrici e vallate sottese:

- modelli matematici per la simulazione di fenomeni estremi (ipotesi di caduta di frane negli invasi, ipotesi di crollo di dighe, effetti delle piene negli alvei sottesi da opere di sbarramento, ecc.)
- modelli matematici innovativi per le verifiche di sicurezza delle dighe e delle opere accessorie;
- metodologie e sistemi informatici per la valutazione e la gestione del rischio;
- sistemi di monitoraggio avanzati per il controllo delle sponde dei bacini e tecnologie innovative per la stabilizzazione di versanti;
- tecniche innovative per la diagnostica e il ripristino strutturale.

b) Impianti termoelettrici

- messa a punto di metodologie per la quantificazione del rischio negli impianti termoelettrici;
- realizzazione di modelli di simulazione avanzati per l'analisi degli effetti di incendi e deflagrazioni all'interno di ambienti chiusi (sviluppo di calore e di fumi tossici, propagazione del fronte di fiamma, analisi degli effetti di potenziali esplosioni).

Nei paragrafi che seguono vengono sinteticamente descritti alcuni dei principali risultati conseguiti.

## 2. SICUREZZA DEGLI SBARRAMENTI E RISCHIO STRUTTURALE

Le attività di ricerca sviluppate in questo ambito si possono suddividere secondo tre linee direttrici: a) lo sviluppo di modellistica numerica innovativa per l'analisi strutturale delle dighe; b) lo sviluppo di metodologie per la valutazione della vulnerabilità strutturale delle dighe da adottare nelle analisi di rischio; c) la messa a punto di metodi di indagine sperimentali per la diagnostica ed il ripristino strutturale. La scelta degli argomenti da prendere in esame nello sviluppo della ricerca è derivata dalle indicazioni emerse nell'ambito della partecipazione ad iniziative condotte in ambito internazionale dell'ICOLD, la Commissione Internazionale delle Grandi Dighe, e dal Comitato italiano (ITCOLD) affiliato all'organizzazione internazionale, nonché delle esperienze condotte nell'ambito della Direzione Studi e Ricerche dell'ENEL confluita in larga parte nella società CESI a seguito della privatizzazione dell'ENEL.

Di seguito vengono brevemente descritti, per ciascuna linea direttrice, i principali risultati raggiunti.

### a) Sviluppo di modellistica numerica innovativa per l'analisi strutturale delle dighe

L'analisi numerica in campo strutturale ha raggiunto, oggi, un livello molto avanzato ed esiste una larga disponibilità di codici di calcolo commerciali che consentono di affrontare, in linea di principio, una vasta gamma di problemi sia in campo statico, sia dinamico, per analisi di tipo lineare e non lineare. Tuttavia, mentre in vari settori industriali (quali ad esempio quello aeronautico, automobilistico, off-shore, ecc.) l'uso dei codici di calcolo è parte integrante del processo progettuale, nel settore delle dighe l'adozione di metodi di calcolo avanzati è ancora piuttosto limitata. La ragione in parte è associata ad una forte stagnazione del mercato (la costruzione di nuove dighe è estremamente ridotta nel nostro paese), in parte è dovuta ai vincoli imposti da una normativa di settore obsoleta che necessita di essere rivista profondamente per metterla al passo con lo stato dell'arte. Una ulteriore ragione di natura più strettamente tecnica alla base del limitato uso di codici di calcolo è legata alla difficoltà di modellare strutture complesse sia per tipologia, sia per materiali (naturali, quali terre e rocce, e artificiali, quali il calcestruzzo), sia per le complesse interazioni che tali strutture hanno con il mondo circostante (con l'acqua di invaso e con la fondazione). Le attività di ricerca condotte nell'ambito del progetto SISIGEN hanno riguardato principalmente le problematiche tecniche, con una particolare attenzione alle loro ricadute sulla normativa. Di seguito si riportano alcuni risultati ritenuti di particolare interesse.

- Sviluppo di una procedura di calcolo innovativa per l'analisi di stabilità allo scorrimento di dighe a gravità arcuate. Per questa tipologia di dighe, la normativa vigente prescrive che l'analisi di stabilità allo scorrimento per l'azione esercitata dalla spinta dell'acqua d'invaso, oltre che per gli eventuali carichi sismici, debba essere effettuata adottando uno schema piano, prescindendo, quindi, dalla tridimensionalità della struttura. D'altro canto, molte dighe a gravità presentano un andamento planimetrico debolmente curvo (la tradizione progettuale ha adottato questa scelta per poter far conto su una riserva di resistenza aggiuntiva dovuta all'effetto arco che si svilupperebbe nella struttura a fronte di una sua tendenza a muoversi verso valle sotto l'azione dei carichi). Nell'ambito del progetto è stato sviluppato un procedimento di calcolo che mantiene la semplicità concettuale dell'approccio piano previsto dalla normativa vigente, ma che consente di tener conto della effettiva tridimensionalità della struttura. Il metodo sviluppato potrà essere integrato nella nuova normativa attualmente in fase di definizione.
- Analisi del comportamento delle dighe a volta. Tra le dighe murarie, le dighe a volta rappresentano certamente le strutture più ardite e caratterizzate da un comportamento più complesso. Nella prassi progettuale e realizzativa italiana, questa tipologia di dighe presenta sovente un elemento strutturale in calcestruzzo denominato "pulvino" che viene realizzato tra la fondazione e la diga propriamente detta. Lo scopo del pulvino è quello di ridurre gli effetti delle irregolarità geometriche della valle nella quale la diga è costruita; per la presenza di un giunto costruttivo tra il pulvino e la volta della

diga, inoltre, alla diga sono anche permesse rotazioni alla base. All'epoca della progettazione di questa tipologia di opere, i mezzi di calcolo non consentivano di analizzare l'effettivo comportamento strutturale che, peraltro, risulta di tipo non lineare proprio per la presenza del giunto perimetrale. Il progettista doveva, quindi, far ricorso a schematizzazioni semplificate, basando il proprio convincimento relativamente alla bontà della soluzione scelta sull'intuito e l'esperienza. Lo studio sviluppato dal CESI ha permesso di mettere in luce su una base più razionale quali siano gli effettivi benefici di tale soluzione costruttiva. Nelle Figure 2.1, 2.2, 2.3 è mostrato un tipico risultato ottenuto dallo studio.

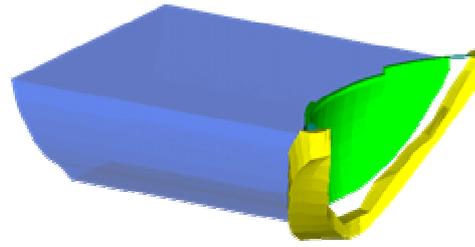


Fig. 2.1 - Studio dell'influenza del giunto perimetrale sul comportamento delle dighe a volta: analisi dell'effetto dei carichi termici stagionali

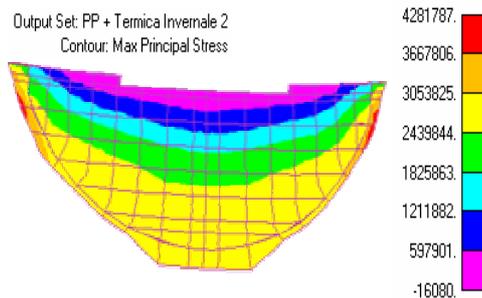


Fig. 2.2 - Distribuzione degli sforzi principali massimi in **assenza** dei giunti del pulvino

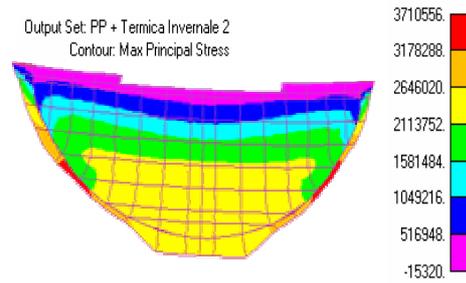


Fig. 2.3 - Distribuzione degli sforzi principali massimi in **presenza** dei giunti del pulvino

- Sviluppo di una legge costitutiva per la modellazione del fenomeno alcali-aggregato nel calcestruzzo delle dighe. Il fenomeno alcali-aggregato costituisce per il calcestruzzo in genere, e per quello delle dighe in particolare, un problema di notevole rilievo in quanto determina, dopo una fase di latenza che può durare anche qualche decennio, una espansione del materiale e di conseguenza, in presenza di vincoli che si oppongono a tale espansione, l'insorgenza di coazioni che possono dar luogo a stati fessurativi sempre indesiderati. L'attività di ricerca ha riguardato l'individuazione di una legge costitutiva adatta a simulare il comportamento espansivo, la sua implementazione in un codice di calcolo e la sua validazione nell'ambito di un benchmark internazionale organizzato dal Comitato tecnico sul calcolo delle dighe dell'ICOLD.

**b) Sviluppo di metodologie per la valutazione della vulnerabilità strutturale delle dighe da adottare nelle analisi di rischio**

L'obiettivo della ricerca ha riguardato l'individuazione di criteri oggettivi di valutazione che, a partire dall'analisi comparativa del rischio associabile ad una popolazione di dighe, consentano di definire la priorità di intervento per quanto attiene alla frequenza delle ispezioni da condurre sulle opere, al livello di ridondanza dei sistemi di controllo, agli interventi manutentivi. La ricerca si è orientata verso l'individuazione di modelli di *Risk Assessment* per le dighe a cui è seguita l'implementazione in un programma di calcolo. Il modello scelto (Andersen, Chouinard, Hover and Back, 1999) prevede la valutazione di indici numerici che quantificano lo stato di sicurezza di una diga secondo indicatori di probabilità di rottura e indicatori di pericolosità, tenendo conto dei possibili meccanismi di collasso del gruppo di dighe indagate. L'indice di rischio globale di ciascuna diga viene ricavato sommando i diversi indici di rischio parziali associati ai differenti modi di rottura. In tal modo si definisce un criterio oggettivo per stabilire una scala di priorità che potrà guidare l'allocazione ottimale delle risorse.

**c) Messa a punto di metodi di indagine sperimentali per la diagnostica e il ripristino strutturale**

Le attività di ricerca sperimentali hanno riguardato sia le dighe murarie, sia le dighe di materiali sciolti. Le problematiche affrontate sono state molteplici. Di seguito si riportano alcuni risultati particolarmente significativi.

- Indagini sperimentali in laboratorio sulla reazione alcali-aggregato nei calcestruzzi. Il fenomeno è già stato descritto nel precedente punto a). Le ricerche di laboratorio hanno riguardato diversi

aspetti: i) la valutazione dell'efficacia di sali di litio (carbonato e nitrato di litio) nella prevenzione della reazione alcali-aggregato mediante prove di espansione di tipo accelerato e ultra accelerato (immergendo i campioni in soluzioni di idrossido di sodio a 80°C e 150°C rispettivamente) al fine di individuare i dosaggi ottimali di sali ; ii) la previsione del comportamento degli aggregati reattivi agli alcali mediante il confronto tra espansioni misurate su campioni in condizioni naturali e in condizioni ultra accelerate; iii) la valutazione del potenziale residuo di espansione del calcestruzzo misurato su campioni contenenti aggregati con differenti livelli di reattività. La ricerca ha consentito di migliorare i livelli di conoscenza di un fenomeno che solo negli ultimi anni è stato chiaramente identificato per le dighe italiane. Le Figure 2.4 e 2.5 illustrano la problematica in oggetto e mostrano un esempio dei risultati ottenuti.

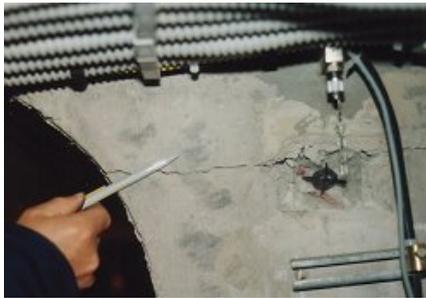


Fig. 2.4 - Invecchiamento e degrado delle dighe in calcestruzzo per effetto di fenomeni espansivi dovuti alla reazione alcali-aggregato.

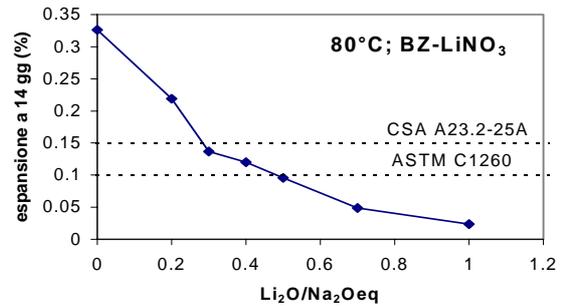


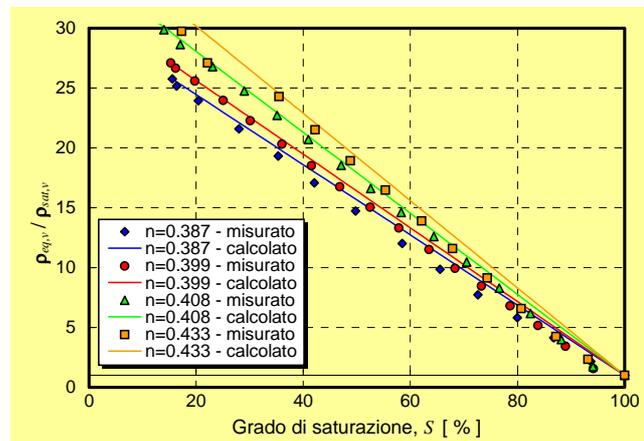
Fig. 2.5 – Indagine sperimentale sui metodi di prevenzione mediante aggiunta nel calcestruzzo di inibitori (sali di litio)

- Tecniche innovative di monitoraggio per l'individuazione dell'erosione interna nelle dighe di materiali sciolti (dighe in terra). La filtrazione di acqua nelle dighe di materiali sciolti in situazioni particolari (ad esempio per scarsa compattazione degli strati di materiale, per l'insorgenza di forti gradienti idraulici) può attivare una localizzazione di fenomeni di erosione interna che possono provocare gravi danni alla diga, fino al suo crollo. La ricerca si è indirizzata alla individuazione di tecniche di monitoraggio basate sulla misura di proprietà termo-fisiche (conducibilità termica e resistività elettrica) dei materiali sciolti che possono essere messe in relazione con parametri quali la porosità, la granulometria, la permeabilità, il grado di saturazione dei materiali stessi. La variazione di tali parametri può essere messa in relazione con l'insorgenza del fenomeno di erosione interna sopra citato. Nelle Figure 2.6 e 2.7 sono riportati l'apparecchiatura messa a punto per la valutazione della resistività elettrica dei terreni in funzione del grado di saturazione e alcuni risultati della sperimentazione. La ricerca ha dimostrato la possibilità di individuare precocemente l'insorgenza del fenomeno dell'erosione interna monitorando opportunamente le dighe in terra.



Fig.2.6 - Appareto per la valutazione della resistività elettrica dei terreni in funzione del grado di saturazione

Fig. 2.7 - Variazione della resistività elettrica dei terreni col grado di saturazione: confronto tra risultati sperimentali e quelli ottenuti da un modello proposto.



- Valutazione del degrado in geomembrane in PVC adottate per il rivestimento delle dighe. Le geomembrane in PVC sono sempre più estesamente utilizzate per impermeabilizzare il paramento di monte di alcune tipologie di dighe, in particolare di quelle vecchie, sia di materiali sciolti, sia murarie. La ricerca aveva come obiettivo la messa a punto di un metodo di indagine sui fenomeni di degrado che interessano le geomembrane per l'azione combinata delle variazioni climatiche stagionali, dei raggi UV e per l'azione dell'acqua dell'invaso. Tali azioni determinano variazioni delle proprietà chimico-fisiche e meccaniche delle geomembrane, rendendole nel tempo non più idonee ad assolvere al loro compito di protezione idraulica. La ricerca è stata condotta con riferimento ad un caso reale con il prelievo e la caratterizzazione di campioni di geomembrana e con l'esecuzione di prove di invecchiamento accelerato. Il metodo di indagine proposto ha dimostrato la possibilità di stimare, a partire dallo stato corrente del materiale, la sua vita residua a fronte dei parametri prestazionali richiesti alla geomembrana (composizione della miscela, contenuto in plastificanti, spessore, massa volumica, durezza, flessibilità a freddo, stabilità dimensionale, resistenza a trazione). Le Figure 2.8 e 2.9 mostrano un esempio di applicazione di una geomembrana e alcuni risultati della sperimentazione di laboratorio.



Fig. 2.8 - Interventi di ripristino della tenuta del paramento di monte su dighe in calcestruzzo, mediante geomembrane in PVC.

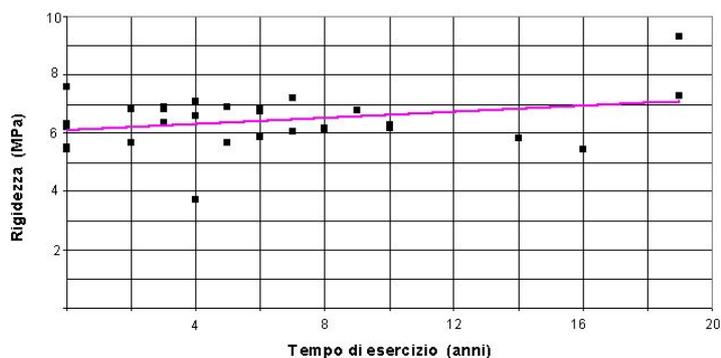


Fig. 2.9 - Risultati sperimentali: variazione della rigidità in funzione del tempo per alcuni tipi di geomembrane in PVC.

### 3. SICUREZZA DEL TERRITORIO E RISCHIO IDRAULICO

La sicurezza del territorio circostante un impianto idroelettrico è strettamente connessa alla presenza dell'impianto stesso. Infatti al di là delle problematiche relative alla sicurezza strutturale delle opere civili e di adduzione (condotte, gallerie, ecc.), l'impianto può attenuare (ad es. laminazione delle piene) o amplificare (ad es. frane e/o valanghe nei serbatoi) gli effetti di eventi naturali spesso di tipo catastrofico.

In tale ambito la Ricerca svolta da CESI ha inteso mettere a disposizione del gestore dell'impianto e delle strutture pubbliche preposte alla pianificazione ed alla sicurezza del territorio, metodologie e modelli a supporto delle attività di prevenzione dai rischi.

Di seguito si riportano alcuni dei principali risultati della ricerca, nell'ambito delle tematiche generali a cui fanno riferimento:

#### a) Sicurezza dei versanti e degli invasi

- Monitoraggio delle frane. Allo scopo di tenere sotto controllo l'evoluzione di un fenomeno franoso, è stata messa a punto una tecnica innovativa di elaborazione e di rappresentazione degli spostamenti di un versante instabile, basata sul sistema topografico satellitare GPS, interfacciato con sistemi GIS georeferenziati. Tale tecnica consente la rappresentazione (in ambiente ArcView) degli spostamenti planimetrici del corpo in frana mediante isolinee riportate su una vista tridimensionale del versante, ed è stata adottata per la rappresentazione degli spostamenti della frana di tipo

gravitativo che interessa la diga di Beauregard (Val d'Aosta), assunta come case-history di riferimento.

- Modelli di simulazione di colate di fango/detriti. Sono stati sviluppati modelli matematici monodimensionali e bidimensionali, ed i relativi codici di calcolo, per la simulazione della propagazione di colate di fango e di detriti, utilizzando i risultati di sperimentazioni fisiche condotte in laboratorio con una canaletta idraulica appositamente realizzata, per la messa a punto dei modelli reologici (Fig. 3.1). La propagazione del materiale solido viene descritta come il moto di un pseudo-fluido. In particolare è stato realizzato un codice bidimensionale che implementa un modello reologico di tipo granulo-inerziale in grado simulare una colata detritica (debris flows). Il modello è stato applicato al caso della propagazione di una colata detritica in una vasca di accumulo (Fig3.2).



Fig 3.1 - Impianto sperimentale per la simulazione di colate di fango

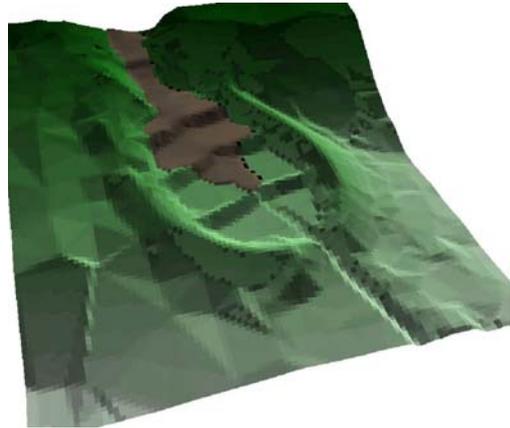


Fig 3.2 - Modello matematico bidimensionale di una colata di detriti in una vasca d'accumulo

- Modelli matematici della generazione e propagazione di onde nei bacini prodotte da frane e valanghe. Una problematica particolarmente importante per la sicurezza di un invaso è quella relativa ai possibili effetti della caduta in esso di una frana o di una valanga. Oltre all'aspetto della sicurezza strutturale della diga, esiste infatti il ben noto problema dell'"overtopping", cioè dello scavalcamento della diga da parte dell'onda generata dalla frana. Allo scopo di determinare con sufficiente accuratezza l'altezza di tale onda, sulla base delle caratteristiche della frana (dimensioni, velocità, etc.) e del volume di acqua contenuto nell'invaso, è stata sviluppata una metodologia speditiva che estrapola ai casi pratici i risultati di numerose prove sperimentali di laboratorio. Poiché tale software, denominato IMPACT, fornisce indicazioni molto approssimative, sono stati realizzati due codici di calcolo bidimensionali ai volumi finiti (Fig. 3.3), basati sulle "shallow water equations", per la simulazione dello scivolamento della frana lungo un pendio (FRANA 2D) e per la simulazione della propagazione dell'onda impulsiva in bacini estesi. (ONDA 2D). Tutti i programmi sono stati verificati mediante il confronto con i risultati di prove sperimentali effettuate presso il Politecnico di Zurigo (fig. 3.4)

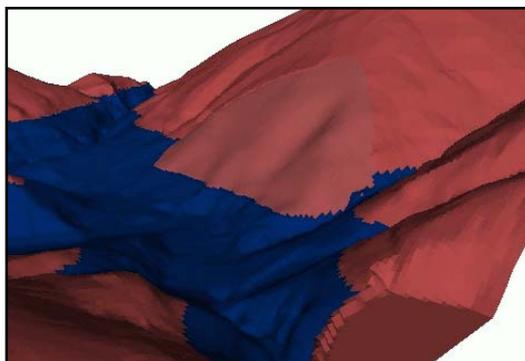


Fig 3.3 - Codici di calcolo FRANA2D e ONDA2D: visualizzazione tridimensionale dei risultati

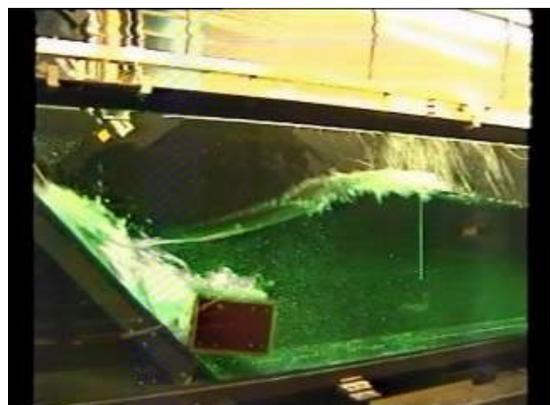


Fig 3.4 - Impianto sperimentale (presso il Politecnico di Zurigo) per la simulazione della caduta di frane in un invaso

**b) Sicurezza dei canali e degli alvei fluviali**

- Erosione dell'alveo indotta da sbarramenti fluviali. La costruzione o il rifacimento di opere di sbarramento fluviali o di altri manufatti può provocare fenomeni di erosione localizzata e conseguenti problemi di instabilità strutturale delle opere stesse. In generale il fenomeno viene analizzato mediante la realizzazione di modelli fisici in scala. La ricerca in questione ha avuto come obiettivo la messa a punto di modelli numerici previsionali, che in prospettiva possano fornire informazioni analoghe a quelle di un modello fisico. A questo scopo, è stato progettato e realizzato un set-up sperimentale per l'analisi del fenomeno a valle di uno sbarramento, secondo una schematizzazione tridimensionale. Si sono quindi eseguite prove sperimentali per la valutazione delle caratteristiche del campo di moto e della morfologia del fondo eroso. E' stato realizzato un modello numerico pienamente tridimensionale a fondo mobile, inclusivo degli effetti della turbolenza, della variazione spaziale della superficie libera, della possibilità di erodere e depositare sedimenti. Il modello è stato calibrato e confrontato con le misure disponibili dal set-up sperimentale. I risultati sono promettenti, anche se vanno migliorati ulteriormente, sia dal punto di vista del modello matematico che dei tempi di calcolo (Fig. 3.5).

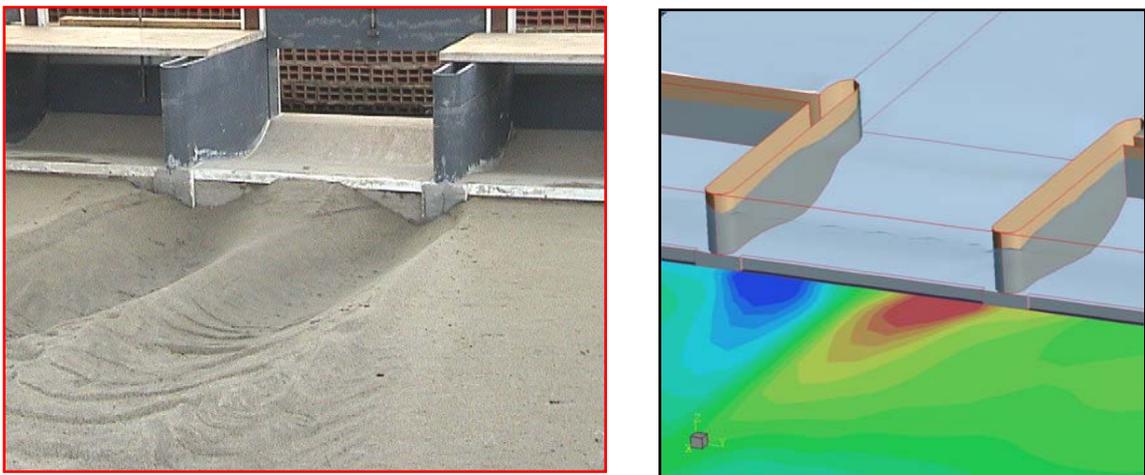


Fig. 3.5 - Modello fisico (a sinistra) e modello matematico tridimensionale (a destra) per lo studio dell'erosione a valle di una traversa

- Tecnologie per la protezione delle sponde di fiumi e canali. L'attività di ricerca si è indirizzata allo sviluppo di una metodologia sperimentale per la valutazione del comportamento nel tempo dei filtri di protezione di sponde di fiumi e canali basati sull'uso di materiali geotessili. Si sono svolte indagini sperimentali che hanno comportato la messa a punto di un'apparecchiatura innovativa per la valutazione delle caratteristiche di permeabilità di geosintetici con funzioni di filtro e per lo studio della filtrazione attraverso geotessili in condizioni di flusso unidirezionale e ciclico. Sulla base dei risultati delle prove di laboratorio, si sono verificati i criteri di filtrazione, vale a dire il criterio di ritenzione ed il criterio di permeabilità. In particolare, il geotessile applicato sulle sponde del canale soddisfa il criterio di ritenzione anche dopo un certo periodo di tempo dalla posa in opera. Inoltre, il criterio di permeabilità è ampiamente soddisfatto in quanto la permeabilità del geotessile è di diversi ordini di grandezza superiore a quella del terreno di base costituito dal rilevato arginale. I criteri di filtrazione, messi a punto e verificati per il caso in esame, potranno essere estesi ad una più ampia casistica relativamente all'impiego di questa tipologia di materiali come filtri di protezione nelle sponde di canali e sponde di corsi d'acqua in generale.

**c) Onde di piena provocate da crollo della diga o da apertura scarichi**

- Modelli matematici avanzati per la simulazione di onde di piena. Le attività svolte hanno riguardato lo sviluppo, l'implementazione e la validazione sperimentale di modelli idrodinamici uni- e bidimensionali ai volumi finiti per la simulazione della propagazione di onde di piena in alvei

meandriiformi, in presenza di golene e infrastrutture, e in aree urbane. Sulla base dei risultati di prove sperimentali già condotte su di un modello fisico a grande scala, riprodotto un tratto di una vallata alpina ed alcune infrastrutture quali ponti, traverse fluviali, costruzioni sparse, sono stati validati differenti modelli (Fig. 3.6) Uno di tali codici è stato ottimizzato per la simulazione di transitori spazio-temporali estremamente bruschi quali la rottura totale o parziale di sbarramenti, le esondazioni d'alveo e i crolli arginali, la propagazione in alveo di onde di shock, sia su domini geometricamente semplici che su configurazioni planimetriche complesse ed articolate.

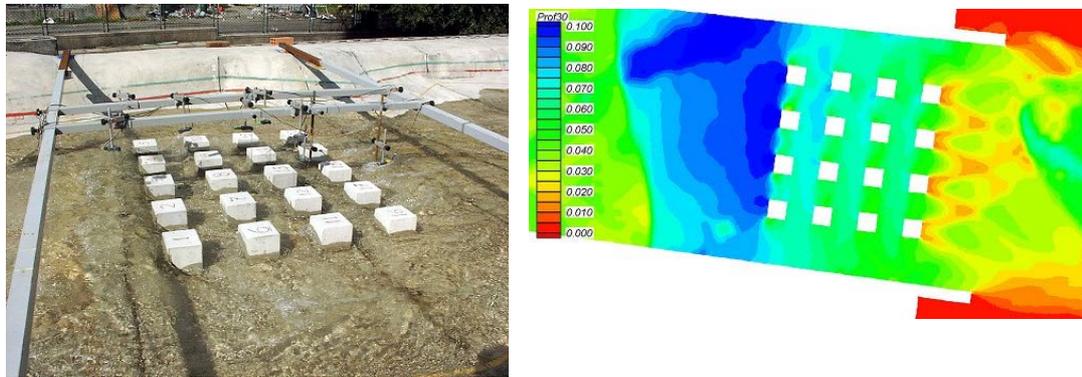


Fig. 3.6 - Modello fisico e modello matematico bidimensionale per lo studio dell'impatto di un'onda di piena in aree urbane

- Sviluppo di un simulatore dell'apertura delle opere di scarico di una diga per la gestione di situazioni di emergenza e per il training degli operatori. L'obiettivo è stata la messa a punto di un simulatore degli scarichi di un invaso durante le piene, che possa essere utilizzato come strumento di supporto alle decisioni durante le emergenze oppure come sistema per l'addestramento del personale. La società Edison ha fornito la propria procedura operativa utilizzata nella gestione delle emergenze idrauliche, e ha collaborato alla esecuzione di un test di validazione. Il software, sviluppato per PC, consente di simulare e visualizzare sul monitor, in tempo reale durante il training, la variazione delle principali grandezze coinvolte nell'evento di piena, quali il livello del lago e la portata scaricata. L'operatore può effettuare le manovre ritenute necessarie, ad esempio agire sull'apertura degli scarichi e/o sull'avviamento-arresto delle turbine, tramite una interfaccia grafica di semplice uso. Il software è dotato di un HELP multimediale, basato su sequenze filmate, immagini, voce e testo, che consente una più agevole comprensione delle caratteristiche e delle modalità di impiego del sistema.

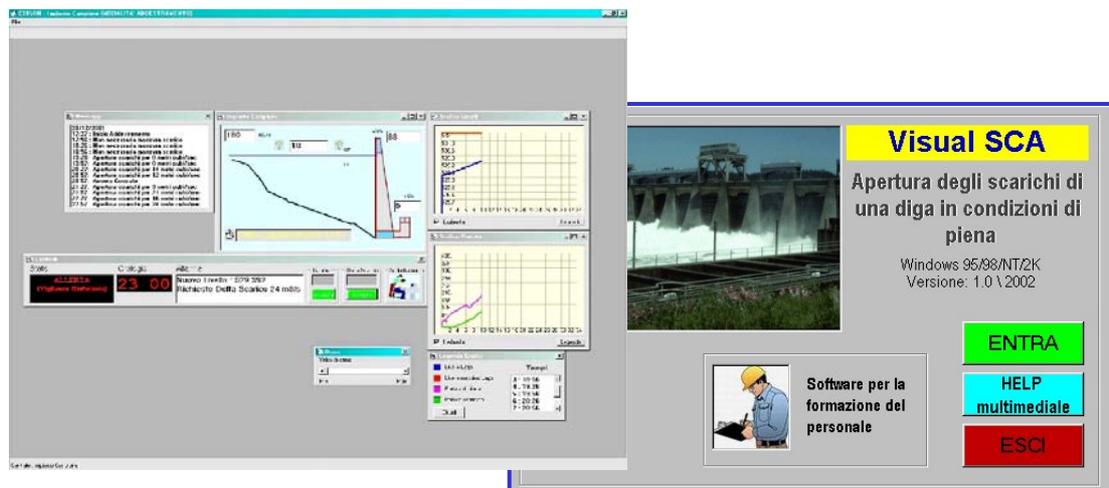


Fig. 3.7 - Software Visual SCA per il training degli operatori addetti alle manovre sugli scarichi di una diga.

#### 4. RISCHIO DERIVANTE DA INCENDI ED ESPLOSIONI

Per quanto riguarda il rischio derivante da gravi incidenti negli impianti di generazione termoelettrica, la ricerca CESI ha consentito sia la messa a punto di metodi di analisi adeguati alla situazione italiana sia lo sviluppo di strumenti di calcolo originali.

Con riferimento agli impianti a ciclo combinato e a carbone, nonché agli scenari più significativi, è stato affrontato il tema dei transitori incidentali di tipo termico in un'ottica generale, estendendo il campo di analisi a tutte quelle situazioni in cui lo sviluppo di calore e di fumi tossici può causare danni sia al personale sia alle strutture degli impianti.

##### a) Analisi del rischio

Mediante l'impiego di tecniche HAZOP (Hazard & Operability), dei metodi dell'albero dei guasti (Fault Tree Analysis) e dell'albero degli eventi (Event Tree Analysis) è stata avuta la conferma dei valori estremamente bassi, e di conseguenza largamente accettabili, di rischio esterno collegati al normale esercizio di una tipica centrale a ciclo combinato.

Questo risultato è stato successivamente confermato anche nel caso di rischio d'area associato ad un tipico impianto termoelettrico convenzionale policombustibile, dove non sembra che gli incidenti ipotizzati possano realisticamente provocare gravi danni né alle persone né all'ambiente circostante se non in una fascia immediatamente a ridosso dell'area della centrale.

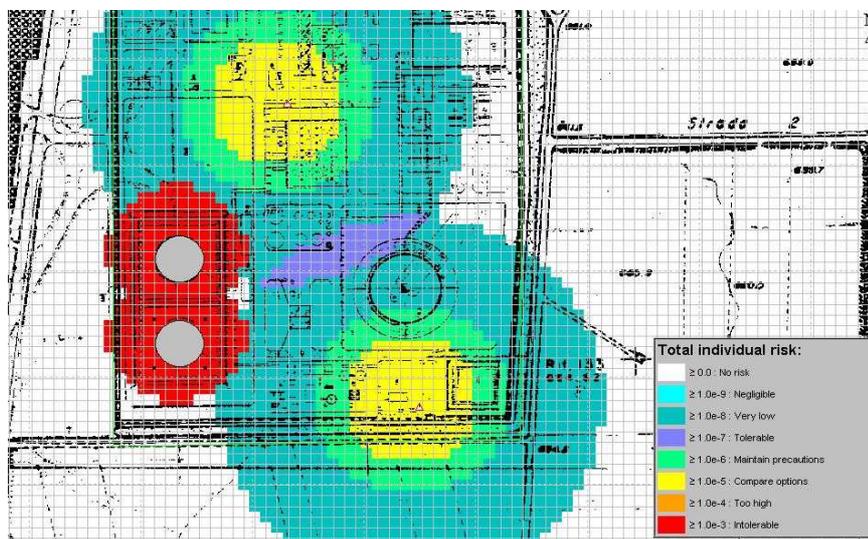
Relativamente alle problematiche di sicurezza dei depositi di stoccaggio, dopo aver classificato le centrali in base alla modalità di funzionamento ed al tipo di combustibile impiegato, sono stati discussi i possibili scenari di rischio collegati all'impiego di combustibili liquidi, di gas naturale o di carbone.

Le informazioni acquisite sono state organizzate allo scopo di identificare su base nazionale i siti potenzialmente interessati nello studio di fenomeni esplosivi originati da nubi di vapori infiammabili, fornendo indicazioni sul rischio associato a tali eventi incidentali.

Per quanto concerne la quantificazione del rischio individuale e societario, sono state eseguite applicazioni dimostrative a sequenze incidentali di un impianto a ciclo combinato e di un impianto policombustibile impiegando strumenti appositamente sviluppati per l'industria petrolchimica, in particolare con il codice PRT-Lite prodotto dalla Shell Environment (Fig. 4.1).

Fig. 4.1

Rischio Individuale Totale, come calcolato dal codice Shell-PRTLite per l'impianto a ciclo combinato preso come riferimento.



A conclusione dello studio, è stata calcolata l'entità delle conseguenze derivanti da questi possibili incidenti, al fine di definire un indice complessivo di rischio per una tipica centrale a ciclo combinato (carico termico, sovra-pressioni, concentrazioni di inquinante, ecc.). In tal modo è stato calcolato il livello di rischio utilizzando il metodo Probit per correlare le grandezze fisiche caratteristiche dell'incidente (flussi termici, concentrazioni di gas tossici, ecc.) alla percentuale di mortalità.

E' stata verificata l'applicabilità del medesimo metodo di analisi anche ad altre tipologie di centrali, come quelle con alimentazione ad olio combustibile o ad Orimulsion, senza evidenziare particolari problemi.

Nel caso dell'impianto policombustibile, è stato anche considerata, come ulteriore possibile rischio, l'esplosione di una nube di polverino di carbone, che, in particolari condizioni, può determinare un'onda di sovrappressione pericolosa sia per l'ambiente che per le persone.

## b) Studi riguardanti gli eventi esplosivi

Al rischio di esplosione di nubi di polverino di carbone è stata poi dedicata particolare attenzione anche dal punto di vista fenomenologico. Risultati incoraggianti sono stati ottenuti grazie ad un modello computazionale, realizzato sempre presso CESI, denominato BAMP (Burnable Airborne Micronic Particles), che simula il trasporto di calore radiativo e la cinetica chimica all'interno di una nube di polvere al fine di verificare se la reazione è in grado di auto-sostenersi (Figure 4.2 e 4.3). Per una data polvere infiammabile di cui siano note le caratteristiche granulometriche, il modello, che è stato tarato sui pochi dati disponibili in letteratura, si è dimostrato in grado di spiegare in modo soddisfacente il ruolo dei principali parametri che determinano la concentrazione minima necessaria alla deflagrazione. Per la sua completa validazione, è stato quindi elaborato da CESI uno studio di fattibilità di prove sperimentali mirate a validare l'applicabilità del modello stesso alle situazioni che si presentano negli impianti a carbone italiani.

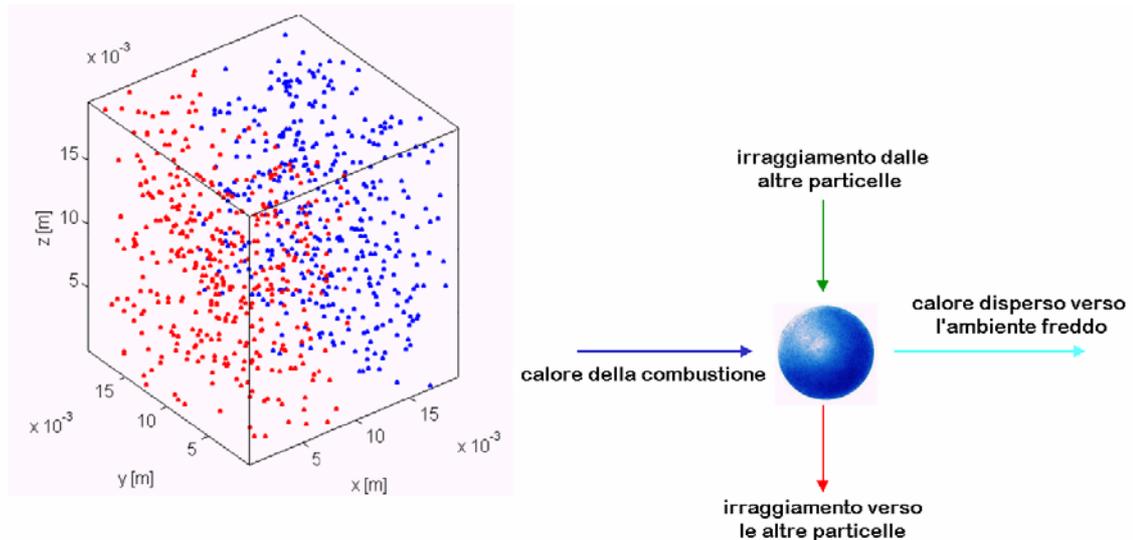


Fig. 4.2 - Il modello BAMP del CESI calcola un bilancio energetico per ciascuna particella di una piccola nube-campione posta sul fronte di fiamma, tenendo conto della concentrazione e della distribuzione granulometrica della polvere, nonché delle sue proprietà chimico-fisiche.

Anche per ciò che concerne l'analisi delle conseguenze delle esplosioni è stata messa in luce la necessità di sviluppare non solo metodologie ma anche strumenti di analisi adatti alle specifiche esigenze degli impianti di generazione elettrica. A questo proposito è stata perciò elaborata una raccolta delle informazioni utili alla descrizione dello stato dell'arte sulle metodologie di calcolo per la valutazione degli effetti di eventi esplosivi, con riferimento sia a tecniche di tipo speditivo (fra le quali il metodo Multi-Energy, successivamente assunto come metodo di riferimento) che a più sofisticati codici di fluidodinamica computazionale.

Per quanto riguarda lo stato dell'arte sui metodi speditivi per la valutazione degli effetti di esplosioni a medio e lungo raggio, sono state definite le linee guida per l'applicazione del metodo Multi-Energy a casi reali, approfondendo in particolare gli aspetti metodologici riguardanti la definizione del volume della regione

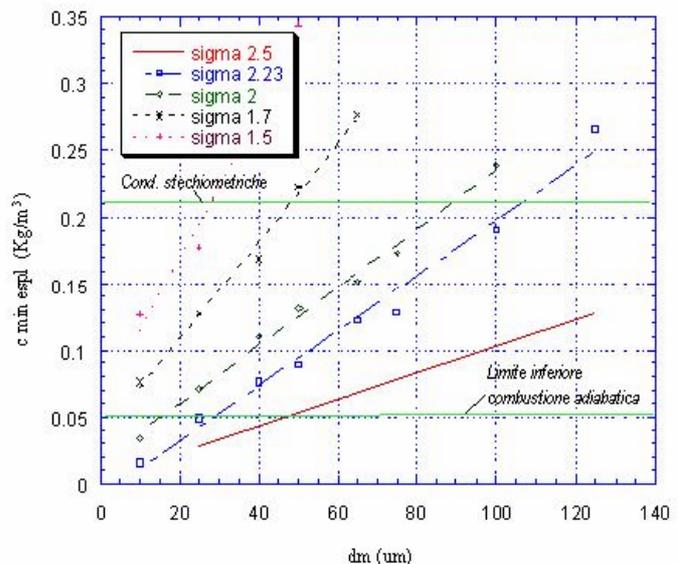


Fig. 4.3 - Andamento della concentrazione minima esplosibile di una nube di polverino di carbone con temperatura iniziale di 400K, calcolata dal modello BAMP in funzione delle caratteristiche granulometriche.

ostruita e della dimensione media degli ostacoli.

### c) Modelli per la simulazione degli incendi

Sul fronte degli strumenti di analisi di incendio, modelli avanzati di termodinamica, chimica e aerosol riconosciuti internazionalmente sono stati applicati a test sperimentali ed a scenari reali di incendio in tunnel, con buoni risultati. Benché di applicabilità generale, questi modelli sono stati realizzati per la sicurezza degli impianti nucleotermoelettrici e per l'analisi di circuiti sperimentali, per i quali sono stati ampiamente validati e sono tuttora impiegati mediante il codice ECART sviluppato da CESI.

Successivamente, sulla base delle specifiche esigenze dell'analisi di incendio in installazioni chiuse, sono stati realizzati nuovi modelli in grado di simulare la propagazione di fiamme e il trasporto di aeriformi tossici all'interno di impianti, edifici o gallerie di accesso (Figure 4.4 e 4.5). Questi modelli tengono conto dei processi di pirolisi dei materiali combustibili, della conseguente emissione di componenti volatili e della loro combustione, nonché del trasporto del calore radiativo scambiato tra fiamme, strutture e fumi.

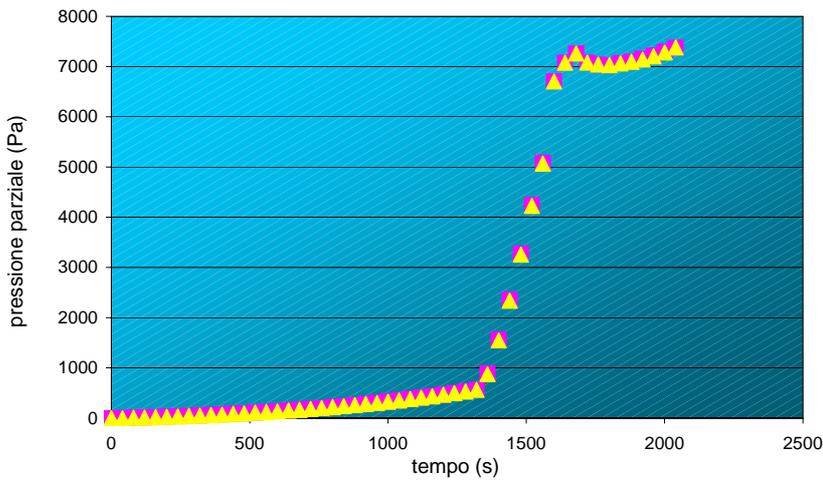


Fig. 4.4 - Esempio di valutazione della concentrazione di ossido di carbonio durante incendio in ambiente confinato mediante il codice ECART sviluppato da CESI.

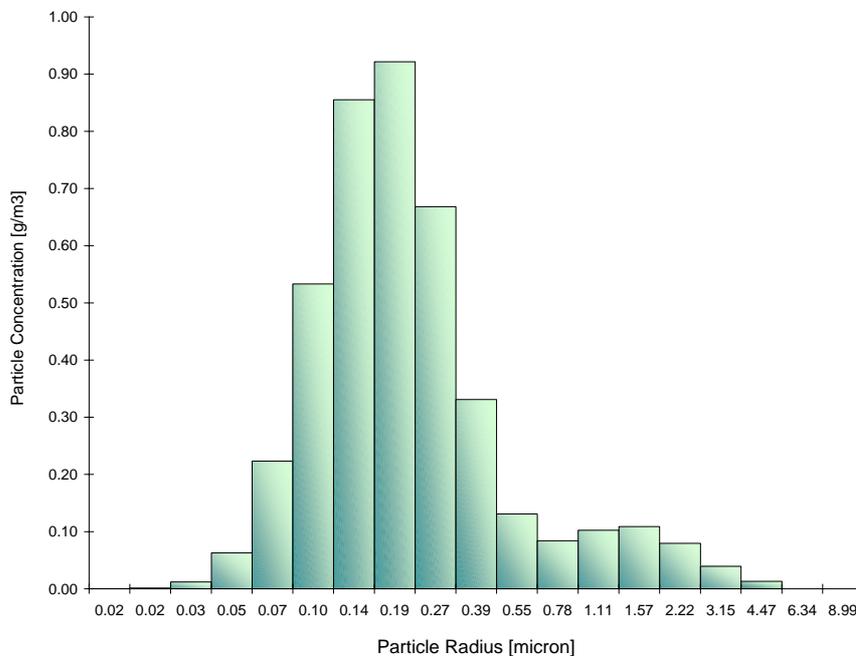


Fig. 4.5 - Esempio di discretizzazione della granulometria adottato dai modelli CESI per l'analisi del trasporto degli aeriformi solidi e liquidi.

La necessità di sviluppare modelli innovativi per l'analisi di incendio in ambiente confinato è dovuta alla carenza di strumenti di analisi efficacemente utilizzabili per il settore elettrico. Da un lato, l'eccessiva semplicità dei modelli commerciali messi a punto per l'analisi degli impianti petrolchimici li rende non applicabili agli ambienti chiusi. Dall'altro lato i modelli "a due zone", sviluppati per gli ambienti chiusi,

possono essere impiegati solo per l'analisi degli incendi allo stato iniziale, in cui non c'è significativo mescolamento tra i prodotti della combustione e l'aria fresca e non sono raggiunte le condizioni di rapida propagazione delle fiamme. Infine il pure promettente impiego dei codici CFD, sviluppati principalmente per l'industria automobilistica e aerospaziale, resta per ora limitato ad analisi puntuali di brevi transitori in limitate porzioni di impianto, a causa dell'eccessiva onerosità del calcolo richiesto e delle forti limitazioni per ciò che concerne le fenomenologie proprie degli incendi (eccessive semplificazioni nel calcolo del calore irraggiato alle strutture, delle reazioni chimiche e del trasporto dei fumi).

Per analizzare il comportamento e le conseguenze di un incendio pienamente sviluppato, CESI ha quindi optato per un accettabile compromesso basato sull'impiego di schematizzazioni a parametri concentrati come quelle, appunto, considerate dal codice ECART.

Trattandosi di nodalizzazioni con volumi finiti di grandi dimensioni, ne è stata verificata la modalità di applicazione agli ambienti tipici del settore elettrico (locale o capannone industriale, locale trasformatore di impianto in caverna, galleria di accesso) mediante analisi fluidodinamiche con il codice FLUENT (Fig. 4.6).

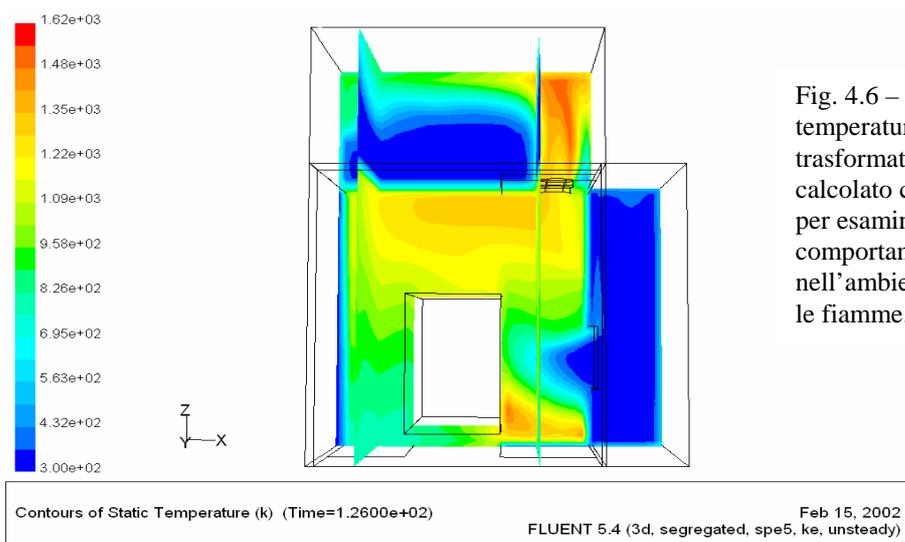


Fig. 4.6 – Esempio di campo di temperatura per un incendio di trasformatore in caverna calcolato con il codice FLUENT, per esaminare in dettaglio il comportamento della fase gassosa nell'ambiente in cui si sviluppano le fiamme.

## 5. CONCLUSIONI

Le attività di ricerca sviluppate nell'ambito del Progetto SISIGEN sono orientate allo sviluppo e alla validazione di metodologie e di strumenti di analisi, previsione, valutazione delle condizioni di sicurezza di opere e impianti di generazione dell'energia elettrica e per la gestione dei rischi associati all'interazione degli impianti con il territorio ospite.

L'utilità, l'efficacia e l'incidenza dei risultati delle ricerche sviluppate nell'ambito del progetto sono condizionate al riconoscimento della loro validità ed alla loro sostanziale accettazione non solo dalle realtà produttive interessate, ma anche da parte degli enti preposti al controllo della sicurezza e della protezione dell'ambiente e, nella misura in cui loro compete, alle amministrazioni a livello locale e nazionale.

Questo processo presuppone che l'impegno di tipo scientifico e tecnologico sia affiancato e supportato da una coerente e costante attività di presentazione, diffusione, dimostrazione e trasferimento - ove il caso - delle metodologie sviluppate e dei risultati ottenuti in tutti i principali contesti di interesse, concentrata in quei settori dove sono più pressanti i bisogni, più convincenti i risultati e più evidenti i benefici ottenibili a fronte di una corretta valutazione dei costi di applicazione.

Il presente contributo si colloca, quindi, in un contesto di divulgazione delle attività di ricerca svolte da CESI nel periodo 2000-2003 e si aggiunge alle attività di carattere generale predisposte come piano per la diffusione dei risultati di Ricerca di Sistema (seminari di illustrazione organizzati presso il CESI nel 2001, 2002 e 2003, realizzazione di uno specifico sito Web, [www.ricercadisistema.it](http://www.ricercadisistema.it)) per consentire un esame completo dell'attività di ricerca svolta.

A partire da Giugno 2003 sono state avviate, sempre con il finanziamento del sopra citato Fondo per la Ricerca di Sistema del settore elettrico, ulteriori attività di ricerca. L'ammissione al finanziamento è stata deliberata dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas in data 18 marzo 2004. La delibera, con una sintesi

dei nuovi progetti di ricerca, è pubblicata nel sito [www.autorita.energia.it](http://www.autorita.energia.it) del 19 marzo 2004.