

## Nucleare e ingegneria civile

### Le competenze ingegneristico-civili nelle attività nucleari

Giuseppe Pino<sup>1</sup>  
Alberto Taglioni<sup>2</sup>

1. ISPRA, Dipartimento Nucleare, Rischio Tecnologico e Industriale
2. ENEA, Unità Tecnica Metodi per la Sicurezza dei Reattori e del Ciclo del Combustibile

*I principali aspetti ingegneristico-civili connessi alle attività nucleari sono relativi alle fasi di localizzazione, progettazione, costruzione, esercizio e dismissione delle installazioni necessarie. Le problematiche che l'ingegneria civile affronta in campo nucleare sono strettamente legate al contesto ambientale ed antropico; è necessario quindi che ogni risorsa, umana ed organizzativa ad essa afferente, possieda il più alto grado di qualificazione e affidabilità, e venga coordinata in modo ottimale*

## Nuclear Energy and Civil Engineering in Nuclear Activities

*The main aspects of civil engineering associated with nuclear activities are related to siting, design, building, running and dismission of the required facilities. The issues that civil engineering is faced with in the nuclear field are strictly connected with the environmental and anthropic contexts. Therefore every human and organizational resource related to it needs to be provided with the utmost grade of qualification and reliability and to be optimally coordinated*

Nell'imminenza delle decisioni governative prope-  
deutiche la ripresa della produzione di energia elet-  
tronucleare e delle attività ad essa connesse, nel  
nostro paese è necessaria una verifica delle compe-  
tenze tecnico-scientifiche, professionali e industria-  
li tuttora esistenti in questo settore.

Competenze di questo tipo erano numerose fino  
alla fine degli anni 80, quando, in seguito all'inci-  
dente di Chernobyl e al successivo referendum, fu  
deciso l'abbandono di ogni attività volta alla produ-  
zione energetica di origine nucleare. E anche se le  
attività nucleari nel territorio italiano non si sono  
completamente arrestate, dovendosi procedere  
allo smantellamento degli impianti dismessi, car-  
atterizzati dalla presenza di materiali radioattivi,  
e alla sistemazione di questi in un apposito im-  
pianto di smaltimento, e pur non mancando com-  
messe estere, quelle competenze hanno da allo-  
ra subito una forte riduzione.

Il ridimensionamento degli obiettivi ha infatti pro-  
dotto una riallocazione di molte risorse, con la lo-  
ro conseguente riconversione, ed inoltre si è do-  
vuto registrare un progressivo calo di iscrizioni al-  
le facoltà di Ingegneria nucleare e fisica nucleare.  
Stessa sorte è toccata anche a quelle competen-  
ze di tipo convenzionale (civile, industriale e ge-  
stionale), specificatamente indirizzate alle applica-  
zioni in campo nucleare, che rappresentavano un  
patrimonio prezioso, la cui costituzione fu stimola-  
ta a partire dai primi anni 60 dai programmi di co-  
struzione di centrali nucleari, e oggi in via di esa-  
urimento.

Queste competenze altamente specializzate, per  
la maggior parte svolgevano la loro attività nell'in-  
dustria realizzativa (Ansaldo, Belleli, Breda, Fabbri-  
cazioni Nucleari, Nucleco, Eni ecc.), nel campo del-  
la ricerca (CNEN, ora ENEA), nell'esercizio degli im-  
pianti (ENEL) e nei processi autorizzativi (CNEN-DI-  
SP, ora ISPRA), ma anche studi professionali e im-  
prese di costruzione avevano acquisito la specifi-  
ca cultura.

In particolare, gli aspetti ingegneristico-civili ad es-  
sa afferenti possedevano un alto contenuto tec-  
nico-scientifico, come testimonia la significatività  
delle opere civili delle principali installazioni nu-  
cleari a suo tempo realizzate.

Oltre a quelle, avveniristiche per l'epoca, dei com-

pletati impianti di Trino (VC), Latina, Garigliano  
(CE) e Caorso (PC), si citano quelle di impianti mai  
entrati in funzione, come la Centrale Alto Lazio di  
Montalto di Castro e il Reattore sperimentale CIRE-  
NE, nei pressi di Latina.

Analogamente vanno anche ricordati gli impor-  
tanti studi strutturali svolti dall'ENEL nella redazio-  
ne del PUN (Progetto Unificato Nucleare) e, in tem-  
pi più recenti, dall'ENEA nel progetto concettua-  
le del Deposito nazionale per i rifiuti radioattivi,  
ora sviluppato da SOGIN.

Attualmente, e parallelamente agli studi su reat-  
tori innovativi, è attiva la ricerca volta all'introduzio-  
ne nei nuovi impianti delle tecniche di isolamen-  
to sismico, che si stanno diffondendo esponen-  
zialmente in campo convenzionale: l'argomento  
è di strategica importanza, e l'ENEA, le cui risor-  
se sono coinvolte nei programmi internazionali,  
costituisce il riferimento italiano.

Ritenendo opportuna un'evidenziazione del ruo-  
lo che l'ingegneria civile ha ricoperto e dovrà rico-  
prire ai fini della causa nucleare, viene fatta una  
sintetica esposizione delle tematiche tecniche che  
essa abbraccia, e che rappresentano la più stret-  
ta interfaccia con il contesto ambientale al con-  
torno, che oggi più che mai ha assunto una va-  
lenza decisiva.

### L'oggetto delle competenze civili

In un'attività nucleare, il decisivo apporto dell'in-  
gegneria civile si manifesta già nella preliminare  
fase di *siting*, vale a dire nel processo per la localiz-  
zazione delle installazioni necessarie, ove per ogni  
aspetto ambientale (in particolare quello sismo-  
tettonico) ed antropico di un sito devono essere  
individuate primariamente ed esaustivamente tut-  
te le possibili ricadute a livello di progetto struttu-  
rale; successivamente le specifiche competenze  
non solo intervengono nella progettazione e rea-  
lizzazione impiantistica, ma sono proiettate nel-  
l'intero orizzonte temporale delle opere, fino a so-  
vraintenderne la dismissione e l'eventuale sman-  
tellamento strutturale.

In quanto segue, l'impianto nucleare viene posto  
al centro della trattazione, pur non esaurendosi le  
succitate competenze nella sua mera implementa-

**Tabella 1 – Coinvolgimento delle competenze ingegneristico-civili nelle fasi previste dall'iter approvativo dell'ENEA-DISP di una centrale nucleare**

<b>Fase operativa operativa esercente</b>	<b>Attività ingegneristico-civili (consulenti, fornitori)</b>	<b>Azioni dell'organo di controllo (*)</b>	<b>Atti approvativi e autorizzativi (*)</b>
Localizzazione	Studi di idoneità del sito	Emissione di linee guida	Nulla osta a progettazione
Progettazione di massima	Metodologie di analisi e verifica	Emissione linee guida	Approvazione progetti particolareggiati
	Fattibilità strutturale	Attività istruttoria	
Progettazione esecutiva	Calcoli, verifiche, disegni	Vigilanza tecnica	Nulla osta a costruzione
Costruzione	Direzione lavori Collaudi statici	Vigilanza tecnica	Licenza di esercizio
Esercizio	Controlli, interventi, modifiche, adeguamenti	Ispezioni, prescrizioni, autorizzazioni	Rinnovi licenza di esercizio
Dismissione	Smantellamento strutturale	Vigilanza tecnica	Autorizzazioni specifiche

(\*) La costituenda Agenzia di Sicurezza Nucleare (Legge 23 luglio 2009, n. 99, art. 29) prevede un iter autorizzativo semplificato, a seguito del rilascio di "autorizzazione unica" (Decreto Legislativo 15 febbraio 2010, n. 31, art. 4)

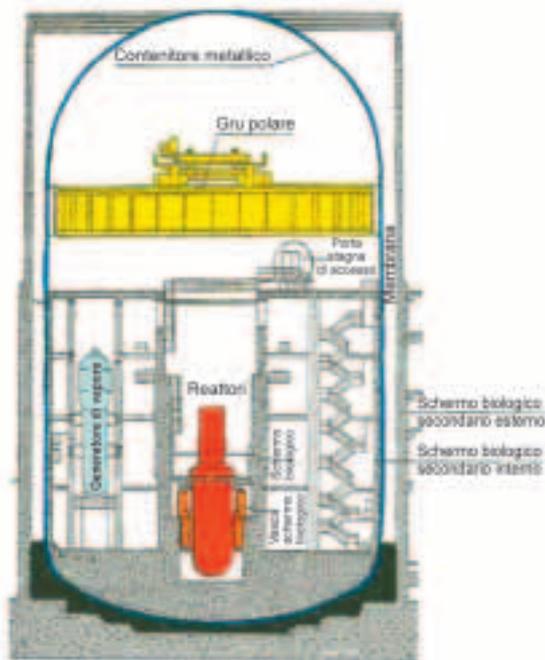
Fonte: ENEA

zione. Questa assunzione permette un'illustrazione dello "stato dell'arte" della materia nella forma più immediata: oltre agli emblematici aspetti prettamente strutturali, che includono anche la definizione del più idoneo input progettuale per la tenuta in conto dei carichi incidentali, vengono esaminate le tematiche relative ai materiali da utilizzare, alle tecnologie costruttive e manutentive, e all'architettura impiantistica, la cui ottimizzazione funzionale è alla base del successo dell'opera complessiva.

In questo senso, si ritiene inoltre che ogni rassegna su aspetti specialistici del nucleare debba possedere un costante riferimento a quella visione multidisciplinare che si rifletteva nei flussi procedurali dell'Autorità di Sicurezza Nucleare, l'ex-ENEA/DISP (vedasi *tabella 1*, nel caso più generale di una centrale nucleare), e nella sua struttura organizzativa, che finalizzava aggiornamenti e approfondimenti specialistici ad una sempre maggiore efficacia dei controlli.



**Figura 1**  
La centrale nucleare di Leibstadt (Svizzera)  
Fonte: immagine tratta da Internet



**Figura 2**  
 Schema del contenimento di un reattore nucleare  
 Fonte: immagine tratta da Internet

### Le strutture degli impianti nucleari

La definizione di “impianto nucleare” non è univoca nella letteratura tecnica, potendo essa variare in base a considerazioni di tipo operativo, progettuale/realizzativo, normativo ecc.

Può essere infatti considerato come l’insieme delle opere meramente funzionali, oppure un loro sotto-insieme che costituisca, in un certo ambito, un sistema indipendente, oppure un qualunque sistema di cui siano definibili le interfacce e i componenti.

Per quanto detto in precedenza, ai fini della presente trattazione appare opportuno definire come impianto nucleare l’insieme delle opere realizzate per lo svolgimento in sicurezza di un’attività nucleare, e focalizzare gli aspetti ingegneristico-civili esaminando le strutture destinate ad alloggiare i sistemi funzionali (Box n. 1).

Queste sono manufatti strutturali, dove apparec-

chiature di tipo “industriale” (l’insieme della parte funzionale, cioè strutture e componenti meccanici ed elettrici), si integrano, a livello di sistema, con opere massive (edifici, fondazioni, opere in terra) cui esse sono collegate.

Si può affermare che, in detto sistema, attingono all’ingegneria civile quelle opere la cui scelta tipologica e la verifica finale del dimensionamento avvengono

- tenendo conto delle sollecitazioni trasmesse da “componenti” indipendentemente progettati;
- considerandone l’effetto interattivo dinamico con questi;
- rispettando i requisiti minimali di natura radioprotettiva;

e comunque, a valle della scelta del sito ospitante. Dovranno quindi essere adeguatamente dimensionate le strutture portanti esterne ed interne (generalmente in conglomerato cementizio armato), così come i loro collegamenti con i componenti funzionali d’impianto (tramite supporti, ancoraggi metallici, alloggiamenti), ma anche ogni opera esterna avente stretta interfaccia con l’impianto, come ad esempio manufatti per il sostegno dei terreni, condotte di allontanamento delle acque, edifici ausiliari, dovrà essere progettata e realizzata con analoghe considerazioni di sicurezza.

Senza per questo perdere in generalità, in quanto segue, ci si riferirà soprattutto alle due tipologie di impianto che per la loro complessità e per il loro impatto socio-ambientale, coinvolgono in modo esaustivo tutti i peculiari contenuti tecnici richiamati e conferiscono emblematicità alla specifica applicazione ingegneristica: le centrali elettronucleari e i depositi di rifiuti radioattivi.

Non a caso, la richiesta di analisi avanzate di specifici aspetti ingegneristico-civili su questo tipo di impianti ha contribuito a importanti progressi tecnico-scientifici di portata più generale: si pensi allo sviluppo di codici strutturali, ideati per le verifiche in condizioni incidentali o estreme causate da eventi naturali, e oggi implementati nei comuni strumenti progettuali, e ai materiali usati per il condizionamento dei rifiuti radioattivi, estendibile a quello di rifiuti tossici e pericolosi.

## Box 1

## Opere civili nelle tipologie di impianto nucleare

### Le centrali di potenza

Una tipica centrale comprende principalmente:

- l'edificio di contenimento del reattore, costituito da un cilindro di calcestruzzo armato normale all'interno del quale è collocato un contenitore cilindrico in calcestruzzo armato precompresso o in acciaio di forte spessore, nel quale sono alloggiati le barre di uranio arricchito tra le quali scorre il liquido refrigerante;
- la sala macchine, ovvero un edificio dove sono alloggiati le turbine e l'alternatore con i loro circuiti ausiliari;
- gli edifici ausiliari, che contengono i sistemi e circuiti ausiliari necessari al normale funzionamento e all'emergenza;
- gli edifici di fisica sanitaria ed amministrativi;
- serbatoi, condotte idrauliche, torrioni piezometrici.

### I reattori di ricerca

Un tipico reattore di ricerca non differisce funzionalmente da quello di un impianto di potenza ma l'entità delle realizzazioni produttive e ausiliarie, esaustive per un impianto energetico, è rapportata alla potenza sviluppata (mediamente di due ordini di grandezza inferiori); molto spesso si tratta di un nocciolo immerso in una piscina con dei canali di irraggiamento verso l'esterno.

### Impianti di riprocessamento

Gli impianti di riprocessamento sono edifici ove il combustibile esaurito viene manovrato a distanza da tecnici protetti da spesse pareti di cemento, o in c.d. "scatole a guanti". All'interno vi sono una o più piscine destinate a contenere le barre del combustibile esaurito per un periodo di qualche decennio. Gli impianti sono dotati di importanti strutture meccaniche per il sollevamento e la movimentazione del materiale radioattivo.

### Depositi per rifiuti

I depositi per rifiuti radioattivi possono avere natura provvisoria o definitiva; in questo secondo caso si parla di impianti di smaltimento.

I depositi provvisori, destinati al contenimento dei rifiuti per un periodo di tempo minore di 50 anni, sono, generalmente, strutture in calcestruzzo armato, più o meno bunkerizzate, all'uopo realizzate in prossimità degli impianti ove i rifiuti sono prodotti e ridotti in forma solida in contenitori, metallici o in conglomerato cementizio, di dimensioni standardizzate, in attesa di essere avviati allo smaltimento.

La tipologia degli impianti di smaltimento varia sostanzialmente a seconda che si tratti di rifiuti "a vita breve" o "a vita lunga", con riferimento al tempo necessario alla radioattività in essi contenuta per decadere a valori trascurabili, ovvero comparabili a quelli del fondo naturale: nel primo caso, i tempi sono dell'ordine massimo di qualche secolo, altrimenti possono essere necessari valori superiori al milione di anni.

Gli impianti di smaltimento sono basati sulla applicazione del concetto multi-barriera, per cui i radionuclidi, inglobati in matrici cementizie o vetrose, sono separati dalla biosfera da una serie di barriere artificiali ridondanti (tipicamente: contenitore primario in acciaio, contenitore secondario in acciaio o calcestruzzo armato, pareti in calcestruzzo armato, rivestimenti di vario materiali) e naturali (terreno, strati rocciosi).

Per i rifiuti a vita breve, la moderna tecnologia prevede la realizzazione degli ambienti di stoccaggio in gallerie, o in strutture scatolari in calcestruzzo armato, da interrare e, successivamente, abbandonare "a perdita di memoria" dopo circa 300 anni.

Nei depositi per i rifiuti a vita lunga, lo stoccaggio avviene in profondità naturali, in zone ad alta stabilità sismotettonica e anidre, in cavità naturali o in cunicoli, ove la barriera artificiale è costituita dal solo involucro, e ogni funzione di contenimento è demandata agli spessori del mezzo geologico (ove sale, argilla e granito sono da prediligere).

## Il rischio nucleare e l'eventistica associata

Il rischio nucleare consiste essenzialmente nella probabilità che l'uomo possa essere danneggiato irreversibilmente per esposizione alle radiazioni prodotte artificialmente nel corso delle attività nucleari, o per contatto con sostanze organiche o inorganiche contaminate, ineluttabilmente rilasciate nell'ambiente. Le attività nucleari dovranno quindi essere svolte in maniera tale da minimizzare detto rilascio, e in questo senso dovranno uniformarsi tutte le scelte tecniche ad esse afferenti, a partire da quelle localizzative e di sistema, fino alle quelle impiantistiche e infrastrutturali.

Dall'inevitabilità di quello che si può definire il "residuo" di ogni attività nucleare, e informate ai principi di sicurezza (Box n. 2) discendono normative e indicazioni per tutte le adozioni progettuali, che dovranno mantenere le proprie caratteristiche a fronte di eventi naturali e no.

A tal fine si devono considerare in modo onnicomprensivo tutti gli accadimenti, voluti e non voluti, che abbiano ricaduta sulle strutture dell'impianto. Particolare importanza assumono i secondi che,



**Figura 3**  
Fasi iniziali della costruzione della centrale di Olkiluoto in Finlandia  
Fonte: immagine tratta da Internet

stante la loro natura incognita, necessitano di un'ipotesi quali-quantitativa per la loro descrizione, che si traduce in un insieme di carichi per lo più di tipo dinamico, che saranno applicati alle strutture. La definizione di questi carichi, che determinano in modo decisivo il dimensionamento delle membratu-

### Box 2

#### Principi di sicurezza per gli impianti nucleari

Per quanto concerne la scelta del sito, la progettazione, la costruzione, l'esercizio e la disattivazione degli impianti nucleari, gli Stati membri applicano i principi fondamentali dell'IAEA (Agenzia Internazionale dell'Energia Atomica, *Fundamental safety principles*, IAEA Safety Standard Series No. SF-1); in particolare, per la progettazione impiantistica, ci si informa ai seguenti tre principi:

- **Principio di giustificazione:** ogni attività con radiazioni ionizzanti deve essere giustificata, ovvero il beneficio collettivo ottenuto dall'uso delle radiazioni ionizzanti deve essere superiore al detrimento sanitario dovuto al loro utilizzo.
- **Principio di ottimizzazione:** l'esposizione alle radiazioni ionizzanti deve essere mantenuta ai livelli più bassi possibili, compatibilmente con le condizioni economiche e sociali (principio ALARA, as low as reasonably achievable).
- **Principio di applicazione dei limiti di dose:** fatti salvi i precedenti principi, sono fissati limiti di dose per i lavoratori e la popolazione, che non devono essere superati nell'esercizio di attività con radiazioni ionizzanti.

L'impianto nel sito scelto dovrà quindi garantire che la popolazione ed i lavoratori non ricevano effetti sanitari da radiazioni superiori ai limiti stabiliti e che tali effetti siano, comunque, i più bassi ragionevolmente ottenibili in tutte le condizioni operative ed in caso di incidenti: a ciò si rifanno i requisiti di sicurezza nazionale, da cui successivamente discende l'insieme di norme e prassi che saranno utilizzate nella progettazione.



**Figura 4**  
Smantellamento di un componente e demolizione dell'edificio  
Fonte: immagine tratta da Internet

re resistenti di un impianto, avviene considerando gli effetti indotti dai seguenti eventi, qualora prescritti in base alla rilevanza dell'impianto e alla loro probabilità di verificarsi:

- evento sismico;
- fenomeni atmosferici estremi;
- innalzamento della falda freatica;
- inondazione;
- dissesti idrogeologici.

Tra le possibili evenienze sismiche, la cui entità e probabilità sono ipotizzate in base ad analisi storiche e alla conoscenza delle strutture tettoniche del sito, si definiscono, in relazione alla prestazione richiesta alle strutture:

- il terremoto di progetto, al quale tutte le strutture devono poter resistere in modo tale che il funzionamento dell'impianto possa essere interrotto e si raggiungano e mantengano le condizioni di spegnimento in condizioni di totale sicurezza (la ripresa del funzionamento sarà poi condizionata alla verifica accurata dell'integrità dei sistemi);
- il terremoto di esercizio, per il quale è richiesto che l'impianto non solo conservi le caratteristiche di sicurezza previste nel progetto, ma possa continuare il normale esercizio dopo opportuni controlli, che potrebbero non implicare l'arresto dell'impianto.

I fenomeni atmosferici maggiormente gravosi per la resistenza delle strutture sono costituiti dai più comuni (vento, neve, pioggia), ma di natura ano-

malata per il sito, e dalla tromba d'aria (o tornado), cui viene associato anche l'impatto di oggetti trasportati.

Dissesti idrogeologici e inondazioni sono considerati in fase di localizzazione, ove si tende alla massima riduzione del rischio di accadimento; sono comunque presi in conto, e opportunamente descritti, nei casi di depositi per rifiuti radioattivi, cui si richiedono prestazioni in un orizzonte temporale che trascende le conoscenze generazionali.

Talvolta è poi considerata un'altra serie di carichi, di origine antropica, definiti SEC (*Special Emergency Conditions*), di cui i più tipici sono:

- esplosione esterna, che è costituita da un'onda di pressione che investe l'impianto in caso di attentato;
- impatto di riferimento, che è costituito dall'urto di un non meglio identificato oggetto di generiche caratteristiche.

Nel caso di centrali nucleari, questi carichi stanno rispettivamente a rappresentare, anche se non esplicitamente dichiarato, un attentato terroristico e la caduta di un aereo.

Nel primo caso si tratta di dati di natura estremamente sensibile, che vengono prescritti nella preliminare fase autorizzativa, in dipendenza della causa ipotizzata; nel secondo caso, l'aeromobile che si ipotizza impattare dipende da distanza di aeroporti e rotte, e da considerazioni di protezione da azioni ostili.

In Italia, questi carichi furono quantificati in base a considerazioni di natura probabilistica; a fronte di essi dovevano essere unicamente salvaguardati la vita umana e l'arresto in sicurezza dell'impianto.

Per i depositi di rifiuti radioattivi, per i quali dopo un certo periodo di tempo si prevede la "perdita di memoria", viene considerata anche l'azione di intrusione, a seconda dei casi deliberata o no: la più gravosa è solitamente costituita dalle opere preliminari di un insediamento edilizio.

Oltre a queste evenienze, che si possono definire "esterne", vanno considerate quelle di natura interna, ovvero quelle provocate da malfunzionamenti della parte impiantistica funzionale: gli incidenti sono ordinati in una scala probabilistica, a partire dai meno "gravi" (cadute di masse non ancorate o trasportate/sollevate, cedimenti di vincoli, gradienti termici non previsti, missili costituiti da parti di componenti di apparecchiature, colpi di frusta di tubazioni) e quindi più "frequenti", a quelli estremi, ove il peggiore consiste nella perdita di liquido refrigerante, con forze di getto e gradienti termici associati.

A seconda del tipo di impianto e della natura ambientale ed antropica del sito ospitante, i succitati eventi esterni vengono catalogati come severi o eccezionali e, insieme agli eventi normali, vengono combinati con diverse situazioni funzionali, di

- funzionamento normale;
- incidente frequente;
- incidente infrequente;
- incidente limite.

in modo tale da poter inserire, in modo matriciale,

tutti i singoli carichi che competono a ciascuna situazione (condizione di carico), cui corrispondono una o più combinazioni di carico che saranno considerate nel progetto, con fattorizzazioni per lo più da assumersi secondo le indicazioni delle normative che verranno prese a riferimento.

Nelle condizioni di funzionamento normale, i carichi elementari sono sovente moltiplicati per coefficienti maggiori di 1, altrimenti ciò avviene in pochissimi casi, riflettendo con ciò un criterio probabilistico.

Di prassi, ad ogni componente strutturale (membratura, sottostruttura o anche edificio) viene assegnata una "categoria di progetto", al cui valore crescente corrisponde una aumentata gravosità degli eventi cui deve essere verificata, come si può vedere ad esempio in *tabella 2*.

## Il progetto strutturale

Le attività di progettazione strutturale, intesa nella sua più ampia accezione, si articolano nel dimensionamento di massima delle membrature resistenti, che avviene in fase di progettazione architettonica, nel recepimento delle normative, nella schematizzazione dei carichi previsti, nella scelta di metodologie e strumenti di calcolo, nella dimostrazione di fattibilità strutturale che accompagna il progetto di massima, nell'elaborazione della relazione di calcolo e nell'emissione dei documenti esecutivi, contenenti le prescrizioni su materiali e modalità di messa in opera.

Tabella 2 – Categorie di progetto ed eventistica nell'impianto Cirene

Situazione funzionale	EVENTI ESTERNI (esclusi SEC)							
	NORMALI			SEVERI			ESTREMI	
	carichi normali	vento	livello di falda	livello di falda max	vento severo	sisma OBE	tromba d'aria	sisma SSE
Funzionamento normale	I	I	I	II	II	II	IV	IV
Incidente frequente	II	II	II	III	III	III	IV	IV
Incidente infrequente	III	III	III	IV	IV	IV	n.a.	IV
Incidente limite	IV	IV	IV	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	IV

Fonte: Opere Civili Impianto Cirene - ENEA/DISP RT(85)18

### Architettura di impianto

La progettazione delle opere inizia già in fase di studio del *lay-out* d'impianto e della sistemazione dei componenti funzionali meccanici ed elettrici al suo interno.

Al proposito, è importante considerare soprattutto le forze sismiche, per minimizzare sollecitazioni e deformazioni da esse indotte: compatibilmente con le esigenze impiantistiche, deve essere abbassata il più possibile la quota dei componenti più pesanti, riducendo così l'altezza del baricentro complessivo. L'adozione generalizzata di pareti resistenti in calcestruzzo armato, consente di realizzare adeguate schermature e, al contempo, di ottenere strutture poco deformabili e quindi idonee alla resistenza sismica loro richiesta; l'introduzione, laddove possibile/necessario di pareti di taglio, consente l'assorbimento delle sollecitazioni torcenti dovute alle inevitabili dissimmetrie.

Per il dimensionamento di massima di dette membrature, devono essere tenuti in conto i valori minimi imposti dalle esigenze schermanti e dalle verifiche degli effetti locali dei missili, per le quali è indipendente la quantità di armatura.

Analogamente, per ogni altra membratura (travi, pilastri, solette, fondazioni) è indispensabile un primo dimensionamento iniziale, basato sull'esperienza del progettista per edifici simili. Già nella fase iniziale è buona norma condurre le principali verifiche di stabilità (ribaltamento, slittamento, schiacciamento, galleggiamento), controllando l'adeguatezza dei margini di sicurezza esistenti.

### Normative applicabili

Un corpo normativo strutturale deve fornire una serie di riferimenti per:

- circoscrivere la tipologia delle opere in oggetto;
- elencare i carichi applicabili e le loro combinazioni;
- definire le tipologie di verifica da condurre, a fronte di essi;
- fissare i valori limite di sollecitazioni e/o spostamenti.

Solitamente è lasciata libertà al progettista per quanto riguarda le metodologie che indagano e analizzano la distribuzione degli sforzi nelle membrature, anche se spesso vi sono suggerimenti in proposito. In Italia, in campo convenzionale, è stato recente-

mente emanato un Testo Unico, che ha eliminato la necessità di dover assemblare i disposti tecnici relativi ad una serie di precedenti normative; tale testo tuttavia non contempla le opere nucleari, che non sono contemplate nemmeno nella normativa degli Eurocodici. Tuttavia questi appaiono oggi più adatti all'applicazione, in quanto si allineano alle norme nazionali vigenti di natura "prescrittiva", e consentono al progettista, in virtù della loro contrapposta natura "prestazionale", una maggiore libertà nelle scelte metodologiche.

Tale situazione si riscontra in quasi tutti i paesi che hanno adottato il nucleare; ne discende che è quindi compito degli organi di controllo di ciascun paese definire, sulla base di standard esistenti, convenzionali e no, un corpo normativo cui attenersi, emettendo in proposito delle linee guida ad uso del progettista. Il rispetto di queste, comunque, costituisce condizione necessaria, ma non ancora sufficiente, per l'approvazione finale, subordinata ad eventuali prescrizioni aggiuntive dell'organo di controllo, in ragione di analisi indipendenti che esso stesso si riserva di condurre.

Non prevedendo le normative convenzionali l'eventistica dei carichi tipica per gli impianti nucleari, esse possono essere richiamate solo in virtù del tipo di verifica e dei limiti associati.

In Italia, nel corso delle passate attività nucleari l'ENEA DISP si è uniformata all'impostazione dell'Ente di Controllo americano, l'US Nuclear Regulatory Commission, che per gli aspetti strutturali aveva emesso apposite *Regulatory Guides*, e rimandava alla conduzione delle verifiche puntuali prescritte nella sezione nucleare di normative strutturali nazionali. Per l'assunzione di particolari carichi, quali ad esempio quelli dovuti alle spinte del terreno addizionali in caso di sisma, o a fenomeni meteorologici, estremi e no, si faceva riferimento a teorie empiriche, prescrivendo il rispetto di normative nazionali che le contemplavano.

Infine, trattandosi comunque di opere da realizzare sul territorio nazionale, veniva fatta rispettare la normativa italiana vigente all'epoca, con i carichi da essi richiamati, nei limiti in cui essa era applicabile.

### Rappresentazione dei carichi

I carichi che richiedono una descrizione più accurata sono quelli di natura dinamica (sisma, cari-

chi impulsivi ed impattivi) che, stante la loro natura incidentale, sono ipotizzati su base probabilistica; per i carichi di natura statica di più semplice descrizione (permanenti e accidentali, vento, neve, spinte dei terreni, reazioni dei vincoli d'impianto ecc.) non sono suggerite particolari modalità di applicazione, se non un adeguato conservativismo per la determinazione di quelli di natura temporanea.

L'input sismico viene definito a partire da una serie di dati naturalistici che costituiscono il c.d. "terremoto di riferimento", che verrà poi tradotto, in funzione della tettonica del sito, in parametri fisico-matematici (accelerogrammi e spettri di risposta) atti a rappresentare il c.d. "moto vibratorio al sito"; questo si ipotizza avvenire in assenza di opere realizzate, per arrivare poi a determinare, sulla base delle caratteristiche geologiche e geotecniche locali, il sisma che sarà risentito alla base delle strutture.

Per le opere di futura realizzazione potrà essere prevedibile l'introduzione di aumentati input sismici, con ricorso agli spettri anelastici, contemplati negli Eurocodici.

I carichi indotti dalla tromba d'aria sono rappresentabili, in caso di mancanza di studi specifici, con una pressione cinetica massima sulle superfici esterne di un'opera, e da una corrispondente depressione sulle superfici interne; si ipotizza inoltre il contemporaneo urto di alcuni oggetti le cui caratteristiche provochino effetti tali da involuppare quelli prodotti in una più ampia casistica, e descritti in termini di massa, velocità d'urto, angolo di incidenza, area di impronta e altezza di impatto: la normativa americana in proposito suggerisce un'automobile, un tavolo di legno e un tubo d'acciaio.

I carichi dovuti a incidente funzionale (colpi di frusta, distacco di elementi, getti di liquido, caduta di oggetti) sono anch'essi schematizzabili con azioni d'impatto concentrate e con pressioni e depressioni nei locali interni.

I carichi di natura "sensibile", in quanto di possibile deliberata intenzione, come l'esplosione e l'impatto aereo, se presi in esame, sono parimenti descrivibili con le medesime modalità della tromba d'aria e dei missili ad esso associati; le forze o i sistemi di forze di specifica saranno considerati applicati alle strutture, sia per la determinazione degli effetti globali che degli effetti locali.



**Figura 5**  
Edificio reattore centrale del Garigliano  
Fonte: SOGIN

### **Analisi strutturali e strumenti di calcolo**

Come per tutte le opere strutturali di natura complessa è richiesta la creazione di "modelli" da utilizzare nei calcoli, che possono essere spaziali o piani; a questi ultimi è consentito il ricorso quando ne sia dimostrata la conservatività.

Le analisi più significative sono quelle di tipo dinamico, che vengono condotte per le verifiche a sisma e casi di impatto; esse possono essere di due tipi, ovvero:

- analisi globali: l'intero corpo strutturale viene schematizzato in un modello avente sufficiente grado di dettaglio, atto alla ricerca delle sollecitazioni e degli spostamenti più significativi dell'opera, al fine di giustificarne e il dimensionamento di massima;
- analisi locali: una parte di struttura è rappresentata con maggior dettaglio rispetto al modello globale, e viene analizzata con condizioni di vincolo e al contorno prudenziali.

Le analisi globali sono tali finché utilizzano modelli che descrivono l'intera opera, sia considerandola rigidamente vincolata al terreno, sia descrivendo quest'ultimo come un mezzo continuo al contorno.

Per rappresentare il terreno che interagisce con le strutture, e attraverso il quale anche due o più strutture possono interagire tra loro, sono utilizzabili due metodi:

- il metodo diretto, ove il modello comprende sia la struttura, o le strutture, e il terreno;



**Figura 6**  
Opere civili realizzate per la centrale di Montalto di Castro  
Fonte: SOGIN

- il metodo sotto strutturale, ove il terreno è rappresentato da molle e dissipatori concentrati.

L'analisi sismica contempla i casi di terremoto di progetto e di terremoto di esercizio: nel primo caso è permesso alle strutture il superamento del limite elastico, e pertanto ne dovrà essere dimostrata una sufficiente duttilità prima del collasso, mentre nel secondo caso deve essere assicurato il non superamento dei limiti elastici delle strutture resistenti. Nel caso in cui un'apparecchiatura abbia massa o rigidità tali da modificare la risposta strutturale, essa deve essere inclusa nella modellazione, altrimenti potrà essere schematizzata come una o più masse puntiformi posizionate nei punti di vincolo alla struttura.

Quando all'interno degli edifici siano presenti serbatoi o piscine di notevoli dimensioni, deve essere tenuto conto del fenomeno dello *sloshing*, ovvero sia l'effetto secondario prodotto dalle oscillazioni delle masse liquide contenute: in questo caso si fa ricorso a formule empiriche, che consentono la schematizzazione di queste masse in modo concentrato e il loro collegamento alle strutture che le contengono mediante vincoli elastici.

Per quanto riguarda le forze impulsive ed impattive, esse vengono implementate nel modello risolutivo mediante una "forzante", ovvero una forza, concentrata o distribuita, con valore variabile nel tempo. I calcoli vengono condotti con l'ausilio di codici strutturali, che sono gli strumenti di cui la

moderna ingegneria civile si serve quasi esclusivamente, a partire dalla fine degli anni '70, quando le loro prime versioni ebbero applicazione proprio in ambito nucleare.

I codici di maggior utilizzo in passato sono stati il SAP, per analisi in campo elastico, e l'ADINA per quelle in campo plastico, dei quali esistono oggi svariati *pre-processor* e *post-processor*, che facilitano l'introduzione dei dati e riescono a fornire output a livello esecutivo; essi sono utilizzabili anche per le analisi termiche.

Si segnalano inoltre i più sofisticati ABAQUS e NASTRAN, adatti all'analisi delle parti più prettamente impiantistiche, riuscendo essi a tenere conto di fenomeni come la fatica, l'instabilità strutturale e termica, il *cracking* ecc.

Per le analisi sismiche, la tecnica analitica utilizzata dai codici per trasformare il dato sismico in forze inerziali è quella dell'analisi modale, applicabile sia utilizzando il dato sismico sotto forma di spettro di risposta, che di accelerogramma.

La futura adozione delle tecnologie dell'isolamento sismico, non solo potrà permettere un innalzamento degli standard normativi relativi all'input sismico, ma favorirà sicuramente l'affinamento delle metodologie di analisi.

Nelle analisi locali, la sempre maggior potenzialità degli strumenti di calcolo ha portato alla diminuzione dei casi di loro necessità, potendosi introdurre un maggior numero di dati nell'input di quelle globali; tuttavia rimane importante lo studio approfondito e indipendente di parti di sistema, che permette comunque in modo rapido il loro dimensionamento ottimale o la valutazione di una modifica progettuale loro connessa.

In dipendenza della loro complessità varia la gamma degli strumenti di calcolo cui far ricorso: dai medesimi codici di calcolo utilizzati nelle analisi globali, agli algoritmi propri della scienza e/o tecnica delle costruzioni, a formule empiriche di validità scientificamente riconosciuta.

Come in ogni opera di ingegneria, del resto, grado di analisi e strumento utilizzato devono essere omogenei qualitativamente alla tipologia di indagine che si intende condurre e al grado di precisione necessario e sufficiente per il risultato che si vuole ottenere.

Le analisi locali più impegnative, al di là di quelle di

indagine più precisa sulla distribuzione delle sollecitazioni in una membratura su cui si siano già determinate le forze trasmesse, sono quelle eseguite per determinare gli effetti locali degli impatti, o gli effetti degli sforzi trasmessi da macchinari, tubazioni, ecc., quando sia necessario il rispetto di minime deformazioni.

Per l'analisi degli effetti della spinta delle terre su pareti verticali in caso di sisma, è frequente il ricorso a teorie empiriche; parimenti di natura empirica sono i coefficienti di forma che si applicano alle superfici esterne per rappresentare gli effetti locali dei carichi meteorologici, estremi e no.

Gli strumenti di calcolo citati risultano utili anche in fase di primo dimensionamento e di verifica di fattibilità strutturale, ovvero nelle "analisi di sensibilità" ove, stante l'incertezza nella quantificazione di taluni parametri (tipicamente quelli rappresentativi del terreno o dei materiali in condizioni dinamiche) l'analisi viene condotta più volte attribuendo diversi valori ai parametri in esame, aumentando e diminuendo un valore ritenuto più verosimile (c.d. best estimate): in tal modo si può valutarne la ricaduta sulle opzioni progettuali, o accertare conservativamente ed esaustivamente i massimi effetti che gli eventi esterni possono indurre.

Analisi iterative possono essere condotte anche per tutti quegli input per cui non vi è linearità e/o monotonia nell'output finale, o nelle indagini preliminari a fini prescrittivi, dovendosi stabilire il set di carichi realisticamente più gravoso.

### Verifiche

Oltre alle verifiche di stabilità globale, peraltro in genere già soddisfatte in fase di dimensionamento, devono essere effettuate, sulla base dei disegni di carpenteria, le c.d. verifiche di integrità, cui si procede una volta effettuata l'analisi strutturale, e determinato quindi l'involuppo degli stati sollecitazionali e deformativi per l'intera struttura.

La maggior parte delle verifiche attiene al controllo dell'adeguatezza di spessori e sezioni e, nel caso del calcestruzzo armato, dell'armatura presente, ove la procedura è quella classica della scienza e della tecnica delle costruzioni, sempre più automatizzata da *software* innovativi.

Contestualmente viene eseguito il controllo dello stato deformativo su spostamenti mediali o estre-

mali di singole membrature; in particolare, per le membrature in calcestruzzo, controlli sono prescritti anche sulla massima apertura delle fessure e sulle sollecitazioni trasmesse al terreno.

Per i carichi da impatto, il cui effetto a livello globale è recepito nelle suddette verifiche, deve essere inoltre valutato l'effetto locale, che si traduce nel controllo di adeguatezza dello spessore della parete di impatto; in particolare devono essere evitati i fenomeni di:

- perforazione;
- penetrazione;
- *scabbing* (asportazione di materiale sulla superficie impattata);
- *spalling* (espulsione di materiale all'estradosso della superficie impattata);
- punzonamento e taglio localizzato.

Nei punti di collegamento della struttura portante con le parti impiantistiche, i vincoli devono essere verificati alle massime sollecitazioni ricavate con le analisi: tipicamente si tratta di verifiche di piastre metalliche ancorate con tirafondi, per cui risulta significativa la dimostrazione della loro aderenza con il calcestruzzo. Molto importante è la determinazione dei c.d. *floor response spectra*, o "spettri di piano", che consiste nel calcolo del moto vibratorio che si verifica nei punti di vincolo a seguito di sollecitazioni dinamiche: lo spettro determinato in base agli accelerogrammi ottenuti deve risultare in ogni punto inferiore ad uno spettro di specifica proprio dell'apparecchiatura collegata.

### Materiali costruttivi

Le caratteristiche materiali e degli elementi impiegati nella costruzione delle opere nucleari sono quelle classiche individuate nelle normative strutturali riguardo a:

- calcestruzzo;
- malte cementizie;
- ferri d'armatura;
- trefoli e cavi per calcestruzzo armato precompresso;
- elementi prefabbricati in calcestruzzo armato e calcestruzzo armato precompresso;
- profilati metallici,

per i quali è sempre richiesto il più alto grado di qualificazione ivi prescritto.

Per quanto riguarda le strutture in calcestruzzo arma-

to, c'è tuttavia un aspetto di notevole interesse: esso è costituito dalla progettazione del conglomerato da utilizzare per realizzare le membrature esterne e di schermaggio. Tale aspetto è particolarmente curato anche in tutte quelle strutture convenzionali complesse per le quali sia richiesta una vita funzionale superiore ai 50 anni (prevista per le strutture abitative): per strutture di natura "strategica", come ponti, dighe, grattacieli, oggi si tende a guardare valori superiori ai 100 anni.

Anche per le centrali nucleari si tende a prevedere conservativamente una vita utile superiore al secolo mentre, nel caso delle barriere di un deposito di rifiuti radioattivi, è necessario dimostrare una durabilità delle loro caratteristiche meccaniche e di impermeabilità di almeno 300 anni.

Pertanto, non avendosi ancor oggi evidenza sperimentale di durate superiori per opere in calcestruzzo armato (non fosse altro che per l'età delle opere attualmente esaminabili, risalendo l'"invenzione" del calcestruzzo armato a non più tardi di un secolo fa), per gli impianti nucleari è assolutamente importante perseguire una durabilità superiore.

A tal fine solitamente si procede in questo modo:

- si individuano e si analizzano le possibili cause di perdita di integrità nel tempo in relazione al sito ospitante;
- si propone per ciascuna di esse il possibile rimedio, mediante opportune prescrizioni sul dosaggio dell'impasto (c.d. *mix-design*) e adeguate modalità di messa in opera;
- si conducono prove "ad hoc" su provini di materiale allo scopo confezionati, e sottoposti ad invecchiamento accelerato.

L'effetto schermante delle pareti viene reso più efficace con l'utilizzo di "calcestruzzo pesante", ottenuto integrando gli aggregati tradizionali con quantità variabili di barite (aggregato composto da minerale di bario); il calcestruzzo così confezionato si trova quindi ad avere una densità relativa quasi raddoppiata.

Per comprendere l'ordine di grandezza dell'effetto schermante, si pensi che 1 mm di piombo (correntemente utilizzato nelle applicazioni diagnostiche radiografiche) può essere sostituito, indicativamente, da: 25 mm di intonaco baritico, 30 mm di calcestruzzo pesante, 50 mm di calcestruzzo ordinario, ottenendo così una riduzione del 40% di in-

gombro, a parità di massa.

Caratteristiche schermanti e resistenti si integrano nel calcestruzzo con cui è realizzato il contenimento dei reattori, per il quale si ricorre anche alla precompressione, in virtù dei notevoli sforzi di trazione previsti in caso di incidente.

L'aumento della resistenza a trazione può essere ottenuto anche con l'utilizzo di calcestruzzi fibro-rinforzati, campo ove la ricerca negli ultimi anni ha prodotto notevoli progressi: la presenza di fibre in acciaio, vetro o materiale polimerico, offre al materiale maggiore resistenza alla fatica, agli urti, allo stress termico e all'abrasione. Non è pertanto azzardato prevederne un più diffuso utilizzo in un prossimo futuro anche nelle applicazioni nucleari.

Riguardo alle strutture in acciaio, l'aspetto più peculiare ed emblematico è rappresentato dallo studio del materiale costituente le strutture in pressione, particolarmente dal contenitore primario dei reattori, che deve possedere una resistenza mantenevole anche alle alte temperature, che possono raggiungere anche i 900 °C.

### Costruzione, esercizio e dismissione degli impianti

In ambito nucleare, nella messa in opera delle installazioni ex-novo, gli aspetti di interesse specifico hanno perduto gran parte della loro peculiarità, in quanto le problematiche cantieristiche e di sicurezza del lavoro sono quelle di un tipico cantiere di opera di una certa rilevanza e ad alto impatto sociale.

Sarà sempre compito del direttore dei lavori e del collaudatore statico procedere a prove di carico e prove sui materiali, a loro discrezione, e in aggiunta a quelle di natura obbligatoria.

Peraltro, la circostanza per cui l'inizio di ogni attività nucleare avviene a valle del montaggio impiantistico-funzionale, riduce notevolmente le difficoltà aggiuntive che si avrebbero qualora si dovesse operare in presenza di emissioni radioattive o a contatto di componenti attivati.

Viceversa, la più specifica competenza è richiesta nel corso dell'esercizio degli impianti, ove ogni controllo sul mantenimento della funzionalità di questi non può prescindere dalla verifica di mantenimento delle proprietà resistenti delle strutture:

la conoscenza dell'impianto permetterà di prevedere un piano di ispezioni e di prove volte allo scopo, ovvero di approntare una rete di monitoraggio appropriata.

Nella fattispecie si devono controllare la non insorgenza di:

- cedimenti non previsti in fondazione (assoluti o differenziali);
- variazioni del livello di falda freatica;
- diminuzione delle caratteristiche meccaniche delle membrature resistenti;
- lesioni.

Qualora si rilevassero effetti non desiderati, dovrà essere valutata la loro entità e/o dovranno essere ideate soluzioni per la loro riduzione o il loro annullamento, tralasciando il grado di sicurezza iniziale. Nel *decommissioning*, che costituisce l'insieme delle attività volte alla dismissione in sicurezza dell'impianto, sono spesso richieste valutazioni di tipo statico necessarie allo smantellamento selettivo di parti di impianto, alla rimozione di componentistica, o alle riduzioni di spessore di pareti e solette dovuti alla scarificazione di strati contaminati.

Qualora sia prevista l'opzione "prato verde", vale a dire il completo ripristino della situazione ambientale antecedente l'installazione, entrano in gioco le problematiche tipiche delle attività di demolizione, che sono ad alta attenzione ambientale e richiedo-

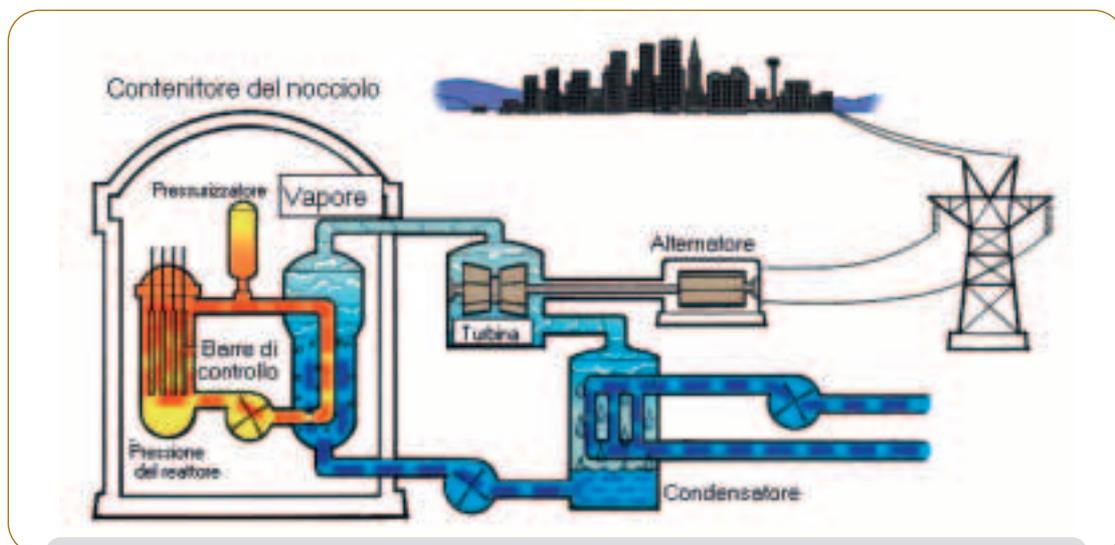
no l'approntamento di accurati piani di progressivo smantellamento e di allontanamento (con successivo eventuale riutilizzo) dei residui.

Tecniche di smantellamento tipiche sono quelle di separazione (mediante azione di taglio idraulico o meccanico, agente chimico, esplosione localizzata), che possono anche essere finalizzate a provocare un "collasso controllato", cui seguirà la raccolta differenziata ed automatizzata dei residui; per le parti più delicate di impianto si ricorre invece all'utilizzo di taglio con raggio laser o comunque a sistemi remotizzati.

Sono di particolare interesse i progetti, spesso proposti, di utilizzo di impianto dismesso ai fini di prove sismiche in scala reale, con terremoti simulati mediante applicazione di vibrodine.

### Interventi su impianti esistenti

Come per qualsiasi opera strutturale, nel corso della vita di un impianto può presentarsi la necessità di dover procedere ad interventi di rinforzo, a modifiche strutturali e a riparazioni; queste ultime possono essere effettuate sia nell'ambito di una prevista manutenzione che a valle di indesiderate evenienze. Nel caso degli impianti nucleari, stanti le superiori esigenze di sicurezza e la più difficile operatività, già in fase di progetto si cerca di eli-



**Figura 7**  
 Schema di funzionamento di una centrale elettronucleare  
 Fonte: immagine tratta da Internet

minare a monte ogni causa di possibile futuro intervento, al di là di quelli previsti per una normale programmata manutenzione; questa, del resto, è una azione che rientra tra quelle del normale esercizio, fino a che non venga eventualmente deciso un procrastinamento della chiusura dell'impianto stesso.

In ogni caso, il grado di sicurezza offerto da un impianto non deve mai diminuire né per cause intrinseche (deterioramenti, rotture ecc.) né a fronte di aumentati carichi di progetto.

Pertanto ogni intervento dovrà essere progettato e realizzato secondo il medesimo iter autorizzativo previsto per le opere ex-novo; tuttavia, a seconda dell'esigenza che ne detta l'opportunità, dal punto di vista formale gli interventi o una serie di interventi possono essere prescritti per:

- modifica di impianto: per esigenze operative o distributive, una o più membrature si trovano a dover resistere a carichi superiori rispetto quelli del progetto iniziale;
- riparazioni: si riscontrano indebolimenti delle strutture portanti, dovute all'invecchiamento o alla fatica, o a seguito di incidenti;
- riqualificazione dell'impianto: per l'intera opera viene prescritto uno standard di sicurezza superiore, e quindi un aumento dei carichi progettuali.

Va precisato comunque che, in alcuni casi, per ottenere una qualifica superiore può essere sufficiente un calcolo più accurato, generalmente effettuato con l'ausilio di strumenti di calcolo più raffinati o più aggiornati, oppure la conduzione dell'analisi con condizioni al contorno più realistiche ma non meno prudenziali.

Negli anni 80 fu riqualificata similmente la centrale nucleare di Trino, per la quale furono prescritti e realizzati degli interventi specifici; come per le centrali di Latina e Garigliano, il progetto risaliva alla fine degli anni 50 ove, coerentemente alle metodologie di analisi all'epoca correnti, le forze sismiche erano tenute in conto mediante l'applicazione di una accelerazione orizzontale alle masse statiche pari a 1/20 delle forze di gravità (valore ben inferiore allo 0,18 g minimale previsto nel PUN). Oltre alle verifiche puntuali di prassi, veniva solitamente indagata anche l'adeguatezza dei giunti strutturali, stante la possibilità di urti tra strutture contigue.

Dal punto di vista tecnico-operativo, le tecnologie di intervento non si differenziano tra loro nei citati casi, avendo esse la medesima finalità migliorativa, e spesso gli interventi stessi possono avere molteplice valenza; la materia è in continua evoluzione, e procede di pari passo ai progressi tecnologici nel campo specifico.

Quasi sempre però è da tenere in conto l'evenienza di dover operare in zona controllata, ove si impone il rispetto di tempi ristretti e spazi ridotti, o il ricorso a sistemi remotizzati.

Per una breve rassegna delle tecnologie impiegate, queste possono essere catalogate come rinforzo strutturale o come riparazione.

### *Rinforzi*

La casistica dei tipi di rinforzo strutturale e delle loro messe in opera è estremamente vasta e di difficile catalogazione; si citano tuttavia le più tipiche applicazioni, realizzate o suggerite sui tuttora esistenti impianti nucleari italiani, che prevedono l'introduzione di:

- controventi;
- piastre in acciaio;
- smorzatori;
- micropali di fondazione;
- rivestimenti con malte e conglomerati speciali.

Assimilabili ai rinforzi strutturali sono tutti quegli interventi che avvengono sulle strutture senza l'introduzione di nuovi elementi; si citano in particolare:

- realizzazione o allargamento di giunti strutturali, onde evitare fenomeni di "battimento";
- tagli su parti di struttura per ottenerne il disaccoppiamento dinamico;
- eliminazione di parti strutturali, per alleggerimenti o induzione di diverso modo di vibrare.

### *Riparazioni*

Nel corso di ispezioni periodicamente previste, all'interno e all'esterno di edifici ed opere di impianto, può essere rilevato un deterioramento di materiali e componenti, che sono tipicamente

- nelle parti in acciaio: ossidazioni di profilati, allentamento e spostamento di vincoli;
- nel calcestruzzo: ammaloramenti delle superfici, affioramento o sfilamento delle armature, formazione di fessure, passanti e no.

Le modalità di intervento variano non solo in base

alla tipologia del dissesto rilevato, ma anche della sua entità e della sua estensione nell'intera opera: dissesti generalizzati chiamano in causa un'errata scelta dei materiali o la sottovalutazione degli effetti dei fenomeni esterni (microclima, aggressioni ambientali, vapori ecc.), mentre dissesti localizzati evocano più spesso disuniformi modalità di messa in opera, carichi mal distribuiti e cedimenti geotecnici differenziali.

È compito dell'ingegneria civile effettuare costantemente una attenta disamina della situazione, onde evitare di effettuare ingenti interventi di riparazione laddove il danno non sia grave o localizzato o, viceversa, progettare interventi-tampone di scarsa efficacia e durata, come avviene quando non si conosce con esattezza l'origine.

Mentre per le strutture metalliche può essere effettuata più facilmente la sostituzione di componenti, per le strutture in calcestruzzo si può ricorrere ad una molteplice offerta di prodotti, a base di malte epossidiche che, mediante loro iniezione, consentono il ripristino delle prestazioni iniziali, o addirittura il loro aumento.

Al limite tra la riparazione e l'intervento preventivo sono poi tutte quelle opere sui terreni circostanti ove, a seconda dei casi, può essere richiesto un aumento della compattezza (producibile, oltre che con la compattazione meccanica, con l'iniezione di miscele rinforzanti o l'inserimento di micropali prefabbricati) o delle capacità drenanti; in tal senso si possono considerare anche le opere atte all'allontanamento di acque stagnanti o all'impedimento della salita della quota di falda freatica, ottenibile con l'implementazione di sistemi di dewatering a funzionamento continuo.

## Bibliografia

- [1] Lombardi, C., *Impianti Nucleari*, CLUP Milano, 1987.
- [2] IAEA, Safety Standard Series No. SF-1, *Fundamental safety principles*.
- [3] Petrangeli, G., *Sicurezza nucleare*, ETS, 2003.
- [4] Pino, G. et al., *Criteri, procedure e prescrizioni per la protezione degli impianti nucleari contro gli eventi sismici*, RT ENEA-DISP, 1986.
- [5] Joseph, J., *Structural Engineering in Nuclear Facilities*, ASCE, Uccifero Editor, 1984.
- [6] Angelelli, G., *Le strutture civili delle installazioni nucleari: criteri di progetto e loro comportamento in condizioni incidentali*, tesi di laurea ENEA-La Sapienza, Roma, 2010.
- [7] Paton, A., Benwell, E., Irwin, T., *Civil Engineering Design for Decommissioning of Nuclear Installations*, Graham and Trotman Ltd.
- [8] Report EUR 9568 EN, *Treatment of Active Concrete Waste arising from the Dismantling of Nuclear Facilities*.

## Conclusioni

Sono stati esposti i principali aspetti ingegneristico-civili connessi alle attività nucleari, che intervengono nelle fasi di localizzazione, progettazione, costruzione, esercizio e dismissione delle installazioni necessarie; le relative competenze possono essere coinvolte nell'alternativa parte di progettista/ costruttore/esecutore e di controllore della sicurezza radiologica.

L'impostazione della rassegna ha riflettuto le metodologie dei processi di sicurezza, ove le organizzazioni preposte alle attività di controllo sono solitamente organizzate "a matrice", in modo tale che il percorso di un iter istruttorio e/o approvativo possa intersecare esaustivamente tutti quelli, indipendenti e specialistici, di ogni analisi tecnica attivata ai fini delle verifiche di sicurezza. Pertanto, queste analisi devono essere svolte da unità formate da tecnici esperti nelle tematiche di ogni disciplina ingegneristica, non solo di quella meramente nucleare, e in grado di interrelazionarsi efficacemente tra loro.

Le problematiche che l'ingegneria civile affronta, rappresentano in campo nucleare la più stretta interfaccia con il contesto ambientale ed antropico; è quanto mai necessario quindi che ogni risorsa, umana ed organizzativa ad essa afferente, possieda il più alto grado di qualificazione e affidabilità, e venga coordinata in modo ottimale.

Di ciò dovrà essere tenuto conto nella imminente ripresa delle attività nucleari a fini energetici, che richiederanno, assieme alle ingenti realizzazioni che dovranno essere implementate, un impegno da parte delle istituzioni a far sì che non venga disperso, ma anzi incrementato, il patrimonio tecnico-scientifico tuttora esistente e disponibile.