



Scuola di Specializzazione  
in Costruzioni in Cemento Armato  
Fratelli Pesenti

Graduate School  
in Concrete Structures  
Fratelli Pesenti

V. 23

STUDI E RICERCHE  
STUDIES AND RESEARCHES

Italcementi S.p.A., Bergamo - Editore  
2002

## LA MODERNA STRATEGIA PER LA REALIZZAZIONE DELLE GRANDI OPERE CIVILI : L'ALLARGAMENTO DELL' EUROPA ALL'EST

Antonio Migliacci<sup>1</sup>, Giulio Burchi<sup>2</sup>, Maurizio Acito<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano

<sup>2</sup>Ingegnere Civile, Presidente della Società Metropolitana Milanese S.p.A., Milano

<sup>3</sup>Ingegnere Civile, Diplomato alla Scuola F.lli Pesenti del Politecnico di Milano

### SOMMARIO

Nella memoria vengono presentate le linee-guida dettate dalle moderne strategie che governano la realizzazione delle grandi opere civili. Per tali opere gli obiettivi da considerare sono diventati via via più numerosi, tant'è che è ormai quasi indispensabile fare ricorso a materiali e tecniche costruttive speciali, in modo da soddisfare al meglio la maggior parte degli obiettivi e da limitare l'uso delle tecniche di ottimizzazione ai restanti. Va aggiunto anche che alcuni obiettivi sfuggono a razionali procedure scientifiche.

In particolare si mostrano le ragioni indiscutibili che favoriscono l'impiego dell'acciaio inossidabile per le armature (barre, fili e reti) e dei calcestruzzi speciali (ad alte prestazioni/alta resistenza, fibrorinforzati ed autocompattanti), in quanto tali materiali soddisfano già molte esigenze di resistenza, durabilità ed economicità nel tempo.

Infine i vantaggi dell'uso di questi materiali vengono ulteriormente messi in luce dall'impiego del metodo probabilistico nello studio delle loro ottime caratteristiche.

### SUMMARY

In this paper the guidelines suggested by the most recent strategies concerning the design and construction of any major building or structure are recalled. Since the objectives to be met are becoming increasingly numerous, special materials and innovative building techniques should be adopted, in order to satisfy most of the requirements and to limit the application of the optimization techniques to the remaining variables. However, it is fair to say that several of the objectives escape any rational optimization procedure.

Going to details, the unquestionable reasons why using stainless-steel reinforcement (bars, wires and meshes), as well as innovative cementitious composites (like high-performance/high-strength concrete, fiber-reinforced concrete and selfcompacting concrete, HPC/HSC, FRC and SCC) is becoming increasingly popular and should be favored, are discussed.

Last but not least, the application of the probabilistic approach to the study of the excellent properties of these materials is also addressed.

## 1. PREMESSE

Il problema di individuare strategie razionali per la realizzazione delle grandi opere civili costituisce un tema di primaria importanza per tutti i paesi membri d'Europa. Soprattutto di fronte all'integrazione di altri Paesi, con l'allargamento a SUD/EST, giacché per tali Paesi, fra gli altri presupposti, si ha la necessità di adeguare le loro reti materiali e immateriali agli standard europei, in particolare le loro infrastrutture di trasporto (ad esempio, [1]). In Italia, per la realizzazione di tali opere pubbliche è acquisita ormai una precisa strategia che fa capo alla Legge quadro sui LL.PP. e al relativo Regolamento Attuativo ([2]).

Precisamente, assunta in termini politici, economici finanziari la determinazione di realizzare una determinata opera, e verificatane l'adeguatezza territoriale, urbanistica e sociale (tutto questo, come è noto, fa capo alla Legge Obiettivo e al relativo Regolamento, [3]), dal punto di vista tecnico operativo si tratta di individuare la soluzione ottimale fra tutte quelle tecnicamente valide ed ugualmente possibili, tenendo di vista numerosi obiettivi. Si spiegano così talune scelte della soluzione che, in verità, possono non corrispondere al minore costo d'impianto, ma hanno dalla loro la possibilità di soddisfare bene ad altri importanti obiettivi, con il risultato di far apparire tale soluzione migliore delle altre.

La soluzione individuata, come è noto, passa attraverso tre fasi successive di progetto (preliminare, definitivo, esecutivo), ma già nel preliminare deve essere data dimostrazione di tale ottimalità, e sarà poi solo col progetto esecutivo, messo in gara d'appalto, che si cercherà di strappare il migliore prezzo alle Imprese.

Però l'opera, come si è detto, può benissimo non essere quella di minore costo d'impianto.

Questa strategia ha voluto sanare una discrasia venuta alla luce in maniera clamorosa in più di una circostanza, e che è costata cifre enormi di danni diretti ed indiretti alla Società. Non interessa, infatti, realizzare opere di minore costo d'impianto se poi durante il servizio si hanno costi ed oneri esagerati che ribaltano totalmente il risparmio ottenuto al momento dell'impianto. La figura 1 la dice lunga a questo riguardo: il costo che si deve cercare di minimizzare è quello corrispondente all'intero ciclo di vita dell'opera, cosicché può benissimo darsi che opere più costose come impianto abbiano poi in servizio costi assai minori (di controllo, manutenzione, ecc., nonché indiretti), col risultato d'essere assolutamente preferibili.

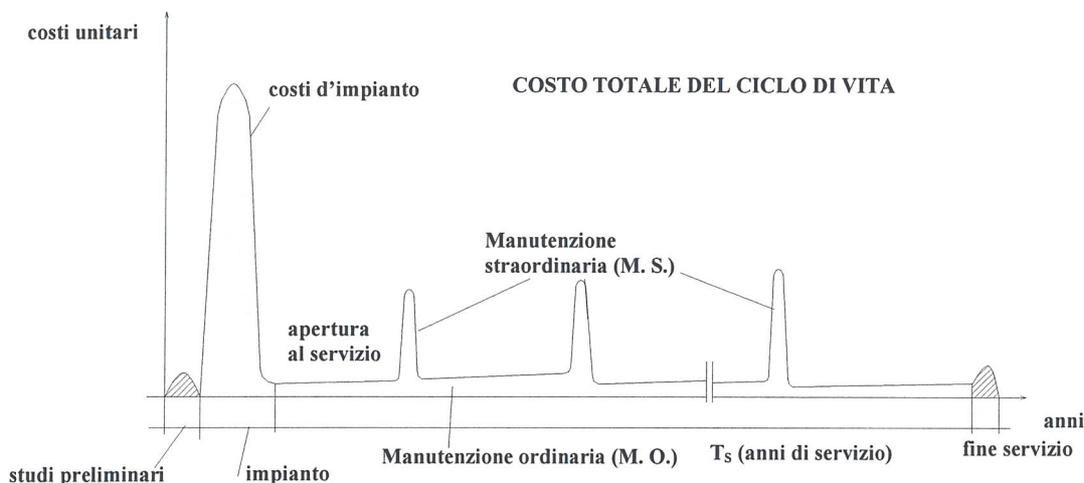


Fig. 1: Costo totale del ciclo di vita

Pur con le gravi incertezze di come conteggiare taluni costi indiretti (ad esempio, quelli connessi ai danni alle persone), stando ai costi diretti e a quelli indiretti monetizzabili, la minimizzazione del Costo Totale di Vita fa capire come per le opere pubbliche sia di grande importanza ridurre il costo di servizio, contenendo al massimo i costi connessi alla Manutenzione Ordinaria (M.O.≡sorveglianza, interventi sulle finiture, opere secondarie, ecc.) ed evitando di dovere ricorrere ad opere di Manutenzione Straordinaria (M.S.≡ interventi su strutture, opere principali, ecc.).

Si spiega così come negli ultimi decenni siano diventati sempre più attuali gli studi e le prescrizioni rivolti ad ottenere la durabilità delle costruzioni, a partire dalle proprietà intrinseche dei materiali impiegati sino alle caratteristiche proprie degli elementi costruttivi che formano l'opera. Pertanto, agli obiettivi tradizionali richiesti ad una costruzione, i quali, come è ben noto, riguardano le grandezze "meccaniche", ossia la resistenza, la rigidità, la duttilità e la tenacità, si è prepotentemente aggiunta la durabilità.

Si possono ricordare a questo riguardo le "Linee Guida per i calcestruzzi strutturali" della Presidenza del Consiglio Superiore LL.PP. ([4]), nonché le considerazioni teoriche qualitativamente illustrate nella figura 2, che traduce in termini scientifici la affermazione corrente "chi più spende meno spende". Cioè, mettendo in conto i costi di servizio (anche solo quelli monetizzabili) una progettazione razionale dovrebbe farsi con riferimento a valori minori della probabilità di insuccesso  $P^*$ , il che si traduce nel realizzare opere con maggiori e più garantite grandezze meccaniche, ossia con un maggior costo d'impianto.

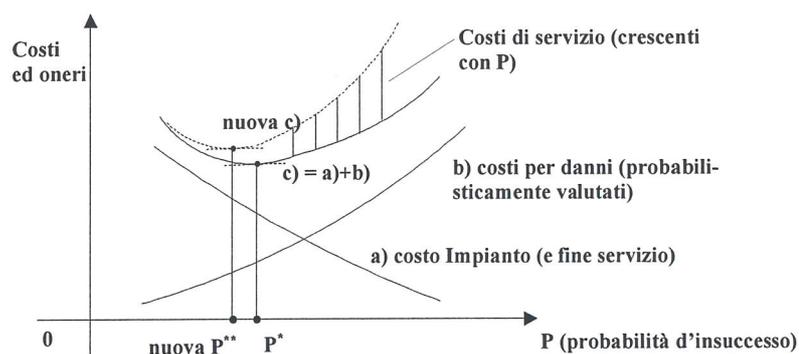


Fig. 2: Determinazione della  $P^*$  di progetto

La progettazione razionale da compiersi per la probabilità  $P^*$  corrispondente al minimo della curva  $c)=a)+b)$ , ove si mettano in conto i costi di servizio, va compiuta invece per la nuova probabilità  $P^{**}$  sul minimo della nuova curva  $c)$ , (vedasi anche [5]).

Tuttavia, proprio negli ultimi decenni si sono presentati nuovi obiettivi da soddisfare. La società civile ha reclamato sempre più insistentemente il rispetto ambientale, sotto ogni suo aspetto, sia nelle fasi stesse di cantiere, sia nel servizio, per la salvaguardia del territorio naturale e delle pre-esistenze storico-monumentali. E per di più, di fronte agli ultimi eventi disastrosi (Galleria del Monte Bianco, torri del World Trade Center), si è puntato l'obiettivo sulla necessità di salvaguardare inderogabilmente la vita umana.

Gli obiettivi si sono dilatati così fuori misura, rendendo assai ardua l'applicazione rigorosa di una procedura scientifica per l'individuazione della soluzione ottimale. Che cosa si può fare allora di fronte a questa difficile situazione? Nel campo delle opere pubbliche che la Metropolitana Milanese (MM) realizza, questo interrogativo si presenta pesantemente ad ogni passo, proprio perché l'attività della MM è quella di realizzare opere di utilità sociale per la collettività la quale pretende la soluzione ottimale: nel "triangolo" che regge l'attività di MM (innovazione, utilità sociale, profitto) tale utilità sociale è certamente il vertice più importante.

## 2. GLI OBIETTIVI E LA PROCEDURA DI OTTIMIZZAZIONE

Prima di dare indicazioni per semplificare il problema, conviene vedere, innanzitutto, il complesso degli obiettivi coi quali si ha a che fare e, poi, mostrare i termini operativi di una possibile procedura scientifica.

Salvo situazioni particolari che possono diversamente delimitare od orientare il quadro degli obiettivi, si può proporre per essi il seguente elenco, il quale non stabilisce alcuna priorità, con cinque obiettivi per ciascuna delle tre categorie fondamentali di “materiale”, “costruzione” e “servizio”, anche se in effetti non v'è una netta separazione fra le categorie:

- “materiale”
  - 1) resistenza
  - 2) rigidità
  - 3) duttilità e tenacità
  - 4) durabilità
  - 5) resistenza al fuoco
- “costruzione”
  - 6) versatilità della costruzione (riparabilità, adattabilità, sostituibilità degli elementi)
  - 7) facilità della costruzione (nell'esecuzione e nell'accettazione)
  - 8) costo d'impianto
  - 9) tempi di realizzazione (a partire dagli studi preliminari)
  - 10) impatto di cantiere
- “servizio”
  - 11) costo di servizio
  - 12) sicurezza di servizio (priorità della salvaguardia umana)
  - 13) impatto ambientale
  - 14) impatto storico-monumentale
  - 15) costo del territorio.

Per quanto riguarda una possibile procedura scientifica per individuare la soluzione ottimale, la sua forma canonica si muove attraverso i seguenti termini operativi.

Precisamente, la soluzione che va perseguita, fra tutte quelle tecnicamente valide ed ugualmente possibili, è proprio quella che massimizza il rapporto benefici/costi nei confronti dei suddetti quindici obiettivi, i quali sono quasi sempre fra loro conflittuali.

A questo riguardo, già si è vista la conflittualità tra i costi d'impianto e di servizio, i quali sono orientati in direzione opposte (al diminuire dell'uno cresce l'altro e viceversa). Più concretamente, si può citare il caso delle armature metalliche di un pontile, vantaggiosamente realizzate in acciaio inossidabile, più costoso, ma molto più duraturo di un acciaio comune.

I termini operativi per individuare la suddetta soluzione ottimale sono quindi rigorosamente i seguenti:

- a) la generica soluzione sia individuata da  $s$  grandezze base di valore  $x_1, x_2, \dots, x_s$ , ossia dal vettore  $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_s)$ , nello spazio  $R^{(s)}$  ad  $s$  dimensioni;
- b) la ottimizzazione cercata corrisponde per l' $i$ -esimo obiettivo, fra i  $k=15$  obiettivi che si è detto esservi, a minimizzare un'apposita funzione obiettivo  $f_i(\vec{X})$ , ossia a minimizzare il vettore

$$\vec{Z} = (f_1(\vec{X}), f_2(\vec{X}), \dots, f_k(\vec{X})) \quad (1)$$

nello spazio  $R^{(k)}$  a  $k$  dimensioni;

- c) la realizzazione in esame, ossia l'opera da realizzare, ha però alcuni vincoli, ai quali nessuna delle soluzioni può sfuggire; tali vincoli, in numero di  $n$ , siano descrivibili da disuguaglianze del tipo

$$g_j(\vec{X}) \leq 0, \quad (j=1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

cosicché soltanto le soluzioni "condizionate"

$$\vec{X} | g_j(\vec{X}) \leq 0, \quad (j=1, 2, \dots, n),$$

sono soluzioni possibili. L'insieme di tali soluzioni  $\vec{X} | g_j(\vec{X}) \leq 0$  soddisfacenti ai vincoli, che si dice anche "insieme di punti di progetto vincolati", ossia:

$$X = \vec{X} | g_j(\vec{X}) \leq 0, \quad (j=1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

è l'insieme delle soluzioni ammissibili.

Come esempio assai banale di vincoli  $g_j(\vec{X}) \leq 0$ , si può citare il caso dell'altezza  $h$  delle travi di un cavalcavia stradale (fig. 3),

$$h - [(q_e - q_i) - d] \leq 0. \quad (4')$$

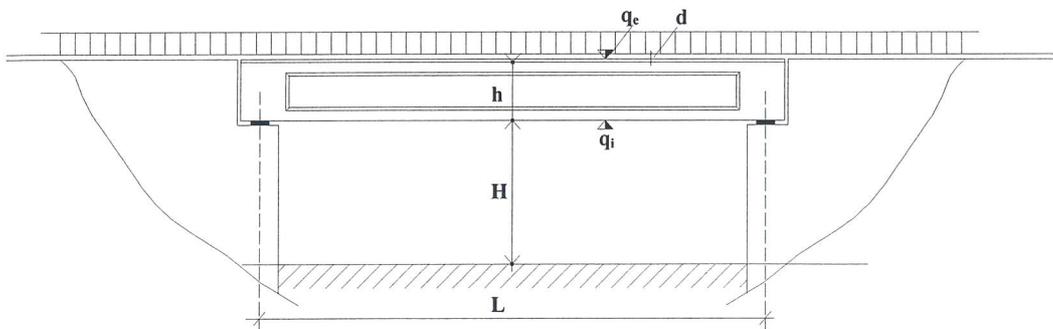


Fig. 3: Vincolo progettuale in un cavalcavia

Come si è mostrato a più riprese, nella pluralità degli obiettivi in gioco, questi sono in genere a due a due in conflitto (ad esempio, [6]), ossia due funzioni  $f_i(\vec{X})$  e  $f_j(\vec{X})$  sono dette globalmente in una conflitto nell'insieme  $X$ , (3), se le due ottimizzazioni  $\min_{\vec{X} \in X} f_i(\vec{X})$  e  $\min_{\vec{X} \in X} f_j(\vec{X})$  conducono a soluzioni differenti.

Non esiste quindi una soluzione che soddisfi completamente e contemporaneamente a tutti gli obiettivi. Esiste però un sottoinsieme  $\bar{L} \in X$  di soluzioni tale che nei confronti di ciascuna sua soluzione,  $\bar{X}^* \in L$ , qualsiasi altra soluzione ammissibile, cioè dell'insieme  $X$ , può migliorare alcuni obiettivi solo alla condizione di peggiorarne altri. Le soluzioni ammissibili  $\bar{X}^* \in L$  vengono dette soluzioni ottime di Pareto (ad esempio,[7]).

Purtroppo, tali soluzioni ottime di Pareto costituiscono una infinità non numerabile, cosicché occorre introdurre concetti soggettivi di giudizio, cioè si dice che necessita "l'interazione con l'uomo" al fine di potere estrarre da tale infinità di soluzioni quella più soddisfacente.

Precisamente, per misurare l'appartenenza di una determinata soluzione ottima nel senso di Pareto al concetto di "soluzione soddisfacente", proprio al fine di attenuare la soggettività di giudizio dell'uomo, si può fare ricorso agli strumenti della logica "fuzzy". Con tale logica, occorre attribuire opportune funzioni di appartenenza, membership functions,  $\mu_i$  ( $i=1,2, \dots,k$ ), alle  $k$  funzione obiettivo  $f_i(\vec{X})$ , ossia formulare per i diversi obiettivi un giudizio "fuzzy" (ad esempio, [8]). Cioè, il giudizio dell'operatore, "Decision Maker", per l' $i$ -esimo obiettivo viene quantificato assegnando ad ogni valore  $f_i(\vec{X})$  ottenibile per ogni  $f_i$  un grado di soddisfacimento espresso appunto dalla:

$$\mu_i(f_i(\vec{X})) \tag{5}$$

di valore compreso fra 0 ed 1, ([9]).

E poiché si tratta di minimizzare  $f_i$ , le funzioni  $\mu_i(f_i)$  saranno monotone decrescenti nell'insieme  $Y_i$  dei valori  $y_i=f_i$  che si possono avere, con i significati estremi:

valore  $\mu_i=1$ , quando  $f_i(\vec{X})$  è completamente soddisfacente,

valore  $\mu_i=0$ , quando  $f_i(\vec{X})$  è completamente insoddisfacente.

Valori intermedi esprimono con continuità la graduazione di giudizio, come è rappresentato nella figura 4.

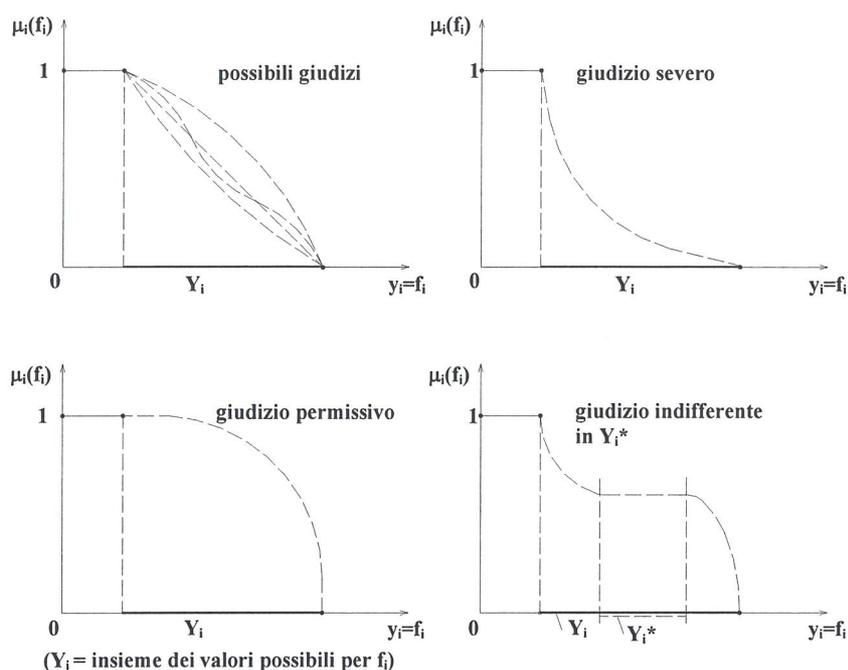


Fig. 4: Importanza dei giudizi

In tal modo, ci si viene a riferire come modello matematico del giudizio all'insieme sfuocato, "fuzzy set":

$$\tilde{G} = \{f_i, \mu_i(f_i) | f_i \in Y_i\}, (i = 1, 2, \dots, k) \quad (6)$$

essendo

$$Y_i = \{y_i = f_i(\bar{X}) | \bar{X} \in X\}, (i = 1, 2, \dots, k).$$

Tuttavia, poiché gli obiettivi sono fra loro conflittuali, non esiste una soluzione  $\bar{X} \in X$  che porti ad 1 tutte le funzioni di appartenenza, cosicché in modo simile a quanto già fatto per le  $\bar{X}$ , si deve parlare di soluzione ottima di  $\tilde{M}$ -Pareto, ossia Number  $\tilde{M}$ -Pareto, ([8]), in termini di  $\mu_i(f_i(\bar{X}))$ .

In buona sostanza, si può riconoscere che la procedura opera attraverso due trasformazioni successive di spazi, da quello delle soluzioni ammissibili a quello degli obiettivi e poi da questo a quello delle funzioni di appartenenza.

Precisamente, con la prima trasformazione si passa dal sottoinsieme  $L \in X$ , nello spazio  $R^{(s)}$  delle  $s$  grandezza base, all'insieme  $I$  immagine di  $L$  attraverso la (1), ossia:

$$Q = \{\bar{Z}(f_1(\bar{X}), f_2(\bar{X}), \dots, f_k(\bar{X})) | \bar{X} \in L\}, \quad (7)$$

nello spazio  $R^{(k)}$  delle  $k$  funzioni obiettivo  $f_i$ , (fig. 5, per il caso  $s=2, k=2$ ).

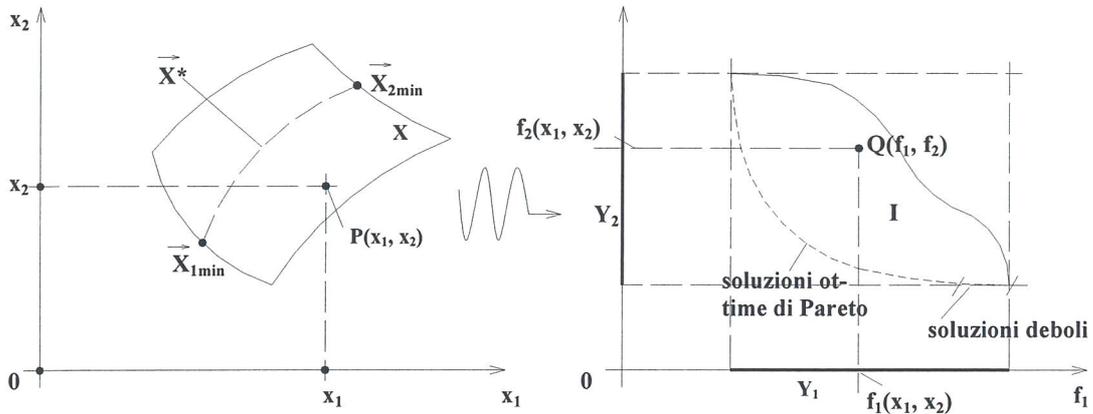


Fig. 5: Trasformazione nello spazio delle funzioni obiettivo

Con la seconda trasformazione si passa dall'insieme  $I$  alla sua immagine  $I'$  attraverso il modello (6), nello spazio  $R^{(k)}$  delle  $k$  "membership"  $\mu_i$ , (fig. 6, sempre per il caso  $k=2$ ).

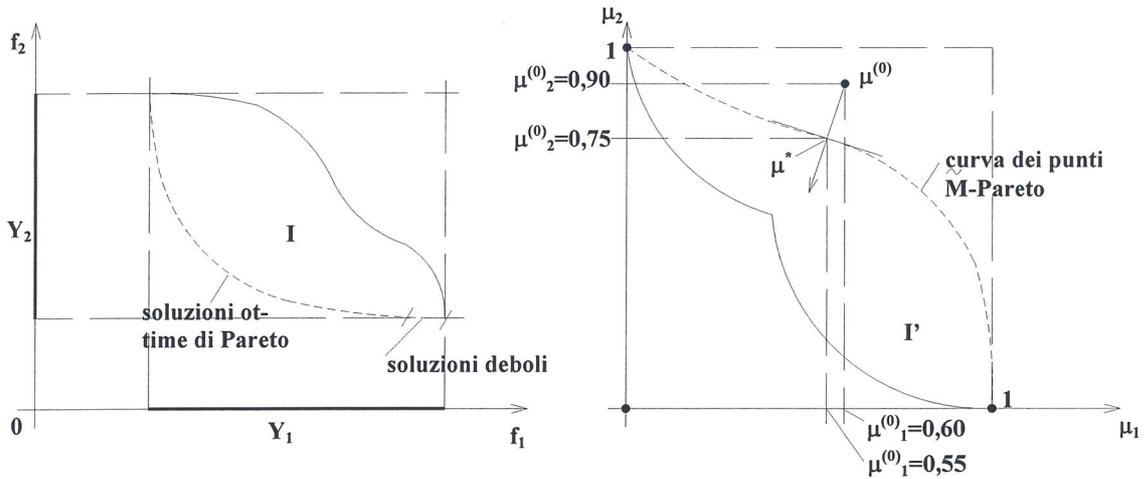


Fig. 6: Trasformazione nello spazio delle membership functions

Il "Decision Maker" nella ricerca della soluzione si propone di soddisfare agli obiettivi in un modo determinato, ad esempio fissando il punto di riferimento, o vettore desiderato:

$$\mu^{(0)} = (\mu_1^{(0)}, \mu_2^{(0)}, \dots, \mu_k^{(0)}), \quad (8)$$

nello spazio  $R^{(k)}$  delle funzioni di appartenenza, ([9]).

Per esempio con i due obiettivi di figura 6, stando alti nei desideri, si potrebbe fissare  $\mu_1^{(0)}=0,60$  e  $\mu_2^{(0)}=0,90$ , il che vorrebbe dire che, su un "monte premi" di valore 1,50, se ne è

assegnato il 40% (ossia appunto 0.60) all'obiettivo 1 e il 60% (ossia 0,90) all'obiettivo 2. Purtroppo, il punto desiderato sta al di fuori dell'insieme  $I'$ , il che significa che esso non è realizzabile (ossia che ad esso non può corrispondere alcuna soluzione), cioè, in sostanza, che si è desiderato troppo. La soluzione più prossima al punto  $\mu^{(0)}$  è rappresentata dal punto  $\mu^*$  della curva  $\tilde{M}$ -Pareto posto alla minima distanza. Il problema è così rimandato alla soluzione numerica di un problema di minima distanza, per il quale occorre primariamente stabilire la metrica di misura (ad esempio, [10]).

Nel caso della figura 6, potrebbe risultare che ci si deve accontentare di  $\mu_1^*=0,55$  e  $\mu_2^*=0,75$ , il che vorrebbe dire che, innanzitutto ci si deve accontentare di un “monte premi” pari a 1,30, e poi che occorre spostare le assegnazioni per circa il 42% (ossia appunto 0.55) sull'obiettivo 1 e per circa solo il 58% (ossia 0,75) sull'obiettivo 2, rinunciando di più a questo.

Se invece il punto  $\mu_1^{(0)}$  è interno ad  $I'$ , ci si può dire soddisfatti da almeno una soluzione sulla curva dei punti  $\tilde{M}$ -Pareto.

Come si può ben capire, per una soluzione agile del problema di ottimizzazione conviene ridurre il numero  $k$  degli obiettivi, anche perché, con al massimo  $k=3$ , è ancora possibile una rappresentazione geometrica degli insiemi  $I$  e  $I'$ , e questo può facilitare visibilmente la lettura della soluzione, ma soprattutto risultano meno onerosi i calcoli.

### **3. LA MODERNA STRATEGIA BASATA SULLE PROPRIETÀ DEI MATERIALI E SULLE CARATTERISTICHE DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI**

La moderna strategia prende a frutto i miglioramenti e le innovazioni ottenuti dall'industria nel campo dei materiali da costruzione e i ritrovati acquisiti nel campo della tecnologia da parte dei progettisti e degli esecutori.

Non bisogna credere però che tali possibilità aprano sempre la strada taumaturgica per ottenere la soluzione, anche se invero togliere di mezzo alcuni obiettivi facilita assai una messa a punto della soluzione. Questo è il caso degli acciai inossidabili e dei calcestruzzi di nuova generazione, che si presentano come valida alternativa, talvolta addirittura ineguagliabile, rispetto alle altre possibilità offerte dalla scienza e dalla tecnica per facilitare la durata delle costruzioni, in particolare, la protezione delle armature metalliche nelle opere in calcestruzzo

strutturale, e quindi migliorare il tempo di vita di servizio  $T_S$ , abbassando il costo di servizio e ottimizzando in sostanza la soluzione.

### 3.1 Gli acciai inossidabili

Come è noto (ad esempio, [11]), la caratteristica comune alla famiglia degli acciai inossidabili è di contenere un elevato tenore di cromo (in genere maggiore del 13÷14%) che consente la loro "autopassivazione" mediante il ricoprirsi spontaneo in aria di un sottile strato protettivo di ossido di cromo.

È altresì noto che le armature in acciaio comune (ad esempio, del tipo FeB44k secondo l'attuale normativa [12]) possono corrodersi quando: a) la carbonatazione rende praticamente neutro il liquido alcalino contenuto nei pori della pasta cementizia, che non può quindi esercitare più la propria azione passivante, e/o b) il calcestruzzo a contatto con le armature contiene un tenore di cloruri superiore ad una soglia critica.

Pertanto, in assenza di carbonatazione e senza penetrazione di cloruri non pare esservi motivo di impiegare barre di acciaio inossidabile. Tuttavia, anche in questo caso, per le opere pubbliche, cui si chiedono anni di vita  $T_S$  di secoli, è buona norma impiegare i più costosi acciai inossidabili per due buoni motivi: il primo è legato al fatto che nel servizio di secoli anche solo per cause ambientali, al di là di volute mutazioni o sconsiderate pratiche d'uso, si possono innescare fenomeni di carbonatazione o presentare insospettati livelli di cloruri; il secondo, conseguenza del primo, è che sta troppo a cuore il buon servizio dell'opera per correre il rischio di dovere correre ai ripari mediante onerosi interventi di Manutenzione Straordinaria, i quali peraltro, quando riguardano proprio le armature, non sempre garantiscono un risultato duraturo.

Naturalmente, se si presenta anche una sola delle suddette possibilità di attacco (carbonatazione e/o cloruri), le armature in acciaio comune non offrono l'assoluta garanzia, anzi, nel caso del cloruri, sarebbero assolutamente da sconsigliare. Comunque, le attuali normative (ad esempio, [13]) in relazione alla classe di esposizione definiscono i requisiti del calcestruzzo e lo spessore del copriferro per le strutture ordinarie in calcestruzzo con il presupposto di garantire una vita utile  $T_S$  di 50 anni. E in effetti, mediante idonei spessori di copriferro e, soprattutto, con l'impiego di idonee miscele di calcestruzzo a basso rapporto acqua/cemento, ed ugualmente dotate di una buona lavorabilità in relazione alle forme, ma comunque sempre con alti contenuti di cemento, e se occorre caratterizzandone il tipo (ad esempio, d'altoforno CEM

III/B), la vita utile può risultare praticamente garantita, nei casi ordinari, sui valori richiesti  $T_s$  di 50 anni ed anche di più. Lato calcestruzzo, come si vedrà in 3.2, le cose migliorano nettamente con l'impiego dei nuovi calcestruzzi.

Tuttavia, se è vero che l'evenienza della carbonatazione può essere tenuta a bada con tali procedure, che riguardano invero non solo la ricetta del calcestruzzo e i copriferri, ma l'intera geometria degli elementi e tutte le pratiche di cantiere, è altresì vero che, se si avesse la facile presenza di cloruri in percentuali che i più prudenti valutano anche solo nello 0,2% rispetto alla massa di cemento, nessuna armatura in acciaio comune, e in verità nessun calcestruzzo, sarebbe in grado di sopravvivere più che tanto in strutture esposte alla atmosfera. Ciò perché, quando si raggiunge tale soglia di cloruri, che molti Autori pongono fra lo 0,4% e l'1%, si innesca la corrosione delle armature e la struttura deve dirsi praticamente perduta (Stato Limite Ultimo di corrosione, [14]).

Orbene, non è che gli acciai inossidabili sono esenti da questo tipo di attacco, ma il contenuto di cloruri necessario per innescare la corrosione è assai più elevato. Anche se esso dipende da numerosi fattori, è certo che esso aumenta al crescere del contenuto di cromo, molibdeno e azoto nella lega dell'acciaio, il quale risulta quindi maggiormente resistente (ad esempio, il duplex più del 316 L e più ancora del 304 L). Si parla, nelle situazioni più disagiate (ad esempio, nelle zone sopra l'altezza delle maree nelle costruzioni marine), di soglie del 5%, alle quali invero possono far fronte anche i meno costosi 304 L.

I dati che configurano l'attacco sono quindi essenziali allo scopo di non commettere sprechi, giacché gli acciai inossidabili a secondo della lega di composizione costano da 6 fino anche a 10 volte più di quelli comuni. Pertanto, sotto questo riguardo, non è che debbano essere impiegati a tappeto in tutte le parti strutturali di un'opera, ma per un risparmio oculato possono essere vantaggiosamente impiegati solo laddove si temono le maggiori vulnerabilità (ad esempio, nelle zone di giunto dei ponti, dove si ha percolazione di acqua ricca di ioni cloro per i sali disgelanti sparsi sulla sede stradale, o nelle zone del bagnasciuga delle opere marine, o laddove la geometria dell'elemento impone più ridotti spessori di copriferro, come può accadere per i prefabbricati). Altresì, va tenuto presente che la soglia di concentrazione dei cloruri pericolosa per le armature va messa in relazione anche alla composizione del calcestruzzo: ad esempio, con cemento d'altoforno si hanno ben maggiori possibilità di resistenza, tanto che potrebbero non essere necessari gli acciai inossidabili, o comunque, in relazione alla specifica situazione, essere sufficienti gli inossidabili di lega più corrente, il che può verificar-

si ovviamente quando si impiegassero i nuovi calcestruzzi, ad esempio ad alta prestazione o ad alta resistenza.

Comunque, la possibilità di impiegare nella stessa costruzione acciai comuni e acciai inossidabili è ormai ampiamente asseverata (ad esempio, [15]): il pericolo di corrosione per contatto galvanico non aumenta affatto il rischio di corrosione per le armature ordinarie, cosicché l'accoppiamento è perfettamente possibile. Così pure è ormai garantita la saldabilità degli acciai inossidabili, con la giusta precauzione di rimuovere con sabbiatura in cantiere (o decapaggio in officina) gli ossidi di saldatura che si formano sulla superficie e che sottrarrebbero le barre alla loro naturale "autopassivazione".

Quando invece alla presenza di cloruri si accoppia la carbonatazione, come può accadere nelle strutture di rivestimento delle gallerie stradali, la soglia critica dei cloruri si riduce sensibilmente, cosicché si rende indispensabile ricorrere agli inossidabili di maggior pregio, agli austenitici con almeno il 2,5% di molibdeno o ai duplex. Come pure sarebbe quasi indispensabile ricorrere agli acciai inossidabili nelle opere in c.a.p. di riabilitazione o di rinforzo delle strutture esistenti con elementi metallici lasciati a vista, o per necessità poco protetti, come si avrà modo di vedere più avanti quando si dirà dell'obiettivo 6, versatilità della costruzione.

Tutti questi discorsi sono chiaramente mirati a mitigare l'opinione comune che l'impiego degli acciai inossidabili sia esageratamente costoso e a rivalutarne nel contempo l'impiego anche nei confronti delle altre forme note di protezione (acciai zincati, acciai rivestiti, inibitori di corrosione, rivestimenti del calcestruzzo, prevenzione catodica), alcune delle quali peraltro di efficacia limitata (ad esempio, la zincatura e il rivestimento delle barre da piegare poi in cantiere).

Per quanto ora visto, possiamo con tranquillità affermare che l'impiego "equilibrato" degli acciai inossidabili nelle costruzioni in calcestruzzo strutturale può sistemare automaticamente gli obiettivi 4, durabilità, ed 11, costo di servizio, non gravando più che tanto sull'obiettivo 8, costo d'impianto, proprio attraverso l'accortezza di "dosare" l'impiego degli inossidabili alle reali necessità dell'opera. Peraltro, come già si è detto, in determinate situazioni, quali le gallerie stradali, per l'obiettivo 12, sicurezza di servizio, l'impiego dell'acciaio inossidabile di qualità (almeno il 316 L) è d'obbligo, per la congiunta necessità di far fronte alla carbonatazione e ai cloruri, con una richiesta di vita  $T_S$  di secoli.

V'è però da chiedersi come si comportino gli acciai inossidabili a fronte degli altri obiettivi in elenco. Orbene, per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche rappresentate da-

gli obiettivi 1, resistenza, 2, rigidità, 3, tenacità e duttilità, il materiale può considerarsi allineato all'acciaio comune della Normativa (nel nostro Paese l'FeB44k, [12]). Anche la preoccupazione dei progettisti sismici di avere un eccesso di duttilità, cui potrebbero conseguire eccessi di deformabilità plastiche della struttura col pericolo di arrivare ad anticipate crisi per taglio, può essere superata attraverso il controllo appunto di tali deformazioni, che abbiano a dissipare ugualmente l'energia imposta da un sisma violento, nonché con l'eventuale integrazione di armature sussidiarie di protezione a taglio (se proprio occorresse).

Interessante è il comportamento al fuoco (obiettivo 5), per il quale va sfatata l'opinione di una minore possibilità di resistenza sotto incendi violenti a causa del maggiore valore del coefficiente di dilatazione termica lineare dell'acciaio inossidabile  $1,8 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , a fronte della acciaio comune  $1,2 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$  (se poi lo si paragona a quello del calcestruzzo  $1,0 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ), ove si metta in conto il fatto che la conducibilità termica della acciaio inossidabile è notevolmente inferiore rispetto a quella dell'acciaio comune. Le due circostanze si compensano a vantaggio notevole dell'acciaio inossidabile che, sotto incendio, si scalda molto meno, col risultato d'essere strutturalmente preferibile.

Per quanto riguarda poi la riduzione del suo carico di snervamento con la temperatura, è emblematica la figura 7. Poco oltre i  $600^\circ\text{C}$ , l'acciaio inossidabile si comporta in maniera nettamente superiore ad un acciaio comune, quindi ne è augurabile l'impiego proprio per i grandi carichi di incendio.

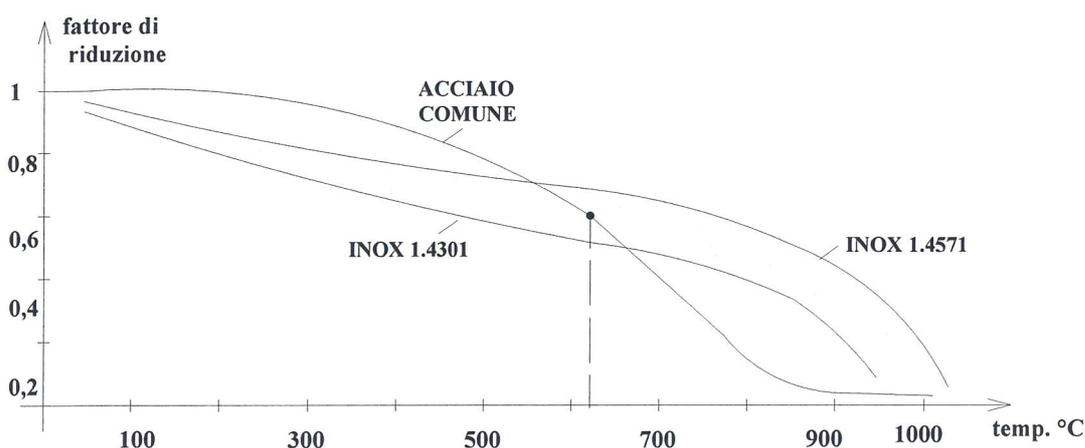


Fig. 7: Riduzione della tensione di snervamento in funzione della temperatura

Importante è infine il fatto che l'acciaio inossidabile mantiene la sua rigidità per un tempo circa tre volte superiore rispetto all'acciaio comune, quando è sottoposto a temperature sino

a ai 700-800 °C. E la sua resistenza all'ossidazione a caldo consente di sopportare più lunghe esposizioni alla fiamma.

Può anche essere d'utilità ricordare per la sicurezza di servizio (obiettivo 12), che l'acciaio inossidabile non diventa eccessivamente fragile alle basse temperature, anche di molto sotto allo zero, poiché mantiene ancora una buona tenacità.

A questo punto, paiono sistemati gli obiettivi 1, 2, 3, 4, 5, 11, e in parte anche il 12, mentre il costo d'impianto (obiettivo 8), in questa ottica di privilegiare il ridotto costo di servizio e la sua sicurezza, non può che essere rimandato alla fase di appalto, nella speranza di riuscire a strappare un buon prezzo alle Imprese concorrenti, assieme ad un buon tempo di esecuzione (obiettivo 9), i quali, come è noto, costituiscono i due parametri fondamentali per l'aggiudicazione dei lavori.

Restano quindi sul tappeto gli obiettivi 6 e 7, riguardanti la versatilità della costruzione e la sua facilità, entrambe essenzialmente connesse al pensiero progettuale, più o meno illuminato, nonché, all'interno dell'obiettivo 12, sicurezza di servizio, la tremenda questione legata alla priorità di salvaguardia della vita umana. Infine, resta aperto l'obiettivo 15, costo del territorio, che costituisce ormai una specie di sciagura moderna, assieme ai tre obiettivi riguardanti l'impatto dell'opera, per il cantiere, 10, l'ambiente, 13, e le pre-esistenze storico-monumentali, 14. E v'è subito da dire che a giocare il ruolo più determinante nella scelta della soluzione sono proprio questi ultimi obiettivi, di difficile valutazione tecnica e facenti capo solo alla cultura civile e politica della società, spesso di peso tale da orientare la soluzione in una direzione quasi obbligata.

Vale la pena di sottolineare alcuni aspetti riguardanti gli obiettivi tecnici 6 e 7 e spendere qualche parola per la parte angosciata dell'obiettivo 12 riguardante la salvaguardia della vita umana.

Proprio in questi ultimi decenni si è cominciato a considerare come un privilegio assai importante di una costruzione la possibilità di permettere la sostituibilità dei suoi elementi costruttivi.

L'avanzamento appunto delle conoscenze nel campo dei materiali e delle tecnologie, con le conseguenti innovazioni, fanno sì che sia importante potere "rigenerare" la costruzione sostituendone pezzi obsoleti con nuovi elementi moderni e più confacenti al bisogno. Questo concetto della sostituibilità si sposa con il gemello della adattabilità e con l'altro aspetto, assai prossimo, della riparabilità (obiettivo 6). La costruzione deve essere intelligentemente concepita come un organismo vivente, che possa adeguarsi nel corso della sua vita alle nuove esi-

genze, ammettere sostituzioni, facilitare, se occorre, le necessarie riparazioni. L'acciaio inossidabile, non solo nei prodotti lunghi (barre, fili e reti), può costituire un materiale assai privilegiato in queste operazioni, poiché le parti in acciaio che consentono tale operazioni possono restare spesso scoperte, o poco protette, e quindi è importante che possano conservarsi nel tempo senza pericolo di corrosione.

Anche la facilità della costruzione (obiettivo 7) dipende dall'intelligenza degli operatori, anzi, v'è da dire che tale obiettivo costituisce ormai un aspetto assai importante nelle scelte progettuali ed esecutive. Tuttavia, le ultime realizzazioni di grandi opere hanno dato luogo a soluzioni architettoniche e tipologiche sovente fuori dal tradizionale: costruzioni che sulla carta o nei plastici è stato facile immaginare, costruzioni che i moderni strumenti di calcolo e di verifica hanno anche consentito di asseverare, non senza invero una certa difficoltà, ma per le quali poi l'esecuzione ha presentato grossi problemi pratici, prolungatisi nelle fasi di accettazione prima dell'apertura servizio. Eppure v'è da ringraziare la fantasia e l'arte dei creatori di tali costruzioni per le quali, l'obiettivo 7 praticamente non è mai esistito, nel senso che con qualsiasi modo e prezzo la costruzione doveva essere realizzata così come era stata concepita, assolutamente senza varianti. E se così deve essere, occorre garantire la vita con l'impiego di materiali di qualità, quali l'acciaio inossidabile e, lato calcestruzzo, i nuovi calcestruzzi.

Infine, l'obiettivo 12 deputato, per la sua parte fondamentale, alla salvaguardia della vita umana. Questo aspetto della realizzazione di opere pubbliche è assunto prepotentemente ad un ruolo determinante alla luce dei tragici eventi di New York. Il problema si pone in questi termini, dato che materialmente è impossibile impedire tali catastrofi, sia perché le azioni che possono produrle non possono essere tassativamente escluse, sia perché l'arte del costruire è attualmente incapace di impedirne le conseguenze, le quali conducono sempre alla morte dell'opera.

La sicurezza di servizio, per la salvaguardia della vita umana, deve far sì che risulti prioritario (quindi con funzione di appartenenza assai prossima ad 1) avere a disposizione sistemi e mezzi di natura impiantistica, ovviamente corredati dalle necessarie parti strutturali a loro servizio, per il soccorso e l'evacuazione delle persone, correlando a tali sistemi e mezzi il tempo di sopravvivenza delle opere, delle quali peraltro è impossibile impedire la fine.

Si viene in tal modo a generare una nuova filosofia progettuale con la quale i creatori di tali opere pubbliche, consci della loro inevitabile fine di fronte a particolari eventi calamitosi, devono cercare di conferire alle opere un determinato tempo di sopravvivenza, per il quale saranno certamente privilegiati quei materiali (come l'acciaio inossidabile ed i nuovi calcestruzzi).

zi), appositamente studiati allo scopo, materiali che mostrano superiori comportamenti meccanici e fisici in tali circostanze (si ricordi, ad esempio, la questione della maggiore resistenza al fuoco). Ovviamente, tale caratteristica delle opere è aggiuntiva a quelle che ordinariamente ad esse si richiedono, quali appunto la resistenza, la rigidità e così via.

Prima di concludere, conviene riprendere il discorso sui tre obiettivi (11, 13 e 14) legati all'impatto delle opere (cantieri, ambiente e pre-esistenze), associandoli al costo del territorio (15). Si tratta di obiettivi che assumono quasi sempre un ruolo fondamentale, facendo mettere da parte altri obiettivi razionalmente molto importanti e sostanziali (quali, ad esempio, il costo d'impianto o la facilità della costruzione). Come si è detto, essi fanno capo alla cultura civile e politica della società ed obbligano talvolta la soluzione, al di fuori di ogni parametro economico e temporale, a seguire una strada quasi obbligata, soprattutto a causa del territorio, sempre più raro da reperire e da governare.

### **3.2 I calcestruzzi della nuova generazione**

Molte delle considerazioni fatte nel precedente punto 3.1 valgono ovviamente per il caso del calcestruzzo, costituendo spesso un'anticipazione di aspetti e di raccomandazioni. Comunque vi sono parecchie questioni specifiche che meritano una disamina a parte.

Orbene, come è noto, i calcestruzzi della nuova generazione sono stati studiati non solo per ottenere maggiori resistenze meccaniche, ma soprattutto per garantire la durabilità e per godere di altre caratteristiche di comportamento, fondamentali per la buona riuscita della costruzione e sempre viste con grande favore sia dagli strutturisti che dagli esecutori dei lavori.

Tali calcestruzzi si suddividono in due fasce, invero determinate attraverso la resistenza caratteristica, ma con la prima fascia, gli HPC (High-Performance Concrete), si mira ad un aumento delle prestazioni, e con la seconda, gli HSC (High-Strength Concrete), si mira essenzialmente alla resistenza. Precisamente, citando anche i calcestruzzi comuni NSC (Normal-Strength Concrete), nel nostro Paese per i calcestruzzi strutturali ( $R_{ck}$ =resistenza caratteristica a compressione a 28 gg. su cubi) si ha quanto segue ([4]):

$$\begin{aligned} \text{NSC, } 25 \text{ MPa} < R_{ck} \leq 55 \text{ MPa} \\ \text{HPC, } 55 \text{ MPa} < R_{ck} \leq 75 \text{ MPa} \\ \text{HSC, } 75 \text{ MPa} < R_{ck} \leq 115 \text{ MPa.} \end{aligned} \tag{9}$$

Per tali calcestruzzi, nel caso degli HPC è consentita la realizzazione di qualsiasi opera, privata o pubblica che sia, con il semplice deposito del progetto presso il Consiglio Superiore del LL. PP. a Roma, avendosi la possibilità di impiegare la Normativa del c.a. e del c.a.p. normale ([12]) per la progettazione, l'esecuzione e il controllo della costruzione. Invece, per i calcestruzzi HSC è richiesto, oltre al deposito del progetto, la comprovazione delle ipotesi e delle regole assunte a base dello stesso, mediante adeguate sperimentazioni e prove.

A fianco di questi nuovi calcestruzzi, si hanno altri calcestruzzi che possono soddisfare ad altri requisiti assai utili, se non addirittura indispensabili, in determinati casi. Fra questi, citiamo i calcestruzzi HPFRC e HSFRC, (FR=Fiber Reinforced), che sono gli HPC e HSC rinforzati con fibre metalliche, ed i calcestruzzi cosiddetti autocompattanti SCC (Self-Compacting Concrete).

L'aggiunta di fibre metalliche (2% del peso del calcestruzzo, ad esempio [16]), migliora anche sensibilmente le proprietà meccaniche, eliminando la fragilità e conferendo anche un'ottima tenacità al calcestruzzo indurito, senza ledere l'intrinseca durabilità, meglio se si impiegano fibre in acciaio inossidabile, mentre gli SCC hanno innanzitutto il pregio di garantire il riempimento a pratico rifiuto delle forme.

Vale la pena di vedere più compiutamente i diversi comportamenti, sia per mostrare quali fra gli obiettivi dell'elenco di cui al paragrafo 2 possano essere soddisfatti mediante l'impiego di questi calcestruzzi, sia per mettere in luce come nel contempo si possano sistemare alcuni aspetti assai importanti nelle validazioni strutturali ed utili per l'esecuzione dei lavori e per la qualità della costruzione.

Per quanto riguarda l'aspetto "meccanico", considerando un HPFRC o un HSFRC, (cioè, un calcestruzzo ad alte prestazioni o ad alta resistenza, con l'aggiunta di fibre metalliche, meglio se in acciaio inossidabile), si può affermare che risultano meritoriamente sistemati gli obiettivi 1, resistenza; 2, rigidità; 3, duttilità e tenacità; 4, durabilità e in parte 12, sicurezza di servizio.

Infatti, tali calcestruzzi presentano:

- maggiori valori di  $R_{ck}$ , ( $f_{ck}$ ), a parità di densità del materiale, il che si traduce in una maggiore potenzialità strutturale, lato resistenza, giacchè cresce la tradizionale lunghezza di resistenza specifica ([5]) espressa dalla:

$$L=f_c/\delta g, \quad (10)$$

essendo appunto  $\delta$  la densità del materiale e  $g$  l'accelerazione di gravità,

- minori valori della relativa dispersione, misurata dalla deviazione standard  $\sigma_{fc}$ , talché i coefficienti di variazione  $c_{fc} = \sigma_{fc} / \eta_{fc}$ , essendo  $\eta_{fc}$  il valore medio, si riducono anche al di sotto dello 0,10, circostanza particolarmente apprezzabile, come si vedrà, nelle misure probabilistiche della sicurezza,
- maggiori valori del modulo  $E_c$ , e anche del coefficiente di Poisson  $\nu_c$  (d'interesse per le strutture di superficie, il cui modulo si esprime come  $E^* = E / (1 - \nu_c^2)$ ), il che si traduce in una maggiore potenzialità strutturale, lato rigidità, giacché cresce la tradizionale lunghezza di rigidità specifica ([5]) espressa dalla:

$$D = E_c / \delta g, \quad (11)$$

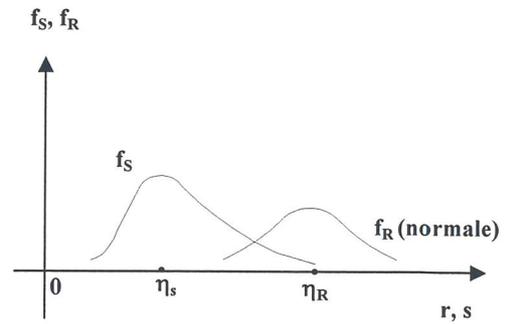
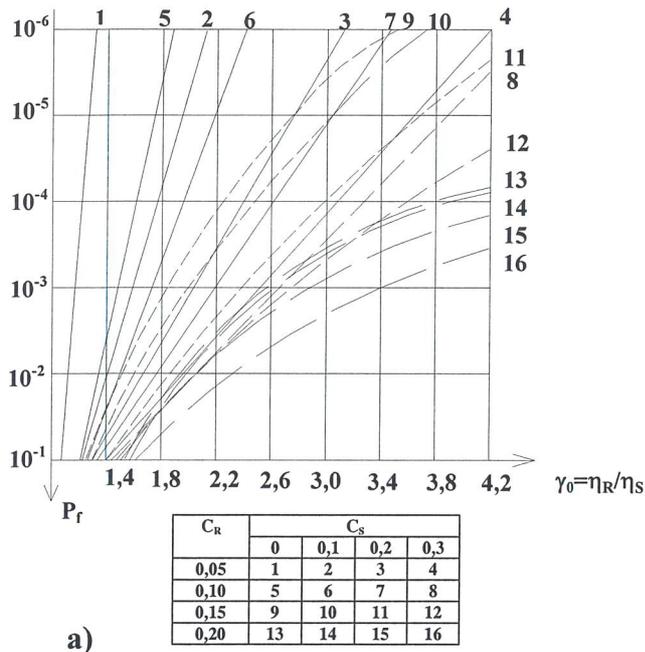
- pratica equivalenza della duttilità specifica rispetto ad un NSC e, per la tenacità, potendosi avere valori inaspettati per l'energia di frattura  $G_f$  anche parecchie volte maggiori di quella di un NSC,
- più contenuti effetti differiti di viscosità e ritiro rispetto ad un NSC, con minori dispersioni dei relativi parametri e leggi temporali meno incerte, il che si traduce in una maggiore attendibilità dei risultati nel prevedere le conseguenze di tali effetti differiti (ad esempio, per l'attribuzione più sicura delle pre-monte di costruzione degli elementi prefabbricati),
- pratica insensibilità alla carbonatazione, con la conseguente garanzia di protezione delle armature nel tempo, e pratica insensibilità ai cicli di gelo e disgelo, senza richiedere gli artifici di protezione usualmente consigliati (quali gli aeranti nell'impasto, cui consegue però l'onere d'impiegare maggiori quantitativi di cemento per compensare il calo di resistenza).

Anche se la semplice considerazione deterministica di tali miglioramenti fa apprezzare questi nuovi calcestruzzi, tuttavia sembra opportuno richiamare le loro conseguenze in termini probabilistici.

Nella figura 8a, tratta da [17], e completata in 8 b con lo schema di misura probabilistica delle due grandezze aleatorie indipendenti  $S$ =sollecitazione ed  $R$ =resistenza (con i medi  $\eta_S$  ed  $\eta_R$ ), sono rappresentate le funzioni:

$$P_f(\text{probabilità d'insuccesso, crisi o rovina}) = P_f(\gamma_0; c_R, c_S), \quad (12)$$

essendo  $\gamma_0 = \eta_R / \eta_S$  il fattore di sicurezza letto sui valori medi (sarebbe pressappoco il fattore di sicurezza usuale dei calcoli deterministici) e  $c_R = \sigma_R / \eta_R$ ,  $c_S = \sigma_S / \eta_S$  i coefficienti di variazione di  $R$  ed  $S$ , rapporti fra le relative deviazioni standard  $\sigma_R$ ,  $\sigma_S$  e i medi  $\eta_R$  ed  $\eta_S$ .



$$P_f = \int F_R(x) \cdot f_S(x) dx$$

a)

b)

Fig. 8 -  $P_f = P_f(\gamma_0)$ , per coppie di valori  $(c_R, c_S)$  e funzioni densità  $f_S$  e  $f_R$

In figura 8a, per esaltare i risultati, i quali però nel loro significato non cambiano affatto, si è considerato l'accoppiamento fra una "statistica" normale per la resistenza R ed una "statistica" estrema 1° tipo valori massimi per la sollecitazione S. L'aspetto costante dei risultati è soprattutto il seguente:

- per bassi valori della dispersione della resistenza, ad esempio misurati da  $c_R$ , (di valore 0,05, curve 1÷4 o anche di valore 0,10, curve 5÷8), bastano modesti incrementi del fattore  $\gamma_0$  (che vuol dire, un modesto aumento del medio della resistenza, con modesto aumento del costo, e/o una modesta riduzione del carico d'uso, ossia del medio della sollecitazione) per riuscire ad abbattere la probabilità d'insuccesso entro valori ( $10^{-5}$ , o anche meno) come si desidera, mentre ciò non è assolutamente possibile se le resistenze sono molto disperse, ad esempio le curve 13÷16, (ossia, come si dice volgarmente se si lavora alla "carlona", poi magari spendendo di più per tener alto il valore medio della resistenza allo scopo di mitigare i danni),
- naturalmente, quando  $c_R$  è piccolo, le curve (ad esempio 1÷4) sono molto "sfrangiate" al variare della dispersione della sollecitazione, anchessa misurata dal suo coefficiente  $c_S$ , cioè solo allora ha significato interessarsi della variabilità del carico, giacché, se le resistenze sono molto disperse ( $c_R=0,20$  o più,

cioè a partire dalle curve 13÷16, molto ristrette fra loro) certamente l'esito non può essere influenzato dalla variabilità del carico, che conta in verità assai poco.

Ai nostri fini, interessa quindi prendere atto del grande vantaggio che probabilisticamente si ottiene ai fini della sicurezza allorché si hanno valori di  $c_R$  sull'ordine dello 0,10 o meglio minori: perché basta allora una modesta correzione in più, ad esempio, delle sezioni resistenti (medio di  $\eta_R$ , valore di  $\gamma_0$ ), per portare la probabilità d'insuccesso  $P$  su ordini di grandezza anche 100 o più volte minori. Questo è il vero successo "meccanico" dei nuovi calcestruzzi in termini probabilistici.

La stessa dimostrazione è data in maniera significativa "traslando" la rappresentazione della misura di sicurezza, ( $D'_2$ ≡regione d'insicurezza):

$$P_f = \int_{D'_2} f_{RS}(r,s) dr ds \leq P^* \quad (\text{probabilità prefissata dai Codici per lo S.L. considerato}), (13)$$

dal piano  $r,s$  delle v.a.  $R,S$  al piano ridotto adimensionalizzato  $\rho = \frac{r - \eta_R}{\sigma_R}$ ,  $\sigma = \frac{s - \eta_S}{\sigma_S}$ , delle stesse v.a.  $R,S$ , come è rappresentato qualitativamente nella figura 9, a) e b).

Nella parte di destra della figura, con riferimento proprio ai seguenti parametri delle due grandezze  $R$  ed  $S$ , ossia:

$$\text{caso a) } \left| \begin{array}{ll} \eta_R=4, & \sigma_R=0,8 \text{ e quindi } c_R=0,2 \\ \eta_S=2, & \sigma_S=0,2 \text{ e quindi } c_S=0,1, \\ \gamma_0 = \frac{\eta_R}{\eta_S} = 2, \end{array} \right.$$

$$\text{caso b) } \left| \begin{array}{ll} \eta_R=6, & \sigma_R=0,6 \text{ e quindi } c_R=0,1 \\ \eta_S=2, & \sigma_S=0,2 \text{ e quindi } c_S=0,1, \\ \gamma_0 = \frac{\eta_R}{\eta_S} = 3, \end{array} \right.$$

passando dal caso a) al caso b) si vede bene come la retta limite si porti nell'interno della regione  $D'_2$  d'insicurezza, aumentando la distanza di sicurezza  $\beta$  e, quindi, riducendo la probabilità  $P_f$  d'insuccesso (ad esempio, [18]), a parte la più favorevole collocazione della statistica  $f_{RS}(\rho,s)$ , dati i valori più favorevoli di  $\eta_R$ ,  $\sigma_R$  del caso b) rispetto al caso a).

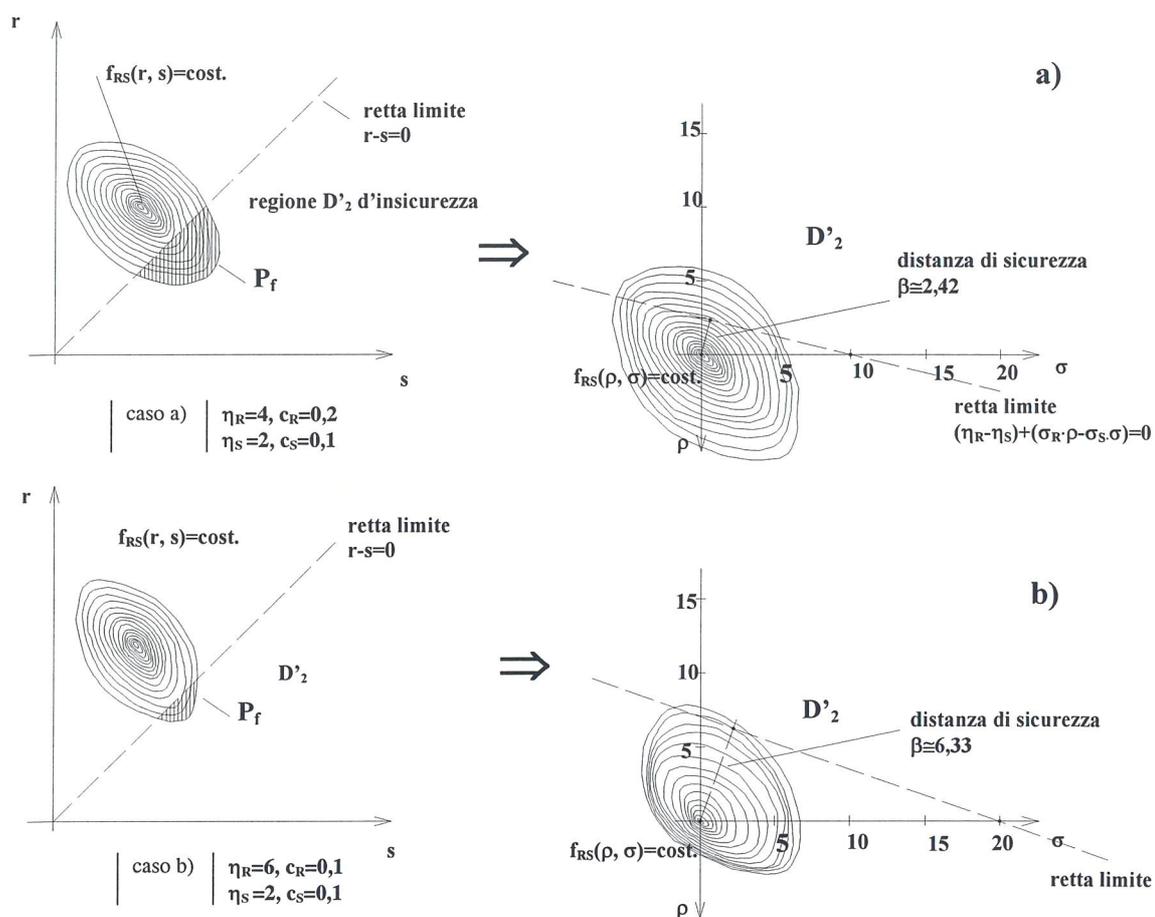


Fig. 9 – Rappresentazione della regione di insicurezza  $D'_2$  nei piani  $r, s$  e  $\rho, \sigma$ .

Questo successo meccanico dei nuovi calcestruzzi, affinché sia possibile e garantito, ha come presupposto che la composizione del calcestruzzo segua regole precise (ad esempio, [19]).

Molto sinteticamente si può dire che questi straordinari calcestruzzi sono stati resi possibili dall'accoppiamento fumo di silice-superfluidificanti: il fumo di silice, sottoprodotto dell'industria del silicio e delle leghe metalliche col silicio, si presenta in forme di sferette con dimensioni fra 0,01 e 1  $\mu\text{m}$  (ossia 50÷100 volte più piccole di quelle del cemento), cosicché esse hanno modo di sistemarsi nei vuoti interstiziali fra i granuli di cemento, col risultato di ottenere un sistema meno poroso, meccanicamente più resistente e praticamente impenetrabile dagli agenti aggressivi; i superfluidificanti, a base di polimeri idrosolubili, hanno come virtù primaria l'effetto "deflocculante", in virtù del quale i granuli di cemento e soprattutto quelli di fumo di silice sono mantenuti dispersi, tamponando, per così dire, la maggiore richiesta

d'acqua conseguente all'elevata area superficiale di tali sferette di fumo di silice. Cioè, come è ben noto, con tali superfluidificanti si può ottenere, a pari lavorabilità e rapporto acqua/cemento, la riduzione proporzionale dei due quantitativi di acqua e di cemento. Naturalmente, secondo questo indirizzo, inevitabilmente accade che l'anello debole della catena in tali calcestruzzi viene ad essere rappresentato dagli aggregati, o per meglio dire dalla cosiddetta zona di transizione, costituita da poche decine di  $\mu\text{m}$  situata all'interfaccia tra aggregato e matrice cementizia. Si dice appunto in [19]:

*“Se si vuole sfruttare al massimo nel materiale composito (calcestruzzo) il beneficio derivante da una matrice (pasta cementizia) più densa e compatta, è necessario disporre di aggregati particolari (basalto, granito, diabase, ecc.), altrettanto densi e compatti, e capaci soprattutto di stabilire un miglior legame adesivo nella zona di transizione con la matrice cementizia”.*

La “ricetta” di composizione anche solo di un HPC, e ancor peggio se si sale nella resistenza (HSC), è quanto mai delicata da formulare, in relazione anche agli altri obiettivi che si vogliono raggiungere. Generalmente, essa va demandata agli specialisti, tecnologi del calcestruzzo, che ormai anche in Italia sono numerosi e ben preparati.

Giacché, proprio con tale formulazione si può ottenere per il calcestruzzo la possibilità di migliorare anche altre proprietà, alcune indispensabili in relazione al servizio richiesto. Tra queste si ha primariamente la resistenza al fuoco (obiettivo 5).

Infatti, per un calcestruzzo HPC, ( $55 \text{ MPa} < R_{ck} \leq 75 \text{ MPa}$ ), che presenta, come sopra si è detto, una microstruttura compatta per la riduzione della porosità capillare della matrice cementizia e per l'addensamento nella zona di transizione, già a circa  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  la pressione del vapore acqueo (proveniente dall'evaporazione dell'acqua libera e dalla decomposizione di quella combinata) è talmente elevata (effetto “pentola a pressione”) da provocare l'esplosione localizzata del calcestruzzo (“spalling”) in scaglie aventi uno spessore di qualche cm ed una larghezza di  $10\div 20 \text{ cm}$ . Salendo con la resistenza (verso i  $100 \text{ MPa}$  ed oltre, quali possono essere gli HSC, aventi un “range” di resistenza  $75 \text{ MPa} < R_{ck} \leq 115 \text{ MPa}$ ), le cose peggiorano perché la permeabilità al vapore diminuisce ulteriormente, cosicché già a  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  può avvenire lo “spalling”.

La figura 10 mostra gli andamenti qualitativi delle resistenze  $R_c$  di provini di calcestruzzo con aggregati calcarei riscaldati progressivamente in forno fino a  $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , secondo le sperimentazioni citate nel volume [19] (si veda anche [20]). Come si può vedere dal confronto

con un NSC, questi nuovi calcestruzzi (HPC e ancor più gli HSC) non rappresentano affatto un materiale resistente al fuoco.

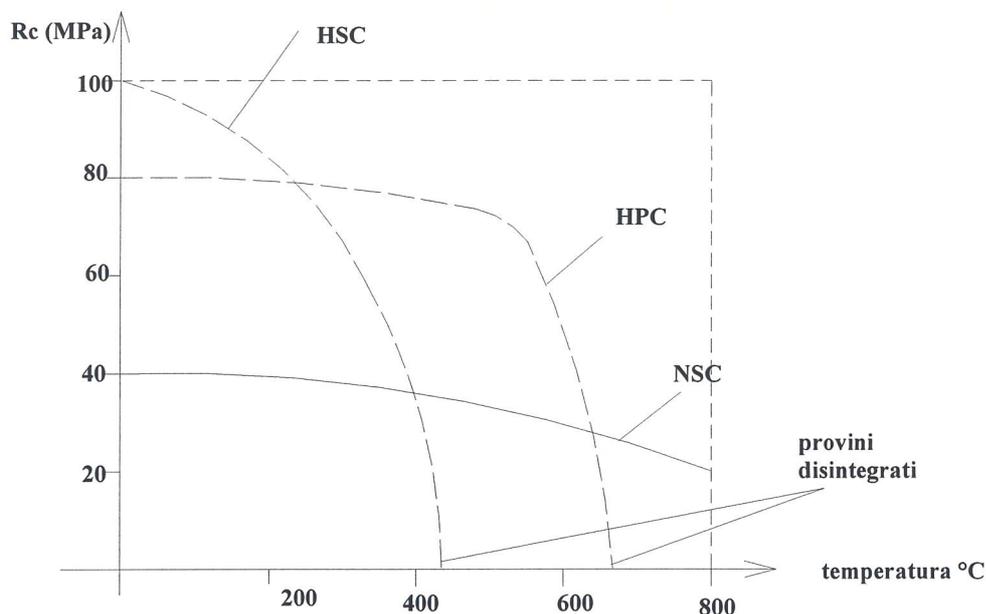


Fig. 10 – Andamento della resistenza a compressione con la temperatura

Ma, sempre in tale volume [19], si mostra il benefico effetto delle fibre metalliche, le quali in realtà contrastano lo spalling (poiché in sostanza, aumentano sensibilmente la resistenza a trazione del calcestruzzo).

Per gli stessi calcestruzzi di cui alla figura 10, gli andamenti delle resistenze  $R_c$ , sempre secondo le sperimentazioni citate in [19], diventano qualitativamente quelli di figura 11, con un netto miglioramento di comportamento, poiché per gli HPFRC il decadimento sensibile avviene intorno ai 600 °C e non conduce alla disintegrazione dei provini, mentre per gli HSFRC, pur avendosi la disintegrazione, il decadimento sensibile avviene solo intorno ai 500 °C.

Comunque, per ottenere un vero materiale resistente al fuoco, occorre impiegare fibre polimeriche, con le quali i decadimenti sono rimandati anche ben oltre i 600 °C e la resistenza residua ad 800 °C è ancora pari al 50 % di quella iniziale, per gli HPFRC, e pari al 40%, per gli HSFRC.

Naturalmente, non si deve rinunciare alla favorevole presenza delle fibre metalliche (ai fini della resistenza, della duttilità e tenacità) e quindi queste vanno associate alle polimeriche (0,25 del volume del calcestruzzo) per elevare la resistenza al fuoco (come è noto, le fibre polimeriche fondono a circa 160÷170°C attenuando lo spacco del calcestruzzo per sviluppo di

eccessive pressioni nei pori). Questo materiale è veramente raccomandabile per resistere al fuoco (obiettivo 5).

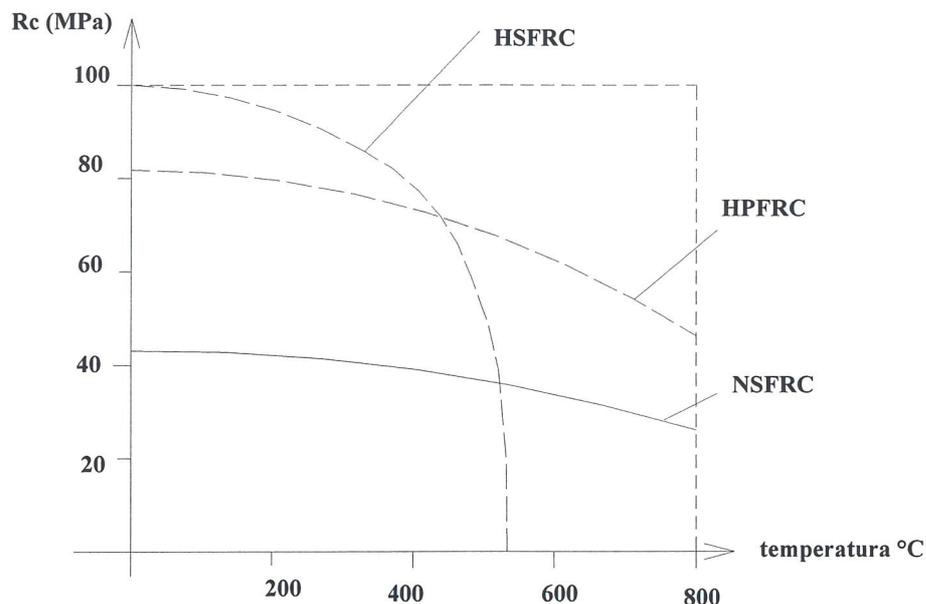


Fig. 11 - Andamento della resistenza a compressione con la temperatura

Come risulta in modo ovvio dalle premesse di questa nota, paragr.1, la fase d'impianto comprende, a parte gli studi e le verifiche preliminari, sia la progettazione che l'esecuzione, nonché i controlli di accettazione, solo con questi potendosi poi aprire la costruzione al servizio.

Fondamentale è quindi facilitare l'esecuzione e i controlli, peraltro garantendo che, a sostegno di quanto ci si è sforzati di fare in sede di progettazione, non si abbiano a verificare in tali fasi eventi pregiudizievoli alla buona riuscita della costruzione. Pertanto, come risultato dell'esecuzione, è necessario garantire innanzitutto che le resistenze dei calcestruzzi degli elementi strutturali corrispondano a quelle di progetto, come sono attestate dalle prove eseguite sui cubetti. Orbene, mentre secondo le disposizioni della Normativa [12] i cubetti sono costipati a rifiuto, difficilmente in opera si riesce ad ottenere tale compattazione completa. Il grado di compattazione  $g_c$  può essere espresso assai semplicemente quale rapporto fra il peso specifico ( $\delta_a g$ ) del calcestruzzo in opera (pedice a  $\equiv$  attuale) e il peso specifico ( $\delta_p g$ ) dei provini (pedice p  $\equiv$  provino), essendo  $\delta$  le relative densità e  $g$  l'accelerazione di gravità, ( $\delta g \equiv$  peso specifico), ossia (vedi il già citato [19]):

$$g_c = \delta_a g / \delta_p g = \delta_a / \delta_p \quad (14)$$

Per le usuali compattazioni dei calcestruzzi NSC ( $g_c$  sull'ordine medio dello 0,9÷0,95), in [19] si propone la seguente correlazione lineare:

$$\Delta R_c = [(R_{cp} - R_{ca}) / R_{cp}] = (1 - g_c) \cdot 5, \quad (15)$$

la quale significa che, per ogni punto centesimale di  $g_c$  in meno rispetto alla compattazione completa, di valore 1, si manifesta un 5% in meno per la resistenza attuale. Ad esempio, con una compattazione piuttosto scadente avente un grado  $g_c=0,93$ , sarebbe  $\Delta R_c=(1-0.93) \cdot 5=0,07 \cdot 5=0,35=35\%$ ,  $R_{ca}=R_{cp} \cdot (1-\Delta R_c)=65\% R_{cp}$ , cioè avendosi 7 punti centesimali in meno si perde per strada il  $7 \cdot 5 \% = 35 \%$  della resistenza.

I calcestruzzi SCC hanno innanzitutto dalla loro la possibilità di realizzare il pieno riempimento delle forme, praticamente con una compattazione completa ( $g_c=1$ ). Ma non è solo questo l'aspetto positivo degli SCC, giacché con tali calcestruzzi, la cui ricetta è sempre da mettere a punto con i tecnologi del calcestruzzo, anche in relazione all'organizzazione del cantiere, si ha:

- una migliore produttività del cantiere, con la riduzione quindi dei tempi esecutivi (obbiettivo 9) e dei costi relativi (obbiettivo 8),
- un miglioramento delle conduzioni di lavoro per le maestranze, poiché non si ha più la necessità di vibrare i getti (aspetto assai positivo per la salute degli operai),
- la possibilità di realizzare opere con superfici compatte e colorate (quasi fossero marmo), ricorrendo ai nuovi HPC ed HSC, anche con fibre, meglio se in acciaio inossidabile,
- una riduzione dell'impatto di cantiere, proprio per l'assenza di vibrazione e di rumore (aspetto assai interessante nei cantieri urbani),
- un sensibile sostegno offerto per la produzione "in Qualità" nel cantiere, spesso ostile all'applicazione di procedure aventi un marchio industriale.

Quest'ultimo aspetto, va fatto notare, costituisce un privilegio comune a tutti questi nuovi calcestruzzi, giacché, come si è visto, la messa a punto della loro ricetta, la loro confezione, la messa in opera, la costipazione, la cura del getto ed i controlli di accettazione non sono alle mercé di tutti gli operatori del settore e, una volta sistemati, costituiscono le fasi di un processo industriale da governare e garantire con le procedure proprie del produrre in Qualità.

Infatti, soltanto la razionale e controllata organizzazione della progettazione e dell'esecuzione, pur con tutti i difficili risvolti che si hanno in un cantiere edile, possono consentire di ottenere con successo strutture costituite da tali straordinari materiali, i quali hanno modo, come si è visto, di soddisfare a moltissimi degli obiettivi che ci si propone di raggiun-

gere. Così facendo, è chiaro che si è costretti ad operare secondo le procedure proprie della Qualità, nell'ottica moderna di qualsiasi attività imprenditoriale, non solo esclusiva del campo industriale.

#### APPENDICE 1 - BIBLIOGRAFIA

- [1] A. MIGLIACCI - *LE INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO - Moderne strategie d'impianto* – Seminario: L'allargamento a sud/est: l'integrazione possibile, Francavilla di Sicilia e Taormina, marzo 2002.
- [2] Ministero LL.PP. - *Legge quadro in materia di lavori pubblici*, Legge 11 febbraio 1994, n° 109 e Regolamento di attuazione, G.U. n. 98 del 29 aprile 2000.
- [3] Ministero LL.PP. - Legge n. 443 del 21/12/2001 – *Delega al Governo in materia di infrastrutture e insediamenti produttivi, strategici ed altri interventi per il rilancio delle attività produttive* e relativo DPCM agosto 2002.
- [4] Ministero LL.PP. - *Raccomandazioni tecniche sui calcestruzzi cementizi ad alta resistenza*, Giornale A.I.C.A.P., n.11 Novembre 1996, allegato a “L'industria italiana del cemento”.
- [5] A. MIGLIACCI - *L'Architettura dell'equilibrio e della deformazione* - Masson S.p.A. Milano, 1997.
- [6] J. KOSKI- *Multicriterion Structural Optimization*, edited by Adeli, Chapman and Hall, London 1994.
- [7] V. PARETO – *Course d'Economique Politique*, volume 1 e 2. Rouge. Lausanne 1896-1897.
- [8] G. J. KLIR and BO YUAN – *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic - Theory and Applications*, Prentice Hall 1995.
- [9] M. SAKAWA - *Fuzzy Sets in Interactive Multiobjective Optimization*, Plenum Press, New York 1993.
- [10] K. J. ZIMMERMAN, P. ZYSNO - *Latent Connectives in Human Decision Making-Fuzzy Sets and Systems*, n. 4, 37-51, 1980.

- [11] P. PEDEFERRI, L. BERTOLINI - *La durabilità del calcestruzzo armato*, McGraw Hill, Milano, 2002.
- [12] D.M. 09/01/1996: *Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche*. (Gazzetta Ufficiale del 05/02/1996 n°29).
- [13] ENV 206 - 1989 - Norma Europea provvisoria - Calcestruzzo, prestazioni, produzione, getto e criteri di conformità (versione italiana).
- [14] - Unione Europea, Progetto Brite EuRam III – *DuraCrete – Probabilistic Performance based on Durability. Design of Concrete Structures*, Doc. BE95-1347/R17, maggio 2000.
- [15] The Concrete Society, *Guidance on the Use of Stainless Steel Reinforcement*, Technical Report N. 51, 1998.
- [16] G.L. GUERRINI, L. BIOLZI, G. ROSATI – *Production and Mechanical Characterization of Very High-Performance Fiber-Reinforced Concrete Beams*, Proc. Int. Conference “Creating with Concrete”, 8-10 September 1999, Dundee, 311-322 pp.
- [17] J. FERRY BORGES, M. CASTANHETA - *Structural Safety – 2a Ed.*, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil - Lisbon, 1971.
- [18] A. MIGLIACCI – *La sicurezza strutturale*, cap. XI – *Manuale di Ingegneria Civile – nuova edizione*, Zanichelli Bologna, 2001.
- [19] M. COLLEPARDI – *Il nuovo Calcestruzzo, 2a Edizione* – Editore Tintoretto, 2000.
- [20] P.G. GAMBAROVA – *HPC: A Review of the Results Obtained in Milan within the National Project 1997-1999, the safety of HPC Structures*”, Studies and Researches, V. 22, Politecnico di Milano, Milan (Italy), pp. 121-140.