

COMBINAZIONI DI VERIFICA AGLI STATI LIMITE: IL NON DETTO DELLE NORMATIVE

Paolo Rugarli¹

Ingegneria Sismica, n° 2 2004

Sommario

Questo articolo si riferisce alla determinazione delle combinazioni di verifica da adottare in accordo al metodo semi-probabilistico agli stati limite. Il lavoro intende porre in evidenza che le combinazioni suggerite dalle norme italiane per gli stati limite ultimi, diverse da quelle previste dall'EC1, non sono a favore di sicurezza. Inoltre, le formule relative alle combinazioni di verifica per gli stati limite ultimi in presenza di carichi accidentali (sisma), presenti nelle norme italiane ed in quelle europee, non sono a favore di sicurezza. Verrà inoltre messo in luce che le formule previste dalle norme italiane e da quelle europee per le combinazioni relative agli stati limite di servizio, in generale, non sono a favore di sicurezza. Scopo del lavoro, inoltre, è quello di descrivere in modo comprensibile le numerose difficoltà riscontrate affrontando il problema in modo realmente conforme, e, per confronto, le considerevoli sottovalutazioni del problema oggi diffuse, e mostrare come, a voler essere realmente coerenti, le prescrizioni delle norme attualmente in vigore in Europa portino a una sostanziale abdicazione verso il calcolatore elettronico del lavoro di controllo e verifica del progetto, con tutte le conseguenze del caso, in gran parte inesplorate.

Summary

This paper deals with the rules used to set up limit states load combinations according to european and italian standards. The work shows that the combination rules for limit states suggested in italian norms, different from those in Eurocode 1, may be unsafe. Also, the combination rules used for ultimate limit states concerning accidental actions, as described in Eurocodes and italian norms, may be unsafe. The same holds for damage limit states load combinations, in both european and italian standards.

Moreover, it will be shown that these rules, when consistently applied, lead to hundreds or thousands of load combinations in quite frequent structural problems. This, in turn, leads to still

¹ Ingegnere Strutturista – Software Developer - Castalia srl - staff@castaliaweb.com

unexplored problems of large-data management and large-data checks, and tends to shift the leading design action from the designer to computers.

Parole Chiave

Combinazioni, Stati limite, Eurocodici

Keywords

Combination rules, Limit States, Eurocodes

1 Introduzione, notazione

Chiamiamo “caso di carico” una riunione di azioni aventi tutte una medesima causa fisica e che debbano considerarsi agenti contemporaneamente. Nella analisi di modelli di calcolo strutturale è uso definire un certo numero di casi di carico base che vengono poi combinati tra loro per generare delle situazioni significative ai fini delle verifiche. La combinazione dei casi di carico base viene introdotta per tenere in conto il verificarsi contemporaneamente di azioni che siano statisticamente indipendenti. Distinguiamo pertanto in modo ben marcato tra “casi” e “combinazioni”.

L’aver raggruppato le azioni dovute ad una causa comune in un unico caso di carico, comporta il fatto che un eventuale fattore amplificativo o riduttivo dei valori caratteristici, introdotto per tener conto delle aleatorietà, si applichi a tutte le azioni presenti in un caso, e quindi implica che le azioni di un caso vengano tutte amplificate o tutte ridotte allo stesso modo.

Sia dato un generico problema strutturale nel quale compaiano n casi di carico differenti. Ciascuno dei casi di carico abbia una sua etichetta che ne distingua la tipologia secondo almeno tre grandi famiglie: casi relativi ad azioni permanenti (sia n_g il numero di questi casi), a carichi variabili (n_q), a carichi accidentali (n_a). Sia dunque

$$n = n_g + n_q + n_a$$

Per “accidentale” noi qui intendiamo, in ossequio a EC1, quelle azioni che in italiano troviamo anche tradotte con “eccezionali”: urti, esplosioni, sismi, ecc.. Accidentale *non* è quindi il carico variabile “normale”, ma un carico di natura eccezionale ed intrinsecamente assai raro.

Ad ogni caso di carico non permanente sia associata una terna di moltiplicatori ψ atti a ottenere i valori rari (ψ_0), frequenti (ψ_1) e quasi permanenti (ψ_2) delle azioni raggruppate in un certo caso di carico.

Le regole di generazione delle combinazioni suggerite dalle normative italiane ([2], [3], [4]) assomigliano a quelle previste dagli Eurocodici, ed in particolare a quelle previste da Eurocodice 1 parte 1.1 ([1]), con alcune importanti differenze che varrà qui la pena di rilevare. Nelle nostre norme troviamo le seguenti regole di combinazione valide per lo stato limite ultimo, escludendo per ora le azioni accidentali ed eliminando, per semplicità di trattazione, i carichi dovuti alla precompressione ([2]):

$$\gamma_g G_k + \gamma_q Q_{1k} + \sum_{i=2}^{nq} \gamma_q (\psi_{0i} Q_{ik}) \quad (1)$$

dove il pedice “k” sta per caratteristico, il pedice “g” per permanente ed il pedice “q” per variabile.

In pratica combinazioni di questo tipo devono essere generate prendendo a turno uno dei casi di carico variabili come base della combinazione e sommando poi tutti gli altri ridotti al valore “raro” mediante il pertinente coefficiente ψ_{0i} .

Nel caso in cui siano presenti anche carichi di tipo accidentale, alle combinazioni di tipo (1) occorre aggiungere combinazioni di tipo

$$G_k + \gamma_{Ia} E_a + \sum_{i=1}^{nq} (\psi_{2i} Q_{ik}) \quad (2)$$

dove l’indice “a” sta per accidentale e occorre tenere in conto, a turno, tutti i possibili carichi di tipo accidentale.

2 Osservazioni sulle formule di normativa

2.1 Carichi permanenti

Una prima osservazione riguarda la parte permanente del carico; osserviamo che la norma italiana assume:

$$\gamma_g G_k$$

e non

$$\sum \gamma_{gi} G_{ki}$$

come invece scritto nell'EC1. La norma italiana fa come se vi fosse un'unica condizione di carico di tipo permanente.

In realtà questo non è vero: normalmente i carichi “permanenti” sono composti da una serie di contributi che tra loro sono statisticamente indipendenti, e che dovranno pertanto essere messi in casi di carico differenti. Pertanto dovremo ad esempio distinguere tra peso proprio strutturale e carichi permanenti portati, poiché questi possono variare indipendentemente, e magari uno può essere massimo mentre l'altro è minimo, o viceversa.

E' da tenere ben presente che tali casi di carico non hanno la medesima distribuzione spaziale, in generale non si ottengono l'uno dall'altro mediante una semplice amplificazione o riduzione: sono a tutti gli effetti carichi diversamente distribuiti e diversamente collocati sulla struttura. Si noti che l'EC1 impone di considerare sia il valore superiore ($\gamma_g = 1.4$) sia il valore inferiore² ($\gamma_g = 1$) di ciascun caso di carico permanente, proprio al fine di individuare le situazioni più pericolose.

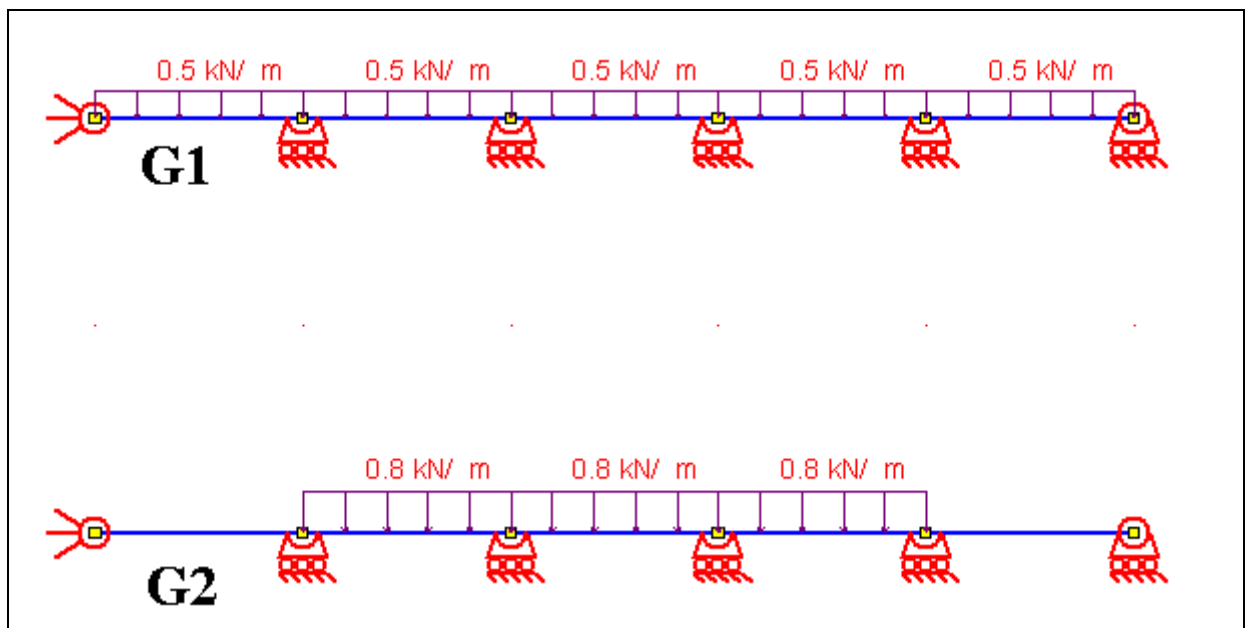


Fig. 1: Valori caratteristici dei carichi permanenti collocati in due casi di carico “base”: si immagina che i carichi in G1 o in G2 dipendano da un unico fattore (γ_{g1} o γ_{g2})

² Sul fatto che il coefficiente γ_g debba avere il valore minimo pari ad 1 chi scrive ha qualche dubbio. Infatti se è a favore di sicurezza prendere il valore minimo del carico statisticamente possibile, che senso ha usare il valore caratteristico del carico permanente ($\gamma_g = 1$), definito in modo da avere il 95% di *non* essere superato? Dovremmo usare il valore che ha il 95% di probabilità di *essere* superato, *il minimo*.

Prendiamo ad esempio una trave continua di 5 campate ed esaminiamo il peso proprio strutturale ($G_1=0.5\text{kN/m}$) applicato sulle cinque campate ed i permanenti portati ($G_2=0.8\text{kN/m}$), applicati alle sole tre campate centrali (fig. 1). Mettiamo nel caso 1 il peso proprio e nel caso 2 i permanenti. Dovremo considerare per lo meno le seguenti situazioni:

$$1,4G_1+1,4G_2$$

$$1,4G_1+1,0G_2$$

$$1,0G_1+1,4G_2$$

$$1,0G_1+1,0G_2$$

Se ammettiamo che tutte le azioni all'interno del medesimo caso di carico siano statisticamente collegate ad un unico fattore γ_{gi} , abbiamo tenuto in conto tutte le possibilità.

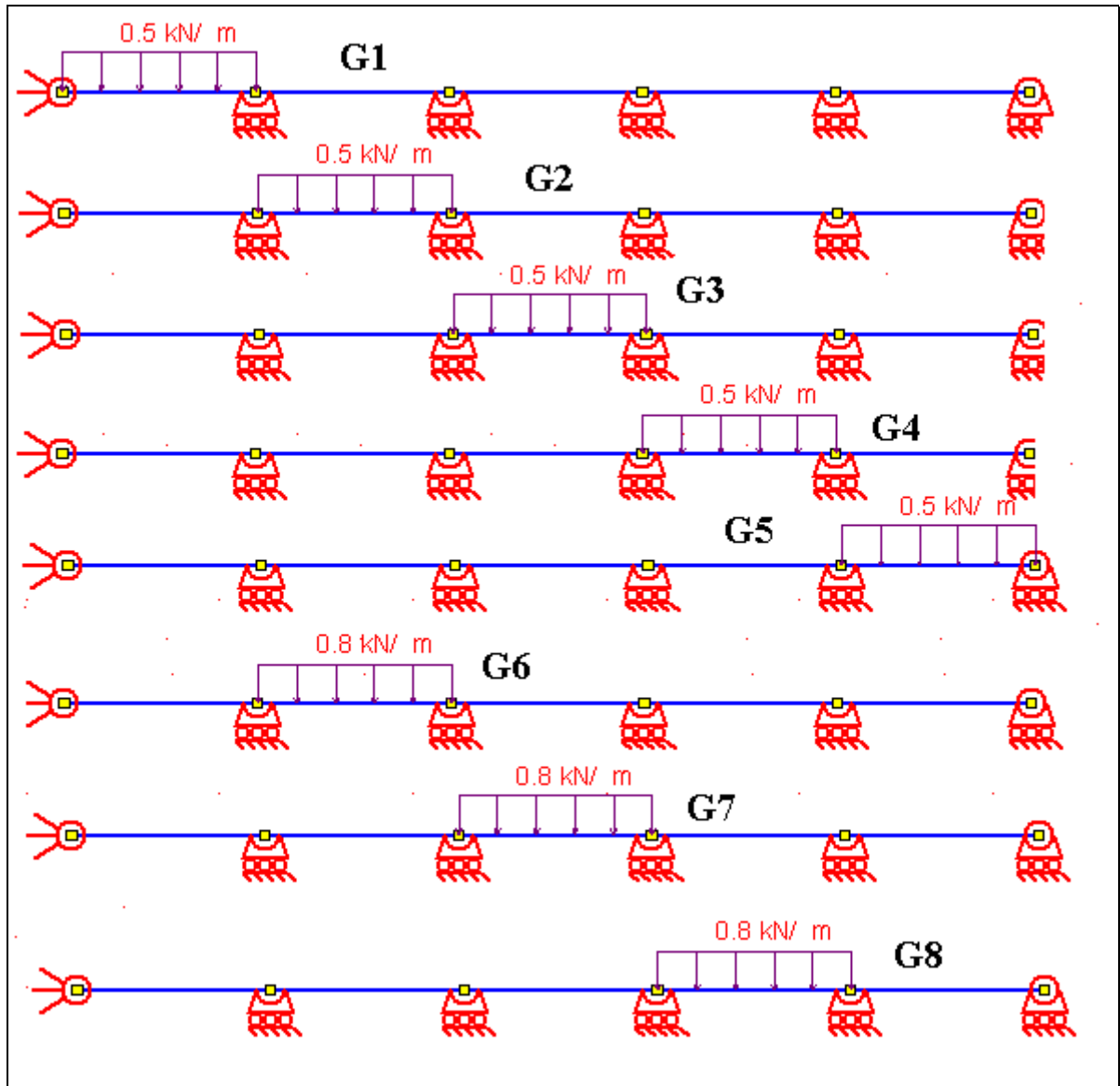


Fig. 2: Se si impone che il carico su ogni campata sia statisticamente indipendente dagli altri si hanno 8 casi di carico base, ciascuno dei quali ha un suo γ_{gi} .

Se invece ammettiamo che all'interno del caso di carico le singole azioni possano dipendere da un proprio γ_{gi} (e potremmo desiderare di far ciò per ottenere le scacchiere di carichi permanenti più sfavorevoli), allora non avremmo dovuto tenere in conto solo 2 condizioni di carico base, bensì 8: 5 condizioni di carico relative, ciascuna, ad una campata soggetta ai carichi permanenti dovuti al peso proprio, e 3 casi di carico relativi ai permanenti applicati ad una singola campata delle tre caricate (fig. 2).

In questo ultimo caso avremmo dovuto considerare tutte le possibili combinazioni di γ_g eguali a 1,4 oppure a 1,0, applicate a tutte e otto le condizioni di carico permanenti così trovate. Solo così facendo avremmo ritrovato, per tutte le campate, le situazioni più sfavorevoli. E' chiaro che un simile ragionamento è *in larga misura convenzionale*: infatti nessuno può dire quale sia la

scala alla quale fermarsi: carichi completi, carichi su una campata, carichi su metà campata, su un terzo, o chi sa cosa e come.

A rigore la circostanza che decide quante condizioni di carico assumere è questa: sono davvero statisticamente correlate ad un unico fattore le singole azioni presenti in caso di un dato carico base?

Se sì il caso di carico va bene, se no esso dovrà essere ulteriormente suddiviso in casi elementari.

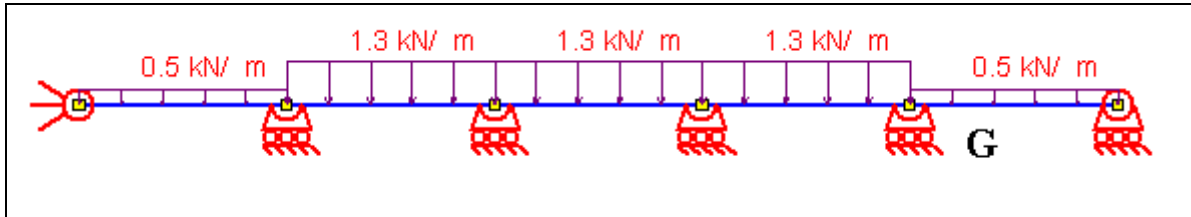


Fig. 3: la nostra norma assume che tutti i permanenti stiano in un unico caso di carico

E' ben chiaro (fig. 3), comunque, che attribuire a tutte le azioni permanenti presenti sulla struttura un unico valore di γ_g , come fa la nostra norma (a differenza dell'EC1) rappresenta il massimo della semplificazione possibile, e di fatto ciò diminuisce di molto il numero delle combinazioni da indagare (ed anche l'efficacia della richiesta di indagare il valore superiore ed il valore inferiore delle azioni permanenti).

2.2 Carichi variabili

Una analoga semplificazione si ha nella nostra norma per i carichi variabili: tutti i casi di carico variabili hanno in comune il fattore γ_q (che le nostre norme pongono eguale a 1,5 oppure eguale a 0, a seconda che il carico corrispondente diminuisca o aumenti la sicurezza), mentre in EC1 troviamo:

$$\sum_{i=1}^{ng} \gamma_{gi} G_{ki} + \gamma_{q1} Q_{1k} + \sum_{i=2}^{nq} \gamma_{qi} \psi_{0i} Q_{ik} \quad (1bis)$$

che è ben diversa dalla (1) della nostra normativa, in quanto il termine γ_q dipende da i e non è eguale per tutti i carichi variabili. La differenza non è affatto trascurabile e porta a rilevanti semplificazioni non giustificate: a ben vedere la (1) è errata in quanto esclude che solo alcuni dei carichi variabili si presentino contemporaneamente al carico variabile fondamentale, ed esclude che i carichi variabili siano statisticamente indipendenti. Ciò porta, anche in casi elementari, a

pericolose sottostime delle azioni interne, sottostime che nei casi elementari il buon senso ingegneristico, pur non imbrigliato in formule statistiche, porta senz'altro ad escludere.

Si darà più avanti un esempio esplicito a dimostrazione del fatto che tali formule (1) sono errate, affermazione della quale non sfugge a chi scrive né la gravità né le pesanti implicazioni.

Si deve infatti osservare che se le (1) sono errate perché a sfavore di sicurezza per qualche elemento strutturale, allora il loro uso diretto o la loro implementazione automatica in qualche software di calcolo, ed il loro successivo fiducioso impiego da parte dei progettisti, può portare a situazioni assai pericolose.

Si chiede pertanto che le norme vengano al più presto corrette, ponendo fine ad una imprecisione che dura da quasi un quarto di secolo. Va infatti incidentalmente detto che la formula (1) è presente nelle nostre norme da gran tempo: in [7], 1982, era scritto

“si adotteranno le combinazioni del tipo”

mentre nella più recente circolare del 1996 è scritto, in modo più mitigato ma pur sempre fuorviante

“si adotteranno le combinazioni espresse simbolicamente come segue [formula (1)] ed il coefficiente γ_q (pari a 1,5 oppure a 0) va applicato a ciascun carico Q_{ik} con il valore appropriato”

In pratica si tenta di dire che non è la (1) ma la (1bis) da considerare, ma lo si dice in modo involuto e poco comprensibile, stante il fatto che la formula (1) ha il γ_q a fattor comune. Inoltre si continua a dire che “si adotteranno” le combinazioni mentre, come vedremo, le combinazioni (1) *non sono* da adottare.

La formula (1) è infatti reperibile nel *Code Modele* del 1978 ([8]). E nel *Code Modele*, dopo la formula (1) veniva scritto:

“Questa equazione è simbolica e non è, in generale, direttamente applicabile”³.

Non a caso pochi paragrafi dopo *veniva invece proposta la (1bis), quella che ancora oggi è presente in ECI*. Del resto in quegli anni di calcolatori per uso personale non v'era l'ombra, e gli estensori del *Code Modele* trovavano modo di scrivere

“Molto spesso, nel calcolo, il numero di azioni individuali da considerare è evidente, e sarà raramente necessario tenere in conto più di due azioni variabili”⁴.

³ *“Cette équation est symbolique et n'est pas, en général, directement applicable”.*

affermazioni che *oggi* fanno sorridere chiunque abbia a che fare con modelli reali di strutture reali (tralasciamo gli esempietti usati per dimostrare una semplicità che non esiste).

Non è dato sapere perché relativamente alla stessa equazione (1) la frase “*questa equazione è simbolica e non è in generale direttamente applicabile*” qui in Italia sia diventata “*si adotteranno le combinazioni espresse simbolicamente come segue*”: sarebbe interessante capirlo. Che senso ha dire “si adotteranno le combinazioni” facendo riferimento ad una formula errata?

2.3 Carichi variabili nelle combinazioni relative ai carichi accidentali

Consideriamo ora le combinazioni relative ai carichi accidentali, le (2). E' da notare che il coefficiente ψ_{2i} in alcuni casi può valere 0: questo avviene quando si assume nullo il valore quasi permanente di una certa azione. Se questo accade il corrispondente carico variabile non è presente nel corso dell'azione accidentale. Per la normativa italiana questo è vero, ad esempio, per il vento. La presenza di un coefficiente ψ_{2i} nullo diminuisce il possibile numero di combinazioni (2) da aggiungere a quelle di tipo (1). Alla base di ciò v'è il fatto che è molto improbabile che l'evento accidentale massimo si verifichi in concomitanza con azioni variabili in sé rare.

E' da notare che il coefficiente γ_q è sparito: esso è implicitamente stato posto eguale a 1 per tutti i casi di carico variabili, *quindi di fatto è a fattor comune*⁵. Ciò porta a scartare la possibilità che una azione variabile con effetto favorevole per qualche elemento strutturale abbia la ventura *di non esserci* nel corso della azione eccezionale. Secondo la (2) ha da esserci per forza.

Si tratta di una assunzione non a favore di sicurezza, che compare anche nell'EC1, e che anche è stata confermata dalle recenti norme [4] (la ben nota “Ordinanza 3274” sulle costruzioni sismiche).

Se si pensa ad esempio agli effetti di ribaltamento, si vede che la completa assenza di carichi variabili che potrebbero essere stabilizzanti (*completa assenza non prevista dalla (2)*) può portare per qualche elemento strutturale a situazioni peggiori: era la combinazione di sisma+permanenti senza i variabili, che sempre i progettisti in gamba prevedevano, perché a favore di sicurezza. Bene, tale combinazione è di fatto esclusa dalla (2), e non pare che questo sia corretto, perché sebbene una

⁴ “*Très souvent, dans le calcul, le nombre d'actions individuelles à considérer est évident, et il sera rarement nécessaire de prendre en compte plus de deux actions variables*”.

⁵ Si noti che questo vale anche per gli stati limite di servizio, dove sono ripetibili ragionamenti analoghi sul problema del “fattor comune”.

azione variabile possa avere un valore quasi permanente non nullo, *dato che essa è “variabile” può anche darsi che non ci sia*, cosa che, lo ribadiamo, è esclusa dalla (2) a causa del $\gamma_q = 1$ a fattore comune.

Infatti un conto è valutare il valore quasi permanente di un'azione che può variare nel tempo, stabilendo con ciò il valore *non nullo* più probabile che si possa assumere come “quasi permanente”, un conto è sostenere che non vi sono rilevanti intervalli di tempo nei quali essa è nulla. Sono due cose nettamente diverse. In effetti, per fare uno degli innumerevoli esempi possibili, di notte e di sera i carichi variabili negli uffici non ci sono, ed un sisma può ben avvenire di notte, no? I teatri al mattino sono vuoti. Gli stadi nei giorni feriali sono vuoti. I carichi variabili avranno pure un valore “quasi permanente” pari a 0.3 volte il valore caratteristico, ma per la metà del tempo (o più) non ci sono affatto. *La metà del tempo o più.*

Pertanto a parere di chi scrive la (2) dovrebbe essere corretta come segue:

$$\sum_{i=1}^{ng} G_{ik} + \gamma_{Ia} E_a + \sum_{i=1}^{nq} (\gamma_{qi} \psi_{2i} Q_{ik}) \quad (2bis)$$

con la specificazione che “ γ_{qi} può assumere il valore 0 o 1 a seconda di quale situazione risulti individualmente peggiore per la struttura”.

2.4 Esempi a confutazione delle formule di normativa

2.4.1 Stati limite ultimi

Nel seguente semplice esempio si vede come il mettere a fattore comune il γ_q porti a pericolose sottostime delle azioni interne, leggibili invece con la formula corretta che prevede di non mettere a fattore comune γ_q .

Abbiamo (fig. 4) un semplice portale alto 4m, luce di 4m e sbalzo di 2m. Le colonne sono in Rck250 30x30cmq, le travi sono 30x45cmq. I carichi permanenti (P) siano modellati con un carico uniforme di 20kN/m=20N/mm. Siano presenti tre carichi variabili:

1. **Q₁** un carico uniforme di 30N/mm su tutto il traverso;
2. **Q₂** un carico appeso all'estremità dello sbalzo e pari a 30000N;
3. **Q₃** un carico distribuito pari a 8N/mm (ad esempio il vento).

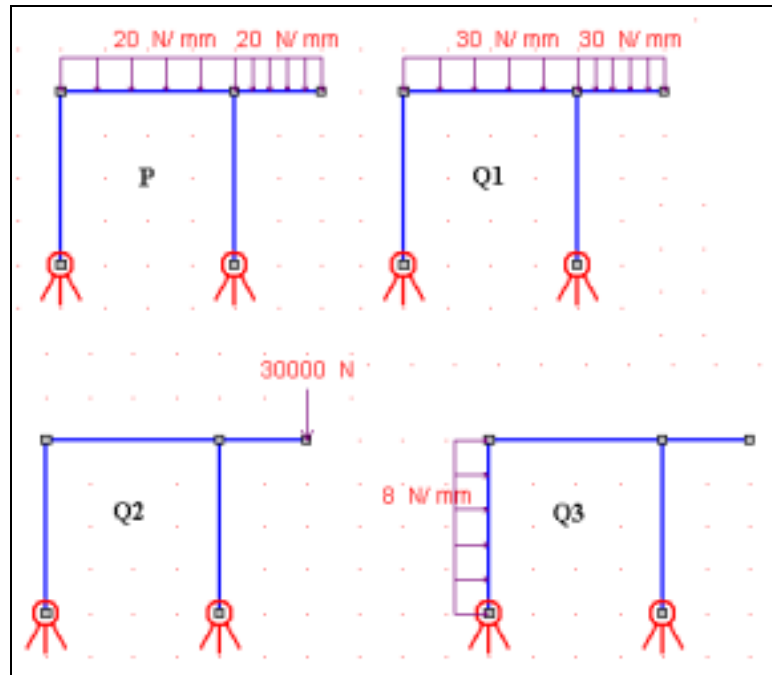


Fig.4: Struttura esemplificativa: un carico permanente, tre carichi variabili: è allo studio la trazione (eventuale) nella colonna di sinistra.

Con le formule della nostra normativa si generano le seguenti combinazioni (omettiamo di variare il segno di Q3 e supponiamo di tenere distinti il primo γ_q da quello a fattore comune nella sommatoria⁶):

C1	$1,4P + 1,5Q_1 + 1,5(0,7 Q_2 + 0,7 Q_3)$
C2	$1,4P + 1,5Q_2 + 1,5(0,7 Q_1 + 0,7 Q_3)$
C3	$1,4P + 1,5Q_3 + 1,5(0,7 Q_1 + 0,7 Q_2)$
C4	$1,4P + 1,5Q_1$
C5	$1,4P + 1,5Q_2$
C6	$1,4P + 1,5Q_3$
C7	$1,0P + 1,5Q_1 + 1,5(0,7 Q_2 + 0,7 Q_3)$
C8	$1,0P + 1,5Q_2 + 1,5(0,7 Q_1 + 0,7 Q_3)$
C9	$1,0P + 1,5Q_3 + 1,5(0,7 Q_1 + 0,7 Q_2)$
C10	$1,0P + 1,5Q_1$
C11	$1,0P + 1,5Q_2$
C12	$1,0P + 1,5Q_3$

Se si esamina l'involuppo della azione assiale della colonna di sinistra (fig.5 a sinistra), si osserva che essa non va mai in trazione.

⁶ Se non si tenessero distinti (come sarebbe logico dato che il simbolo " γ_q " è identico) e ce ne fosse uno solo le combinazioni 4, 5, 6, e 10, 11 e 12 sparirebbero.

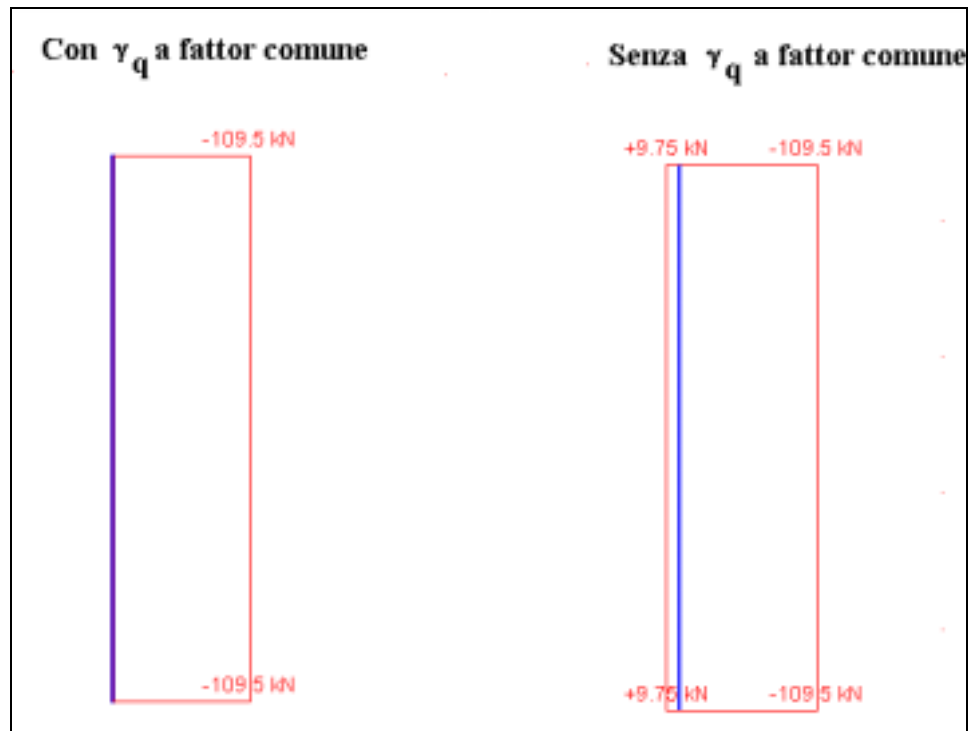


Fig.5: Involuppo dell'azione assiale nella colonna di sinistra. Le combinazioni di normativa (a sinistra) non mettono in evidenza la trazione, correttamente predetta evitando di mettere a fattor comune il γ_q .

Esaminiamo ora le stesse combinazioni, ma aggiungiamo in più la combinazione seguente

$$\boxed{\text{C13} \quad 1,0P + 1,5Q_3 + 0,0x0,7 Q_1 + 1,5x0,7 Q_2}$$

Questa combinazione non ha il γ_q a fattor comune, essa usa un γ_q eguale a 0 per il carico Q_1 ed un γ_q eguale a 1,5 per il carico Q_2 . Questa combinazione, *non prevista dalle formule della nostra normativa*, comporta una trazione nella colonna di sinistra (fig. 5 a destra), trazione che non avremmo potuto prevedere se avessimo usato le formule indicate da [2]. E' da notare che modificando opportunamente lo sbalzo o l'entità dei carichi avremmo potuto agevolmente avere valori di trazione assai superiori.

Si vuole ora esaminare il caso delle combinazioni sismiche, ed in particolare le regole di combinazione ribadite dalla recente Ordinanza, tratte da EC1 (senza modifiche se non quelle relative alla mancanza della sommatoria sui carichi permanenti). Stiamo parlando della formula (2).

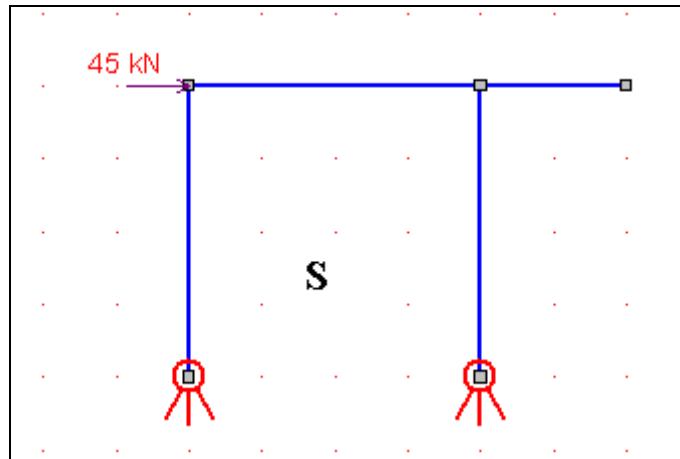


Fig. 6: il caso di carico “sisma”

Aggiungiamo alla struttura che abbiamo trattato una nuova condizione di carico “sismica”, schematizzata con una forza orizzontale agente al piano, valutata con la analisi statica equivalente (fig. 6). Immaginiamo di aver calcolato tale forza pari a 45kN (prendiamo una forza relativamente alta in modo da rendere la condizione sismica significativa).

A questo punto aggiungiamo la condizione sismica **S** e, accanto alle combinazioni precedenti generiamo con le formule delle nostre norme (decreto ministeriale, Ordinanza 3274 o EC8 fa lo stesso) la seguente *unica* combinazione aggiuntiva (si noti che il vento Q_3 non è concomitante in quanto il suo $\psi_2=0$):

$$\mathbf{S1} \quad \mathbf{1,0P+1,0S+(1x0,3Q_1+1x0,3Q_2)}$$

Se analizziamo questa combinazione, e la involuppiamo con le altre non sismiche, otteniamo una trazione nella colonna di sinistra stimata pari a $\boxed{+6\text{kN}}$.

Adesso aggiungiamo le combinazioni previste dalla (2bis) e scartate dalla (2), ovvero *combinazioni nelle quali alcuni carichi variabili non ci sono*⁷:

$$\mathbf{S2} \quad \mathbf{1,0P+1,0S+(0,0x0,3Q_1+1,0x0,3Q_2)}$$

$$\mathbf{S3} \quad \mathbf{1,0P+1,0S+(1,0x0,3Q_1+0,0x0,3Q_2)}$$

$$\mathbf{S3} \quad \mathbf{1,0P+1,0S+(0,0x0,3Q_1+0,0x0,3Q_2)}$$

Considerando anche queste combinazioni (*non previste dalle norme attualmente in vigore, inclusa l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n°3274*), otteniamo che la

⁷ A rigore in assenza di alcune variabili le masse cambiano e così le forze sismiche. Per semplicità abbiamo ommesso questo particolare, senza peraltro inficiare la bontà del ragionamento.

azione assiale di trazione nella colonna di sinistra passa a $+19,5\text{KN}$, vale a dire un valore più che triplo di quanto stimato con le combinazioni di normativa.

Resta quindi evidenziato che le formule di combinazione per i carichi accidentali possono non essere a favore di sicurezza.

2.4.2 Stati limite di servizio

Anche le formule previste per gli stati limite di servizio mettono a fattor comune γ_q ed anche loro non sono in generale a favore di sicurezza. Le formule di combinazione per gli stati limite di servizio sono le seguenti

$$\begin{aligned}
 \text{Combinazioni rare} & \quad G_k + Q_{ik} + \sum_{i=2}^{nq} \psi_{0i} Q_{ik} \\
 \text{Combinazioni frequenti} & \quad G_k + \psi_{1i} Q_{ik} + \sum_{i=2}^{nq} \psi_{2i} Q_{ik} \quad (3) \\
 \text{Combinazioni quasi permanenti} & \quad G_k + \sum_{i=1}^{nq} \psi_{2i} Q_{ik}
 \end{aligned}$$

In tutte queste formule c'è tacitamente un fattore $\gamma_q=1$ a fattor comune. Il seguente esempio, tratto da [10], di prossima pubblicazione, mette molto efficacemente in evidenza il problema.

Sia data una copertura non praticabile per la quale i carichi di riferimento siano

Permanente	G	0.2kN/mq
Variabile da Neve	Qn	0.55kN/mq
Variabile da Vento	Qv	-0.65kN/mq

Caso	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Vento	0.7	0.2	0
Neve	0.7	0.2	0

Il variabile da vento sia una depressione (da qui il segno negativo). Secondo le norme in vigore sono da considerare le seguenti combinazioni (per semplicità di lettura in grassetto sono i valori degli ψ):

$$\begin{aligned} \text{RARE} \quad & 0.2 + 0.55 + [\mathbf{0.7x(-0.65)}] = 0.295\text{kN/mq} \\ & 0.2 - 0.65 + [\mathbf{0.7x0.55}] = -0.065 \text{ kN/mq} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FREQUENTI} \quad & 0.2 + \mathbf{0.2x0.55} + [\mathbf{0x(-0.65)}] = 0.310\text{kN/mq} \\ & 0.2 + \mathbf{0.2x(-0.65)} + [\mathbf{0x0.55}] = 0.07\text{kN/mq} \end{aligned}$$

$$\text{QUASI PERMANENTI} \quad 0.2 + \mathbf{0x0.55} + \mathbf{0x(-0.65)} = 0.2\text{kN/mq}$$

Con queste formule il carico di calcolo sarebbe *con le attuali normative*:

$$\begin{aligned} \text{MAX} \quad & \boxed{0.310\text{kN/mq}} \\ \text{MIN} \quad & \boxed{-0.065\text{kN/mq}}. \end{aligned}$$

Proviamo ora a considerare le combinazioni rare, ed ammettiamo che il γ_q non sia a fattor comune e che possa assumere anche il valore nullo (come è sacrosanto dato che si tratta di azioni variabili): Aggiungeremo le combinazioni

$$\begin{aligned} \text{RARE} \quad & 0.2 + 0.55 + [\mathbf{0x(-0.65)}] = 0.75\text{kN/mq} \\ & 0.2 - 0.65 + [\mathbf{0x(0.55)}] = -0.45\text{kN/mq} \end{aligned}$$

E pertanto i carichi da assumere per il calcolo sarebbero i seguenti:

$$\begin{aligned} \text{MAX} \quad & \boxed{0.75\text{kN/mq}} \\ \text{MIN} \quad & \boxed{-0.45\text{kN/mq}}. \end{aligned}$$

Decisamente maggiori di quelli previsti dalle formule di normativa.

Rimarchiamo il fatto che queste formule (3), *in generale non a favore di sicurezza*, sono ubiquie: si trovano nel Decreto Ministeriale del 1996, si trovano nell'EC1, nell'EC3, nell'EC2. Esse dovrebbero essere corrette, a parere di chi scrive, con le seguenti:

$$\begin{aligned} \text{Combinazioni rare} \quad & \sum_{i=1}^{ng} G_{ki} + Q_{ik} + \sum_{i=2}^{nq} \gamma_{qi} \psi_{0i} Q_{ik} \\ \text{Combinazioni frequenti} \quad & \sum_{i=1}^{ng} G_{ki} + \psi_{1i} Q_{ik} + \sum_{i=2}^{nq} \gamma_{qi} \psi_{2i} Q_{ik} \end{aligned} \quad (3\text{bis})$$

$$\text{Combinazioni quasi permanenti } \sum_{i=1}^{ng} G_{ki} + \sum_{i=1}^{nq} \gamma_{qi} \psi_{2i} Q_{ik}$$

con la specificazione “ γ_{qi} deve assumere il valore 0 o 1 a seconda di quale situazione risulti individualmente peggiore per la struttura”.

3 Il numero delle combinazioni

Passiamo ora ad esaminare il problema del numero di combinazioni che occorrerebbe generare secondo le formule (1bis) e (2bis). Ad una prima lettura può apparire che il numero di combinazioni richiesto dalla (1bis) (la (1) la mettiamo da parte) sia pari a **nq**, ovvero una per ogni distinto carico variabile. Per la (2bis) si può credere che il numero di combinazioni sia eguale a **na**.

In realtà le cose sono molto molto diverse. Nei prossimi paragrafi verrà chiarito come, a causa di una serie di motivi, il numero di combinazioni di cui occorre tener conto sia molto più elevato.

3.1 La matrice di contemporaneità

Una prima ragione per la quale il numero di combinazioni cresce è che i carichi variabili collocati nelle varie condizioni di carico base possono dover essere mutuamente esclusivi. In altre parole può accadere che in presenza di un certo caso di carico variabile I i casi di carico J, K... non debbano essere presenti.

Del resto in [1] troviamo esplicitamente scritto: “actions which cannot occur simultaneously, for example, due to physical reasons, should not be considered together in combinations”.

Volendo fare un esempio, possiamo considerare il caso di un carico che assume differenti configurazioni, per esempio m, poste in m distinti casi di carico: si pensi alle differenti posizioni di un carico mobile, o alle differenti “scacchiere” di un carico variabile posto su una struttura.

Nella circolare [2] a spiegazione della norma [3], il punto non è esplicitamente chiarito. Resta tuttavia ben evidente che, ad esempio, un carico mobile non può essere contemporaneamente in due posizioni diverse.

Per tener conto di questo problema occorre generare una matrice quadrata booleana, la quale dica, per ogni generico caso di carico variabile I, se i casi di carico variabili J (con J diverso da I) siano o meno ammessi ad essere contemporaneamente agenti rispetto ad I.

Per fissare le idee consideriamo il seguente primo insieme di condizioni di carico.

Caso	Nome sintetico	Tipo
1	G1	Permanente (peso strutture)
2	G2	Permanente (carichi portati)
3	V1	Variabile "V" (prima scacchiera)
4	V2	Variabile "V" (seconda scacchiera)
5	V3	Variabile "V"(carichi pieni)
6	W1	Variabile "W" (vento x)
7	W2	Variabile "W" (vento y)
8	T1	Variabile "T" (termico)

Introduciamo la *matrice di contemporaneità* per la struttura in esame:

	Caso 3 V1	Caso 4 V2	Caso 5 V3	Caso 6 W1	Caso 7 W2	Caso 8 T1
Caso 3 V1	-	0	0	1	1	1
Caso 4 V2	0	-	0	1	1	1
Caso 5 V3	0	0	-	1	1	1
Caso 6 W1	1	1	1	-	0	1
Caso 7 W2	1	1	1	0	-	1
Caso 8 T1	1	1	1	1	1	-

Tabella 1: matrice di contemporaneità per la struttura in esame.

In questa matrice il termine C_{ij} sta ad indicare se il caso di carico presente nella colonna j può presentarsi quando si presenta il caso di carico presente nella riga i. Il numero "0" indica che non si può presentare, il numero "1" indica che si può presentare. La matrice è simmetrica.

La matrice che abbiamo scritto nel nostro esempio ci dice che nessun carico di tipo VI può presentarsi contemporaneamente ad un carico di tipo VJ. Si noti che la contemporanea presenza di vento X ed Y è esclusa: se si vuole un vento diretto con un certo angolo, occorrerà aggiungere una condizione di carico che lo preveda esplicitamente (e che escluda le altre). La mancanza del vento in direzione inclinata è voluta: si intende far vedere che anche in un caso molto semplice il numero di combinazioni che otterremo è molto elevato. A fine lavoro verranno dati i risultati anche per casi più realistici e approfonditi.

Tenendo conto della impossibilità della presenza contemporanea dei vari casi di carico e di tutte le permutazioni possibili, si ottengono 19 combinazioni, la prima delle quali prevede solo i permanenti e nessun variabile.

Infatti si ottengono:

- A1) 1 combinazione con solo i permanenti
- A2) 2 combinazioni con a base il caso 3 (concomitanti termico + vento x oppure + vento y);
- A3) 2 combinazioni con a base il caso 4 (come sopra)
- A4) 2 combinazioni con a base il caso 5 (come sopra);
- A5) 3 combinazioni con a base il caso 6 (concomitanti T1 e V1, V2 o V3);
- A6) 3 combinazioni con a base il caso 7 (come sopra);
- A7) 6 combinazioni con a base il caso 8 (ognuna delle tre V con ognuna delle due W);

3.2 Effetto segno

E' possibile che alcune delle condizioni di carico base si presentino o con il segno positivo o con il segno negativo. In questo caso ciascuna combinazione precedentemente definita dovrà essere ulteriormente suddivisa in altre combinazioni, in modo da considerare tutte le possibili permutazioni possibili. Se immaginiamo che i casi 6, 7, ed 8 possano avere segno positivo o segno negativo, il numero delle combinazioni cresce e da 19 va a 73. Precisamente avremo:

- B1) 1 combinazione coi soli permanenti
- B2) 8 combinazioni con a base il caso 3 (concomitanti termico o vento x o y, tutti col più o il meno: $2^3=8$);
- B3) 8 combinazioni con a base il caso 4 (come sopra);
- B4) 8 combinazioni con a base il caso 5 (come sopra);
- B5) 12 combinazioni con a base il caso 6 (concomitanti T1 e V1, V2 o V3, le 3 viste in precedenza in A5 si sdoppiano due volte, a causa di T ed a causa di W1, ovvero dello stesso caso 6);
- B6) 12 combinazioni con a base il caso 7 (come sopra);
- B7) 24 combinazioni con a base il caso 8 (le precedenti 6 viste in A7 si sdoppiano due volte: a causa di T1 ed a causa di W1 o W2).

3.3 Effetto inf-sup

Le norme si premurano di spiegare che nel caso in cui un carico permanente produca un effetto favorevole, il suo coefficiente γ deve valere 1 e non 1.4. Questo vuol dire che ciascun carico permanente indipendente deve assumere il suo valore superiore ($\gamma_g = 1,4$) o il suo valore inferiore ($\gamma_g = 1$). Di questo non abbiamo tenuto conto nel nostro esempio, sino ad ora.

Si noti che in una struttura reale non è affatto possibile dire a priori che *per tutti gli elementi strutturali* un carico permanente al valore superiore rappresenti il massimo cimento: al contrario si deve sostenere che in ogni struttura reale esistono uno o più componenti che devono essere verificati anche per combinazioni che comportino i valori inferiori dei carichi permanenti. Si pensi ad esempio alla possibilità di trazione nelle colonne o alla verifica delle fondazioni sotto effetti ribaltanti quali normalmente producono vento o sisma.

Ricordiamo che non è affatto corretto assumere che il valore superiore o inferiore dei carichi permanenti debba presentarsi in contemporanea tra essi: ogni condizione di carico permanente è indipendente dalle altre ed ha una distribuzione spaziale diversa, e quindi si possono dare casi in cui il peggio avviene per particolari sequenze di sup/inf nei vari casi di carico di tipo permanente.

Se si tiene conto della variabilità inf/sup di ciascuno dei due carichi permanenti che sono stati ipotizzati per la nostra struttura, si ottiene che il numero di combinazioni passa a 291. Il numero è sostanzialmente ottenibile moltiplicando per 4 il numero di precedenti combinazioni (73), e togliendo 1 (quella coi carichi permanenti da soli già esistente). Il numero 4 deriva dal fatto che si possono dare le seguenti possibilità per i casi 1 e 2:

- sup/sup
- sup/inf
- inf/sup
- inf/inf

mentre in precedenza avevamo considerato il solo caso sup/sup. Si ribadisce che i carichi permanenti possono in generale essere applicati a zone differenti della struttura: per esempio il peso proprio strutturale può essere equidistribuito sulla struttura, mentre i carichi permanenti portati possono riguardare una parte specifica della struttura (vedi fig. 1).

A questo punto dobbiamo constatare che analogo ragionamento sui valori superiore ed inferiore deve essere fatto per ciascun carico variabile, nessuno escluso (ed è questo il motivo per cui il γ_q a fattore comune della (1) è errato). Infatti data la arbitraria disposizione dei carichi nello

spazio (stiamo parlando ovviamente di strutture reali, civili, industriali, non di schemi semplificati) occorre anche in questo caso osservare che un valore ridotto può, in taluni componenti strutturali, generare situazioni peggiorative, né a priori siamo in grado di escluderlo. *Non è affatto detto che tutti i carichi variabili agenti contemporaneamente producano un effetto peggiore di quello prodotto da alcuni carichi (terne, quaterne...) agenti senza altri.* Ad esempio abbiamo visto che nei riguardi del rischio di trazione delle colonne, in un banale portale, la situazione peggiore è quella con il vento massimo, i permanenti minimi, i variabili verticali nulli, una situazione che si ottiene annullando gli effetti dei variabili e minimizzando quelli dei permanenti.

Tornando al nostro esempio-test, con 8 condizioni di carico base dovremo pertanto sdoppiare ogni evenienza di ciascun carico variabile, mettendo sia il suo valore superiore ($\gamma_{qi} = 1,5$) sia quello inferiore ($\gamma_{qi} = 0$). E dovremo naturalmente considerare tutte le permutazioni possibili. Quindi il numero delle combinazioni passa a 675.

Nel generare le combinazioni (con l'ausilio di un calcolatore elettronico) siamo naturalmente stati attenti a non generarne di ridondanti. In particolare:

- non vengono aggiunte combinazioni se già aggiunte in precedenza;
- non vengono aggiunte combinazioni se queste sono ottenibili da un'altra aggiunta in precedenza e per la quale i moltiplicatori possano essere ottenuti mediante un unico fattore moltiplicativo.

Questa ultima condizione deve essere spiegata. Supponiamo di aver generato una combinazione "F" definita dai valori degli n moltiplicatori dei casi di carico base F_i . Se tra le combinazioni già aggiunte figura una combinazione "G" definita dai moltiplicatori G_i , e se per ogni "i" risulta

$$F_i = K G_i$$

allora le due combinazioni sono simili. Se $K < 1$ la combinazione "G" è peggiore di quella "F" e sarà tenuta, scartando F. Se invece $K > 1$ allora la peggiore è "F" e sarà tenuta "F", scartando "G".

Abbiamo ottenuto 675 combinazioni per una struttura avente 8 casi di carico base, una struttura che certo non vuole essere specialmente ostica: non abbiamo tenuto in conto la neve, né il sisma. Abbiamo preso in considerazione le sole direzioni X ed Y e non abbiamo tenuto in conto direzioni inclinate rispetto agli assi di riferimento: l'unica caratteristica alla quale non abbiamo rinunciato è la genericità della struttura, la sua spazialità e la sua non completa simmetria, condizioni, queste, che quasi sempre si verificano nella realtà dei progetti.

Poi abbiamo applicato rigorosamente le formule ed i principi.

4 Esempi sul numero di combinazioni

Produciamo ora una serie di esempi su possibili altre configurazioni di carico.

4.1 Esempio 1: aggiungiamo il sisma

In questo esempio aggiungiamo due condizioni di carico di tipo accidentale (sisma). Occorrerà aggiungere alle combinazioni di tipo (1bis) anche le combinazioni di tipo (2bis).

Caso	Nome sintetico	Tipo
1	G1	Permanente (peso strutture)
2	G2	Permanente (carichi portati)
3	V1	Variabile "V" (prima scacchiera)
4	V2	Variabile "V" (seconda scacchiera)
5	V3	Variabile "V" (carichi pieni)
6	W1	Variabile "W" (vento x)
7	W2	Variabile "W" (vento y)
8	T1	Variabile "T" (termico)
9	E1	Accidentale "E" (sisma X)
10	E2	Accidentale "E" (sisma Y)

La matrice di contemporaneità sia la seguente:

	Caso 3 V1	Caso 4 V2	Caso 5 V3	Caso 6 W1	Caso 7 W2	Caso 8 T1	Caso 9 E1	Caso 10 E2
Caso 3 V1	-	0	0	1	1	1	1	1
Caso 4 V2	0	-	0	1	1	1	1	1
Caso 5 V3	0	0	-	1	1	1	1	1
Caso 6 W1	1	1	1	-	0	1	1	1
Caso 7 W2	1	1	1	0	-	1	1	1
Caso 8 T1	1	1	1	1	1	-	1	1
Caso 9 E1	1	1	1	1	1	1	-	0
Caso 10 E2	1	1	1	1	1	1	0	-

Inoltre i segni dei casi 9 e 10 potranno variare (trattandosi di sisma).

Nella seguente tabella si danno i risultati ottenuti facendo crescere gradualmente i criteri tenuti in conto (come per l'esempio precedentemente svolto):

Tenendo in conto	Numero combinazioni
Contemporaneità	25
Contemporaneità + segni	97
Contemporaneità + segni+ inf/sup sui permanenti	315
Contemporaneità + segni+ inf/sup sui permanenti+inf/sup sui variabili	734

4.2 Esempio 2: aggiungiamo tre possibili configurazioni per la neve

Abbiamo ora i seguenti casi di carico:

Caso	Nome sintetico	Tipo
1	G1	Permanente (peso strutture)
2	G2	Permanente (carichi portati)
3	V1	Variabile "V" (prima scacchiera)
4	V2	Variabile "V" (seconda scacchiera)
5	V3	Variabile "V" (carichi pieni)
6	W1	Variabile "W" (vento x)
7	W2	Variabile "W" (vento y)
8	T1	Variabile "T" (termico)
9	E1	Accidentale "E" (sisma X)
10	E2	Accidentale "E" (sisma Y)
11	S1	Variabile "S" (neve su metà copertura)
12	S2	Variabile "S" (neve su altra metà copertura)
13	S3	Variabile "S" (neve su tutta la copertura)

La matrice di contemporaneità sia la seguente:

	Caso 3 V1	Caso 4 V2	Caso 5 V3	Caso 6 W1	Caso 7 W2	Caso 8 T1	Caso 9 E1	Caso 10 E2	Caso 11 S1	Caso 12 S2	Caso 13 S3
Caso 3 V1	-	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 4 V2	0	-	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 5 V3	0	0	-	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 6 W1	1	1	1	-	0	1	1	1	1	1	1
Caso 7 W2	1	1	1	0	-	1	1	1	1	1	1
Caso 8 T1	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1	1
Caso 9 E1	1	1	1	1	1	1	-	0	1	1	1
Caso 10 E2	1	1	1	1	1	1	0	-	1	1	1
Caso 11 S1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	0	0
Caso 12 S2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	-	0
Caso 13 S3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	-

Inoltre i segni dei casi 11 e 12 e 13 non potranno variare (trattandosi di neve).

Si ottengono i seguenti risultati:

Tenendo in conto	Numero combinazioni
Contemporaneità	79
Contemporaneità + segni	313
Contemporaneità + segni+ inf/sup sui permanenti	1179
Contemporaneità + segni+ inf/sup sui permanenti+inf/sup sui variabili	3578

4.3 Esempio 3: un caso più articolato

Aggiungiamo un altro variabile R, le direzioni inclinate e sdoppiamo il termico per evitare la contemporaneità del riscaldamento con la neve. Abbiamo i seguenti casi di carico base:

Caso	Nome sintetico	Tipo
1	G1	Permanente (peso strutture)

2	G2	Permanente (carichi portati)
3	V1	Variabile "V" (prima scacchiera)
4	V2	Variabile "V" (seconda scacchiera)
5	V3	Variabile "V" (carichi pieni)
6	R1	Variabile "R"
7	W1	Variabile "W" (vento x)
8	W2	Variabile "W" (vento y)
9	W3	Variabile "W" (vento +45°)
10	W4	Variabile "W" (vento -45°)
11	T1	Variabile "T" (termico +25°C)
12	T2	Variabile "T" (termico -25°C)
13	E1	Accidentale "E" (sisma X)
14	E2	Accidentale "E" (sisma Y)
15	E3	Accidentale "E" (sisma +45°)
16	E4	Accidentale "E" (sisma -45°)
17	S1	Variabile "S" (neve su metà copertura)
18	S2	Variabile "S" (neve su altra metà copertura)
19	S3	Variabile "S" (neve su tutta la copertura)

E la seguente matrice di contemporaneità (si noti la non contemporaneità del riscaldamento con la neve):

	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9	Caso 10	Caso 11	Caso 12	Caso 13	Caso 14	Caso 15	Caso 16	Caso 17	Caso 18	Caso 19
	V1	V2	V3	R1	W1	W2	W3	W4	T1	T2	E1	E2	E3	E4	S1	S2	S3
Caso 3 V1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 4 V2	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 5 V3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 6 R	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 7 W1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 8 W2	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 9 W3	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 10 W4	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 11 T1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
Caso 12 T2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Caso 13 E1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
Caso 14 E2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
Caso 15 E3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1
Caso 16 E4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
Caso 17 S1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0
Caso 18 S2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0
Caso 19 S3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1

I risultati che si ottengono per le combinazioni degli stati limite ultimi sono i seguenti:

Tenendo in conto	Numero combinazioni
Contemporaneità	457
Contemporaneità + segni	913
Contemporaneità + segni+ inf/sup sui permanenti	3507
Contemporaneità + segni+ inf/sup sui permanenti+inf/sup sui variabili	11422

5 HAL9000

I risultati presentati mostrano con plastica evidenza che gli algoritmi previsti dalle norme europee attualmente in vigore, se applicati con coerenza, portano a dover considerare un numero di combinazioni così alto da escludere in modo categorico, anche per le strutture più semplici e per le

configurazioni di carico più elementari, la possibilità di fare i calcoli a mano. Nei casi più frequenti è di fatto inibito al progettista anche il controllo sui risultati della elaborazione, a meno che non si intenda il controllo in senso meramente statistico, al pari delle combinazioni generate.

L'applicazione rigorosa delle formule di EC1/EC2/EC3 porta ad affidare al calcolatore elettronico il ruolo fondamentale ed ineludibile di generare tutti i miliardi di numeri necessari ad eseguire le verifiche. Non sembra esagerato riferirsi alla ben nota rappresentazione di Stanley Kubrick, che nel film *2001 Odissea nello Spazio* descrisse in modo romanzato i problemi derivanti da un inappropriato funzionamento di un elaboratore elettronico (HAL9000) il quale aveva smesso di funzionare correttamente.

Nel caso dei calcoli strutturali v'è l'aggravante che un eventuale cattivo funzionamento di una routine, potrebbe non comportare violazioni così plateali da essere immediatamente riscontrate. Se si vogliono realmente esaminare tutte le combinazioni potenzialmente sfavorevoli generabili con ragionamenti statistici per tutte le componenti strutturali, è necessario introdurre una intera gamma di nuovi controlli e di nuovi test volti a controllare i risultati ottenuti mediante l'elaboratore. Sebbene tale metodo non possa consentire di escludere la possibilità di errori e di imprecisioni nel calcolo, esso sembra indispensabile al fine di ridurre entro margini accettabili la probabilità che i numeri generati da un tale marchingegno siano effettivamente affidabili.

E' inoltre quanto mai necessario elaborare dei metodi atti a raffrontare tra loro stati di sforzo differenti al fine di scartare quelli sicuramente non rilevanti *prima* della esecuzione delle verifiche. E' infatti ben evidente che su strutture normali (centinaia di elementi) la necessità di verificare centinaia o migliaia di combinazioni porta a tempi di calcolo formidabilmente alti.

E' appena il caso di dire, poi, che se si esce dal campo lineare la necessità di indagare tutte le combinazioni potenzialmente rilevanti porta a tempi di calcolo del tutto fuori scala rispetto alle attuali – pur potenti – possibilità di elaborazione.

6 Rigore a tratti

Resta da capire come mai non sia corrente la segnalazione di questo genere di problemi nell'applicazione del metodo degli stati limite e delle regole di generazione delle combinazioni previste da EC1 e, di conseguenza, dalle varie normative nazionali.

Abbiamo visto che la identificazione dei casi di carico permanenti in un unico caso statisticamente omogeneo porta la normativa italiana a semplificare e notevolmente ridurre il numero di combinazioni attese.

Analogamente il mettere a fattor comune il γ_q porta ad avere assai meno combinazioni di quelle necessarie, e soprattutto, porta a scartare alcune importanti configurazioni dei carichi.

Tali semplificazioni sono solo artifici atti a ridurre il numero di combinazioni che diventerebbe, in caso contrario, nettamente più alto. Non vi sono, a parere di chi scrive, ragioni di principio né di metodo per considerare statisticamente indipendenti azioni che, pur essendo tutte “permanenti”, o “variabili”, hanno in realtà origini ben distinte.

Questo è un classico esempio di semplificazione brutale introdotta a fianco di un metodo che vorrebbe essere preciso e rigorosamente fondato su basi statistiche. Ci si chiede che senso abbia introdurre semplificazioni del genere e perché queste semplificazioni debbano avere crisma di attendibilità, mentre al progettista è di fatto negato il diritto di scegliere le combinazioni più rilevanti per la sua struttura. Non vi è una differenza qualitativa tra questa semplificazione ed altre, tipiche della progettazione tradizionale.

Citiamo ora da EC1, annesso A ([1]):

A.(4) In linea di principio ci sono due modi per determinare i valori numerici dei fattori parziali:

- a) Sulla base della calibrazione rispetto ad una lunga e efficace storia di tradizioni di costruzione; questo è il principio base per la maggior parte dei fattori proposti dalle versioni attuali degli Eurocodici.*
- b) Sulla base di valutazioni statistiche di dati sperimentali ed osservazioni sul campo; ciò deve essere fatto all'interno della cornice della teoria probabilistica della affidabilità.*

*A.(5) In pratica i due metodi possono anche essere usati in combinazione. In particolare un mero approccio statistico (probabilistico) di solito fallisce a causa della mancanza di dati sufficienti. **Qualche riferimento ai metodi di progetto tradizionali deve sempre essere fatta.***

[...]

Dunque non serve essere grandi esperti per capire che alla base dei metodi “probabilistici” che ci vengono presentemente indicati dal pensiero accademico prevalente come i migliori e più affidabili, ci sono pazienti ed approfondite analisi volte a cercare di sposare retroattivamente quei metodi semplificati che hanno mostrato la loro validità, e che poi formalmente si vogliono abolire in quanto arretrati ed inappropriati. In altre parole, ciò che è oggetto di attente calibrature da una parte, dall'altra viene bandito come metodologia vecchia ed inappropriata. E' peraltro significativo che la affermazione in grassetto sia scomparsa dalla più recente EN [9].

Ma v'è ancora da dire.

I metodi previsti dalle normative per la generazione delle combinazioni sono sistematicamente disattesi e non applicati sulla base di considerazioni che sono prive di rigore logico, e che di fatto introducono pesanti semplificazioni, giustificate unicamente dal tentativo di rendere abordabili metodologie che invece snaturano il percorso progettuale trasferendone la responsabilità ai calcolatori elettronici.

E' classico, nei testi che esemplificano il metodo degli stati limite (molti i casi, ad esempio i manuali ECCS [5], [6] ma anche molti testi italiani, alcuni dei quali recentissimi) introdurre semplificazioni come la totale simmetria della struttura; la trascurabilità di un certo caso a confronto di altri; il non tenere in conto la simultaneità, per cui ad un carico variabile assunto come base corrispondono sempre *tutti* gli altri a valori ridotti; l'effetto inf/sup; ecc. ecc., semplificazioni che devono servire a mostrare la semplicità di un metodo che tutto è tranne che semplice. Tali semplificazioni o si riferiscono a strutture così elementari da non essere un realistico banco di prova (totalmente simmetriche, piane o addirittura lineari), o sono semplificazioni a stretto rigore non lecite (omessa analisi di contemporaneità, omessi valori superiore ed inferiore, omessa variabilità dei segni in virtù della simmetria non a caso ipotizzata), perché evitano di considerare combinazioni che hanno importanza come le altre, ma che se aggiunte con coerenza porterebbero alla palmare evidenza della necessità di HAL9000.

Il rigore preteso dalle normative agli stati limite italiane ed europee è pertanto un "rigore a tratti", introdotto dove è utile introdurlo, fatto sparire dove invece esso sarebbe d'impiccio.

7 Conclusioni

Si è mostrato che le normative italiane contengono da gran tempo indicazioni relative alla generazione di combinazioni che *non sono* a favore di sicurezza. Si chiede pertanto la loro modifica.

Anche le combinazioni per gli stati limite ultimi previste da EC1, dal Decreto Ministeriale e dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n°3274, e relative ai carichi accidentali non sono a favore di sicurezza, dato che si esclude la selettiva nullità delle azioni variabili. Analogo discorso vale per le combinazioni relative agli stati limite di servizio. A tale riguardo si è proposta una modifica alla formula di EC1, del Decreto Ministeriale e dell'Ordinanza 3274 PCM, relativa alle combinazioni accidentali.

Si è evidenziato con chiarezza che le prescrizioni relative alla generazione delle combinazioni, sia per gli stati limite ultimi che per quelli di servizio, attualmente previste dalle

normative europee, portano a generare centinaia o migliaia di combinazioni in casi strutturali del tutto correnti. Ciò tende a snaturare il lavoro del progettista.

Si propone pertanto di lasciare libero il progettista di decidere le combinazioni a proprio giudizio, ferma restando la necessità di impiegare i coefficienti parziali di sicurezza previsti dalla normativa. Può darsi che ciò comporti la generazione di combinazioni così improbabili da risultare impossibili, *ma tale approccio può portare a calcoli a favore di sicurezza con un numero assai inferiore di combinazioni.*

Le formule per la generazione delle combinazioni previste dalle normative devono essere ritirate per lasciar posto alla libertà (e responsabilità) del progettista. *In alternativa esse devono essere applicate rigorosamente*, con tutto quello che questo comporta: non sembrano essere corrette le attuali vie di mezzo, né le banalizzazioni così oggi alla moda.

8 Riferimenti

- [1] Eurocode 1 – Basis of design and actions on structures – Part 1: Basis of design, ENV1991-1, September 1994
- [2] Circolare 4 luglio 1996, N.156AA.GG./STC “Istruzioni per l’applicazione delle ‘Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi’ di cui al decreto ministeriale 16 gennaio 1996”.
- [3] Decreto Ministeriale 16-1-1996 “Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”, G.U. 5-2-1996, n. 29
- [4] Ordinanza Presidenza del Consiglio dei Ministri n°3274 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”, S.O. G.U. n.105, 8-5-2003.
- [5] Chantrain Ph., Schleich J.B., Conay Y., Mauer Th, „Manuale di progettazione per Edifici in Acciaio Controventati o a Nodi Fissi relativo all’Eurocodice 3“, ECCS, N°85 IT, prima ed. 1996
- [6] Examples to Eurocode 3, ECCS N°71, 1993
- [7] Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici, 24 maggio 1982, n. 22631 “Istruzioni relative ai carichi, sovraccarichi ed ai criteri generali per la verifica della sicurezza delle costruzioni”.
- [8] Code Modele, CEB-FIP Pour Les Structures En Beton, Septembre 1977 (pubblicato Avril 1978).
- [9] Eurocode- Basis of structural Design, prEN1990, final draft, July 2001

[10] Bernuzzi, C. “Proporzionamento di Costruzioni in Acciaio”, POLIPRESS, 2004, di prossima pubblicazione.