AREA EDILIZIA E SOSTENIBILITA'

OPERE DI ADEGUAMENTO ALLA NORMATIVA ANTINCENDIO E MESSA IN SICUREZZA E MIGLIORAMENTO SISMICO DEI LABORATORI DI INGEGNERIA VIA U. TERRACINI 24/26 e 34 BOLOGNA

PROPRIETA' EDIFICIO
UNIBO

CODICE EDIFICIO N.	CODICE PROGETTO N.	TICKET N.
431		17688

DIRIGENTE AREA EDILIZIA E SOSTENIBILITA'
ing. ANDREA BRASCHI

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO	DIRETTORE DEI LAVORI
arch. MARIA PANDOLFO	----------

PROFESSIONISTI INCARICATI

PROGETTO ARCHITETTONICO	----------
PROGETTO IMPIANTI MECCANICI	----------
PROGETTO IMPIANTI ELETTRICI	----------
PROGETTO OPERE STRUTTURALI	ing. ANDREA BRIGHENTI
COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE	geom. DINA UCCELLI
COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI ESECUZIONE	----------

LIVELLO DELLA PROGETTAZIONE: FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA ☐ DEFINITIVO ☐ ESECUTIVO ☒ AS-BUILT ☐

OGGETTO DOCUMENTO	SCALA	N° PROGRESSIVO ELENCO ELABORATI
ALLEGATO B: CALCOLO DELLA CURVA DI CAPACITA'	DATA 04/08/2020	TAVOLA N° DG_09-ALL_B
	REV. / DATA	

Allegato B

Curva di capacità del sistema controvento dissipativo – telaio
Calcolo del fattore di struttura

1 INTRODUZIONE

La riduzione della vulnerabilità sismica di costruzioni esistenti in cemento armato può essere basa sul principio della dissipazione di energia.
L'utilizzo di dissipatori isteretici tipo BRAD (Buckling Restrained Axial Damper) prevede generalmente il loro diretto inserimento all'interno della maglia strutturale, spesso in serie con profili in acciaio (profili ad H o tubolari), a costituire un diagonale di controvento.
Valutando una applicazione alternativa, cercando di voler intervenire sulla struttura dall'esterno, il dissipatore BRAD funge da collegamento tra l'impalcato e un controvento posto esternamente ad esso, identificato come un pilastro o un setto in c.a.

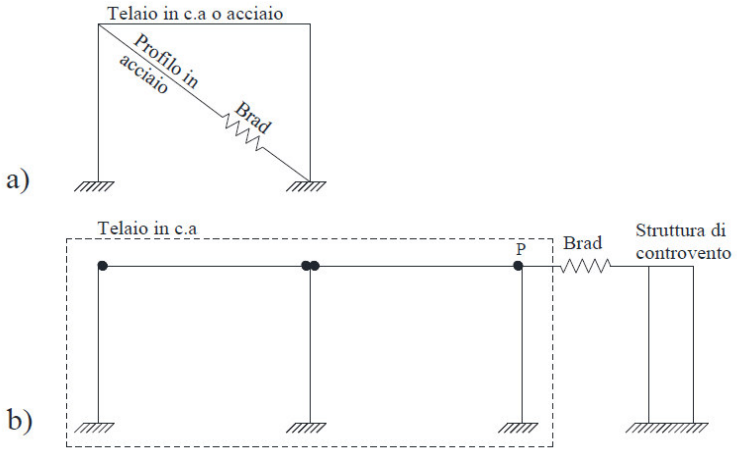


Figura 1 - Applicazioni del dispositivo BRAD

L'incremento della rigidezza della struttura a seguito dell'intervento comporta una riduzione della risposta in termini di spostamento.

2 CARATTERISTICHE DEI DISPOSITIVI BRAD

I BRAD sono dissipatori costituiti da due parti, un nucleo interno in acciaio e una camicia esterna, anch'essa in acciaio e riempita di calcestruzzo, che evita al nucleo di instabilizzarsi. Tra il calcestruzzo di riempimento ed il nucleo è interposta una pellicola di materiale che impedisce la trasmissione delle tensioni tangenziali tra i due componenti e permette al nucleo di allungarsi o accorciarsi liberamente dissipando energia.
I dispositivi tipo BRAD, soggetti a carichi di tipo ciclico, sono caratterizzati da comportamento isteretico ampio e stabile anche dopo molti cicli, indipendente da temperatura e velocità, con una resistenza a compressione prossima a quella a trazione. L'attivazione di questi dispositivi avviene al raggiungimento di un predeterminato valore di sollecitazione e, per azioni eccezionali, l'energia in ingresso viene in gran parte assorbita dai dissipatori. La dissipazione di energia attraverso lo snervamento di dispositivi tipo BRAD comporta numerosi vantaggi:

- la dissipazione di energia è localizzata in un dispositivo, sostituibile, mantenendo la struttura principale in campo elastico e dunque priva di danni;
- lo snervamento dei dispositivi BRAD non influenza la resistenza ai carichi verticali del sistema strutturale.

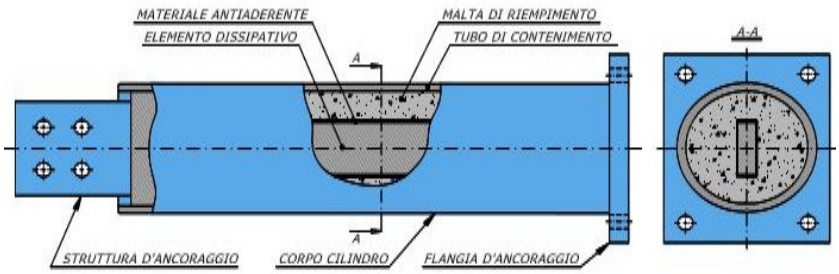


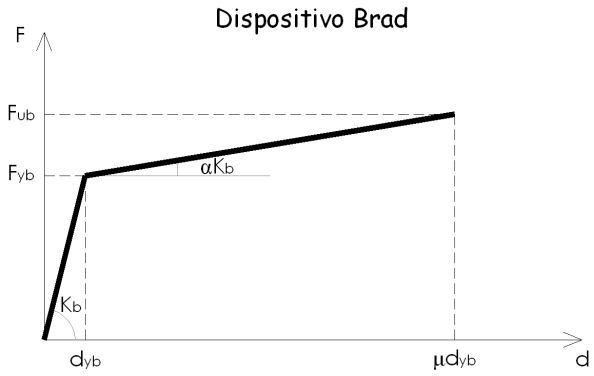
Figura 2 - Elementi costituenti i dispositivi BRAD®

3 VALUTAZIONE DEL SISTEMA DISSIPATIVO

Si considerino il BRAD e l'elemento di controvento. Il sistema dissipativo ottenuto combinando questi due elementi viene trattato un sistema di molle in serie.

3.1 BRAD

Il BRAD può essere schematizzato come un comportamento bilineare: il legame costitutivo può essere caratterizzato con i seguenti parametri:



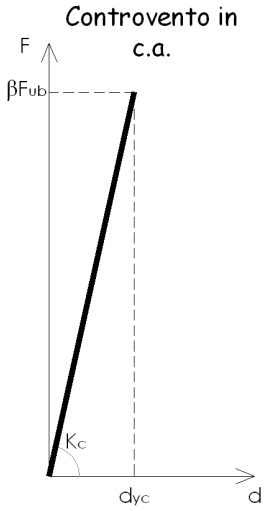
- K_b, la rigidezza elastica iniziale;
- F_{yb}, la forza di snervamento;
- F_{ub}, la forza ultima;
- α, il rapporto di rigidezza post elastica;
- μ_b, la duttilità massima del dispositivo.

Tali parametri si possono ricavare dalle tabelle delle caratteristiche del produttore:

- $F_1=F_{yb}$;
- $d_1=d_{yb}$, da cui rapportando con F_b si ottiene K_{yb};
- $F_2=F_{ub}$;
- $d_2=d_{ub}$, rapportando in modo opportuno si ottiene il parametro a e rapportando a d_{yb} si ottiene μ_b;

3.2 Controvento in c.a.

Il controvento in c.a. deve essere progettato per restare in campo elastico, di conseguenza il modello costitutivo è rappresentabile da una legge lineare, basandosi sui seguenti parametri:



- K_c, rigidezza elastica del controvento,
- F_{yc}, è la forza di snervamento valutato come prodotto tra F_{yb} e β>1, dato ce il controvento deve poter assorbire la forza massima trasmessa al BRAD.

Al controvento è stato posto un limite inferiore ricavato dalla condizione per cui lo snervamento del sistema dissipatore – controvento deve anticipare quella del telaio, valido per $d_{ys}<d_{yt}$:

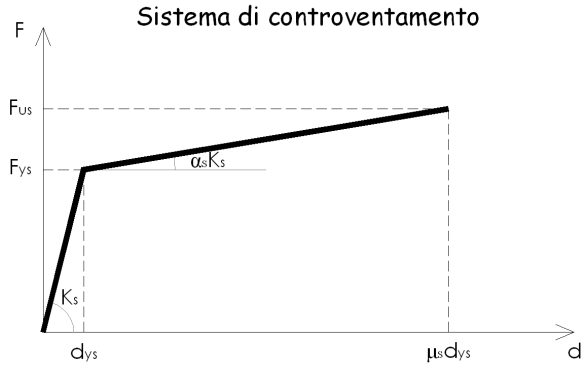
$$K_c \geq \frac{K_b}{D^* - 1}$$

Dove D* rapporto:

$$D^* = \frac{d_{yt}}{d_{yb}}$$

3.3 Sistema dissipativo (controvento + Brad)

Combinando in serie i componenti appena esposti, si valuta il modello dissipativo con i seguenti parametri:



- $K_s = K_b K_c/(K_b+K_c)$ (rigidezza elastica del sistema)
- $a_s = (K_b + K_c) / (K_c/a_b + K_b)$; (rigidezza nel tratto inelastco)
- $F_{us} = F_{ys} (1+ a_s(\mu_s-1))$; (resistenza ultima del sistema)

dove μ_s, F_{ys}, F_{us}, sono rispettivamente: duttilità, forza di snervamento, forza corrispondente al valore di duttilità del sistema pari a μs (resistenza ultima del sistema).
La duttilità μs, che può essere scelta dal progettista, tale scelta viene effettuato calcolando un valore indicativo con la seguente equazione:

$$\mu_s=1+ (\mu_b-1)/(1+ K_c/K_b)$$

La forza di snervamento del sistema è pari a quella del BRAD selezionato in fase progettuale.

4 VALUTAZIONE DEL SISTEMA COMPLESSIVO

4.1 Telaio

La curva di capacità del telaio può essere valutato indicativamente nel piano i cui si vuole fare agire il sistema dissipativo. Si valuti la curva di capacità analizzando il comportamento del singolo pilastro. Si consideri di applicare il calcolo ad un capannone con n campate, ciò comporta la presenza di n+1 pilastri.
Noti altezza dell'impalcato, sezione dei pilastri e relativa armatura, sforzo normale, si calcola il momento ultimo della sezione inferiore. La forza a cui è soggetta la mensola è data dal rapporto tra il momento ultimo e l'altezza dell'impalcato:

$$F_{yp}=M_u/l$$

La rigidezza del singolo pilastro è valutata secondo la formula:

$$K_{yp}=3EJ/l^3$$

Viene valutata lo spostamento ultimo del pilastro nel seguente modo, ricordando i diagrammi seguenti:

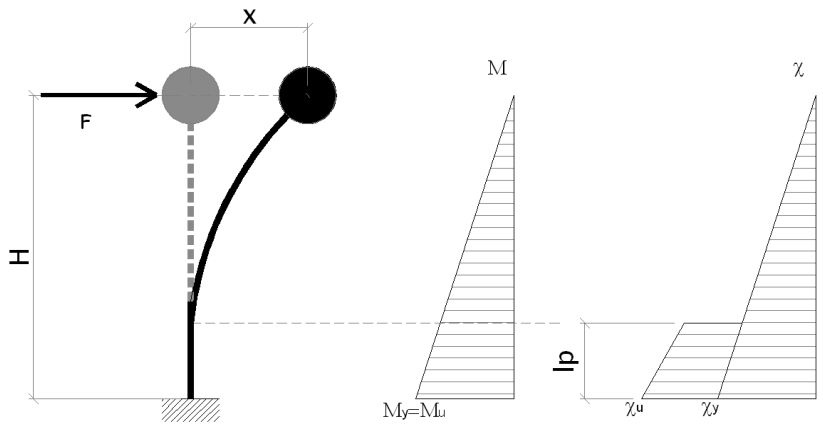


Figura 3 - Diagramma curvatura per una mensola

$$d_{up}=(\chi_u-\chi_y)l_p(l-l_p/2)+d_{yp}$$

dove compare la curvatura ultima e di snervamento (χ_u, χ_y), lunghezza di plasticizzazione (l_p) valutata secondo l'EC2 e lo spostamento elastico (d_{yp}) valutato come rapporto tra F_{yp} e K_{yp}. L'intera struttura viene valutata semplicemente moltiplicando la forza e la rigidezza per il numero di pilastri, in quanto essendo prefabbricata i collegamenti tra pilastri e orizzontamenti risultano riconducibili alla cerniera.

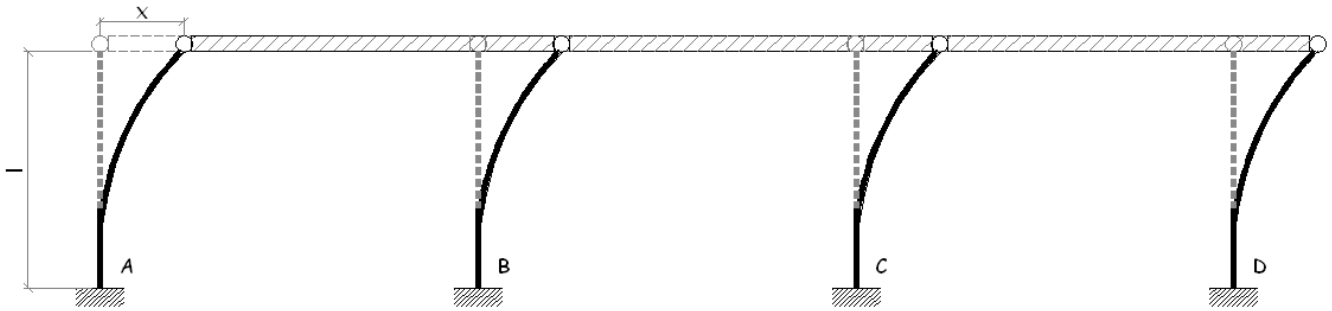


Figura 4 –Telaio

4.2 Struttura complessiva

Il sistema telaio insieme al sistema dissipativo è progettato per lavorare in parallelo con il telaio costituente la struttura esistente in c.a, vedi Figura 6:

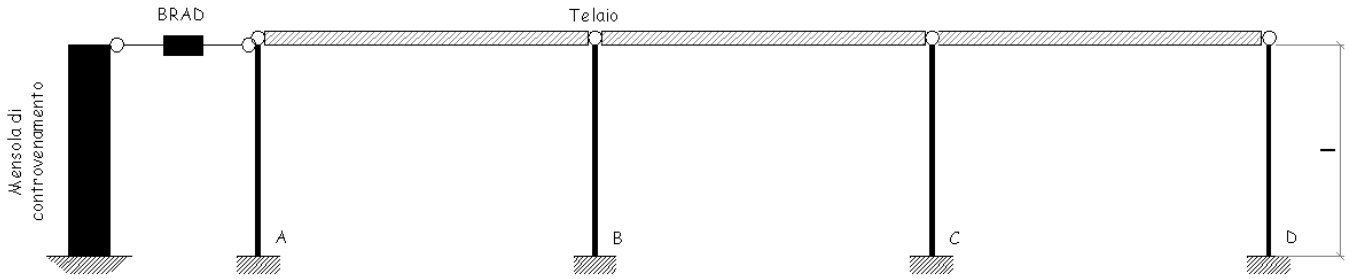


Figura 5 - Sistema complessivo

Il comportamento del telaio è assunto come elastico-perfettamente plastico e definito dai seguenti parametri: rigidezza elastica K_t, forza di snervamento F_{yt}, spostamento corrispondente $d_{yt} = F_{yt}/K_t$.
In un'ottica di ottimizzazione dei parametri caratterizzanti il sistema dissipativo e con riferimento al caso di edifici prefabbricati esistenti non progettati per azioni sismiche, si è inteso, come criterio progettuale, sfruttare sia la capacità dissipativa del dispositivo che della struttura esistente, per la quale si ammette una possibile escursione in campo plastico, ma comunque ad un valore di spostamento superiore a quello che causa lo snervamento del "sistema" dissipatore-controvento ($d_{ys} \leq d_{yt}$.).

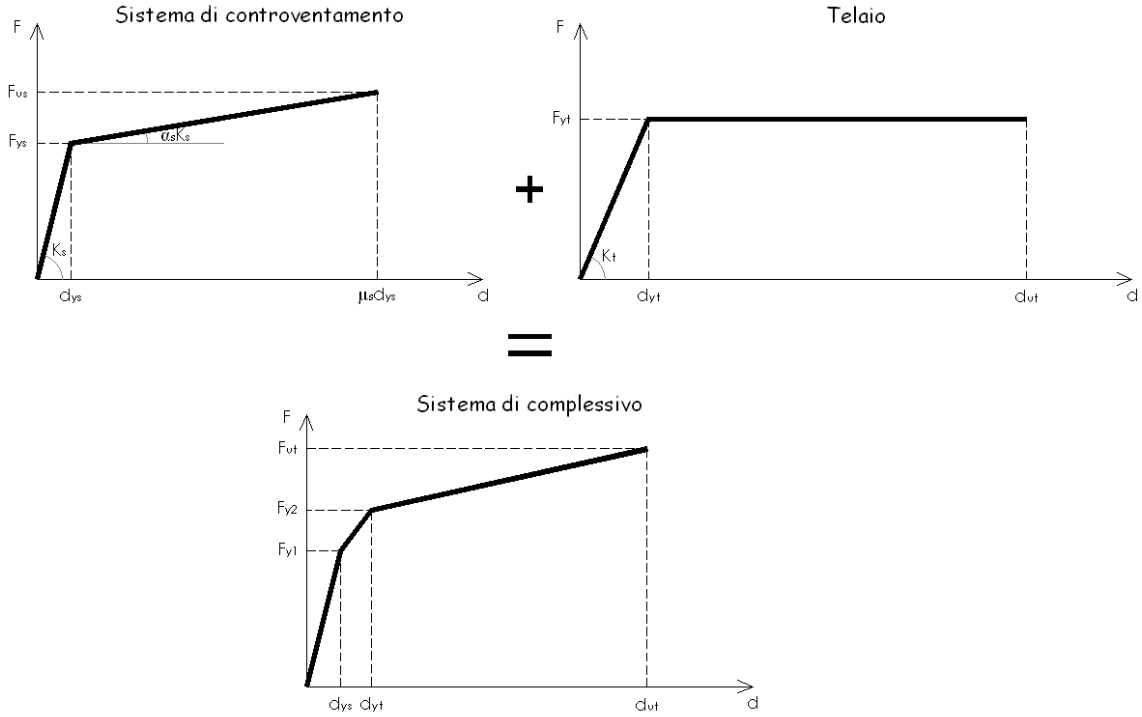


Figura 6 - Diagrammi di Capacità

Quando il sistema supera lo spostamento d_{ys}, il sistema dissipativo interverrà con il a_sK_s, quindi quel tratto ha una rigidezza pari a:

$$K_{y2} = K_t + a_s K_s$$

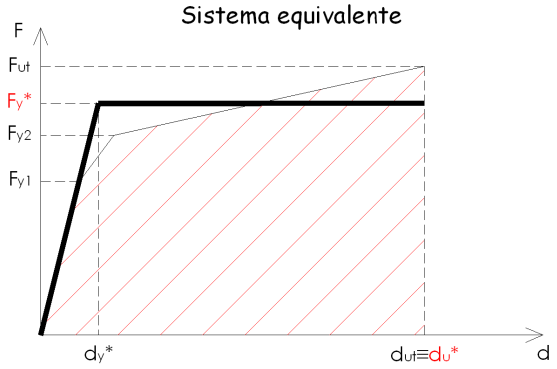
Una volta che il sistema ha superato il valore di d_{yt}, il sistema continuerà a dissipare energia: il telaio aumenta la sua deformazione ma non la sua forza e il sistema dissipativo analogamente ma per come è stato ipotizzato avrà ancora un piccolo aumento di forza dovuto da a_sK_s. Allora si avrà:

$$K_U = a_s K_s$$

La forza ultima del sistema si ottiene moltiplicando K_U per lo spostamento ultimo coincidente con quello del sistema dissipativo d_{us}.

5 DETERMINAZIONE DEL FATTORE DI STRUTTURA

Si cerchi ora di determinare il fattore di struttura del sistema complessivo.
Si ipotizzi che l'intero sistema sia governato da un modo di vibrare principale, caratterizzato da una significativa partecipazione di massa.
Il processo è effettuato è quello di valutare una curva di capacità equivalente dove si individua una forza F_y*, tale per cui l'area sottesa dalla curva di capacità calcolata nel capitolo precedente è pari a quella equivalente. Avendo già un sistema ad un grado di libertà, il passaggio dal sistema complessivo a quello equivalente non risulta oneroso.
Ipotizzando di mantenere la rigidezza del sistema equivalente (K_y*) pari a K_{y1}, si può valutare lo spostamento d_y*, come:



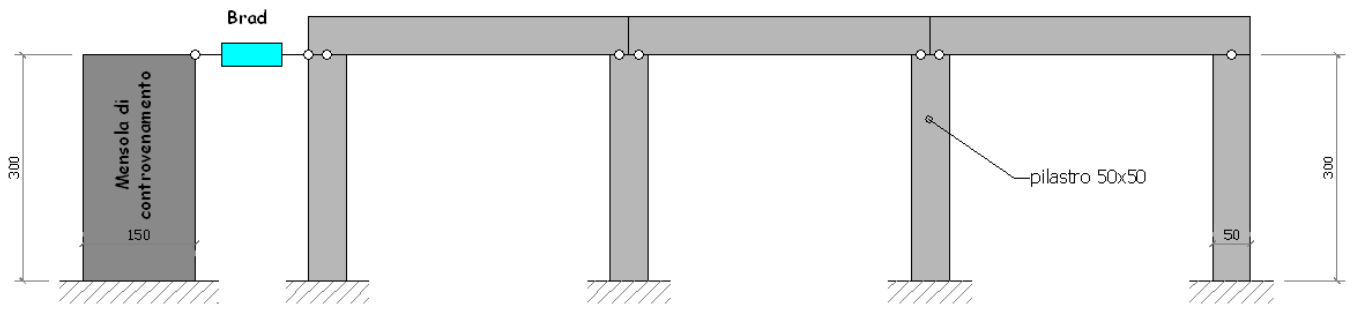
$$d_y^* = F_y^* / K_y^*$$

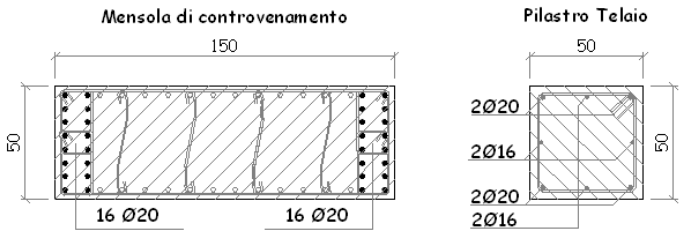
Ipotizzando di mantenere anche lo spostamento ultimo del sistema equivalente (d_u*) pari a quello del sistema complessivo si può valutare il fattore di strutta q0 uguagliandolo alla duttilità del sistema:

$$q_0 = d_u^* / d_y^*$$

6 ESEMPIO

L'edificio a cui si fa riferimento nei calcoli riportati è il seguente:





Il telaio che deve essere controventato è composta da 4 pilastri prefabbricati di sezione pari a 50x50 cm la cui armatura consiste in 4 Φ 20 di spigolo e 4 Φ 16 di lato e con una altezza pari a 300 cm.
Sia il pilastro che il telaio posseggono un Rck pari a 50 MPa.
Si riporti di seguito il calcolo dei valori per costruire la curva di capacità del telaio in esame:

SEZIONE CLS			CLS			ACCIAIO		
l =	300	cm	R_{ck} =	50	N/mmq	f_{yk} =	450	N/mmq
B =	50	cm	α_{cc} =	0,85		γ_s =	1,15	
H =	50	cm	γ_c =	1,5		E_s =	210000	N/mmq
c =	4	cm	$E_c/2$ =	17774	N/mmq	f_{yd} =	391	N/mmq
d =	46	cm	f_{cd} =	23,5	N/mmq			
A_c =	2500	cmq	AZIONI					
J	520833	cm^4	N_{ed} =	-300	kN			
n_pil	4		M_{ed} =	0	kNm			

ARMATURA								
Tesa	2	Ø 20	+ 1	Ø 16	A_s =	829	mmq
Compressa	2	Ø 20	+ 1	Ø 16	A'_s =	829	mmq

Condizione di rottura calcestruzzo			Singolo Pilastro			Telaio		
x_u/d =	0,113		M_u =	137	kNm	F_{yt} =	182,2	kN
Eq alla traslazione			F_{yp} =	45,5	kN	K_{yt} =	41,1	kN/mm
ΔN =	-0,67	kN	K_p =	10,3	kN/mm	d_{yt} =	4,43	mm
χ_u =	0,6763		d_{yp} =	4,43	mm	d_{ut} =	86,11	mm
			l_p =	43,5	cm			
			d_{up} =	86,1	mm			

In basso a destra si possono individuare le caratteristiche necessarie per poter valutare il telaio nell'intero sistema complessivo.
Si ricorda che:

l=	Altezza pilastro	M_U =	Momento ultimo	F_{yt} =	Forza di snervamento telaio
B =	Larghezza sezione	F_{yp} =	Forza di snervamento pilastro	K_{yt} =	Rigidezza Telaio

H =	Altezza sezione	K_p =	Rigidezza pilastro	d_{yt} =	Spostamento di snervamento telaio
c =	Copriferro	d_{yp} =	Spostamento di snervamento	d_{ut} =	Spostamento ultimo telaio
d =	Altezza utile	l_p =	Lunghezza di plasticizzazione		
n_pil=	N° pilastri del telaio	d_{up} =	Spostamento ultimo		
ΔN =	C+S'+S-Ned				

Ora si valuti il sistema complessivo considerando il BRAD, che ha le seguenti caratteristiche come riportato dal catalogo della ditta produttrice:

SIGLA	CICLO BILINEARE													
	F_1	K_e	d_1	F_2	d_2	$F_{C(3)}$	$F_{C(max)}$	F_y	L_{BRAD}	L'_{BRAD}	Φ_{BRAD}	A	B	P_{BRAD}
	kN	kN/mm	mm	kN	mm	kN	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm	kg
BRAD 14/40-b	119	60	1,99	129	20	140	160	96	1560	1510	168	190	230	114
BRAD 21/40-b	178	88	2,02	194	20	210	235	143	1585	1535	168	190	230	122
BRAD 27/40-b	239	123	1,95	254	20	270	280	185	1585	1535	168	190	230	124
BRAD 34/40-b	301	153	1,97	320	20	340	353	233	1625	1565	203	250	290	187
BRAD 48/40-b	417	210	1,98	449	20	480	500	339	1640	1580	203	250	290	196
BRAD 56/40-b	479	242	1,98	519	20	560	580	358	1665	1595	203	250	330	205
BRAD 72/40-b	615	307	2,00	668	20	720	745	461	1730	1640	229	260	350	274
BRAD 82/40-b	700	352	1,99	760	20	819	872	520	1735	1645	229	270	390	269
BRAD 94/40-b	800	399	2,00	868	20	936	996	594	1750	1660	245	270	390	317
BRAD 105/40-b	900	444	2,03	977	20	1053	1121	669	1770	1680	245	270	390	330
BRAD 117/40-b	1000	489	2,04	1085	20	1170	1280	737	1845	1715	245	290	390	340

F_1	Forza di snervamento (T/C) al 3° ciclo allo spostamento d_2
K_e	Rigidezza ramo elastico
d_1	Spostamento di snervamento
F_2	Forza massima media (T/C) allo spostamento d_2
d_2	Spostamento massimo di progetto
$F_{C(3)}$	Forza di compressione al 3° ciclo allo spostamento d_2
$F_{C(max)}$	Forza di compressione massima allo spostamento d_2
F_y	Forza di primo snervamento

Tenendo conto dei valori della F_1, F_2, d_1 e d_2, da cui si ricavano poi i valori successivi di K_b, a_b e μ, si consideri anche le caratteristiche della mensola di controventamento: altezza interpiano (l) pari a 300 cm, altezza di sezione (H) pari a 150 cm e una larghezza di sezione (B) pari a 50 cm. L'armatura longitudinale ipotizzata per la mensola è composta da 16 Φ 20 disposti su due linee da 8 Φ 20. Si ipotizza una Fyc=1000 kN. Si inseriscano i dati nel calcolo seguente:

BRAD		
$F_{yb}=F_1$ =	301	kN
$d_{yb}=d_1$ =	1,97	mm
$F_{ub}=F_2$ =	320	kN
$\mu d_{yb}=d_2$ =	20,00	mm
K_b =	152,8	kN/mm
$\alpha_b K_b$	1,1	kN/mm
α_b	0,0069	
μ	10	

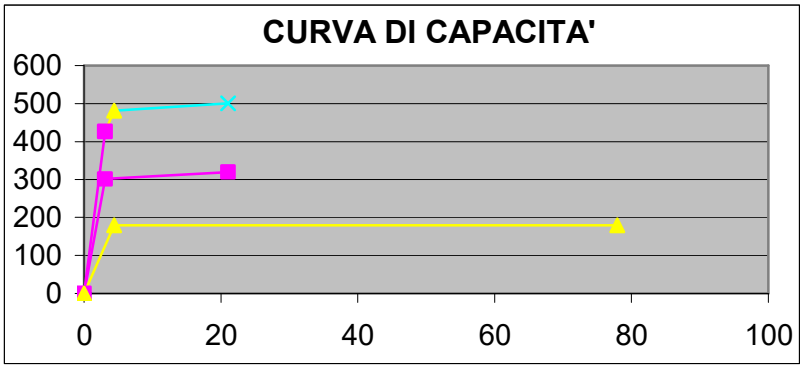
CLS		
Rck=	50	N/mmq
α_{cc} =	0,85	
γ_c =	1,5	
$E_c/2$ =	17774	N/mmq

Controvento		
l =	3	m
B =	0,5	m
H =	1,5	m
J =	0,141	m^4
K_c =	277,7	kN/mm
$K_{c,min}$ =	125,8	kN/mm
Verificato		
βF_{ub}	1000,00	kN
β	3,1	
d_{yc}	3,60	mm

Sistema dissipativo			
F_{ys} =	301	kN	
K_s =	98,6	kN/mm	
d_{ys} =	3,1	mm	
α_s =	0,011		
μ_s =	6,9		6,9
F_{us} =	319,9	kN/mm	
d_{us} =	21,07	mm	

Telaio		
F_{yt} =	179,30	kN
K_{yt} =	41,1	kN/mm
d_{yt} =	4,4	mm
Verificato		
d_{ut} =	77,9	mm

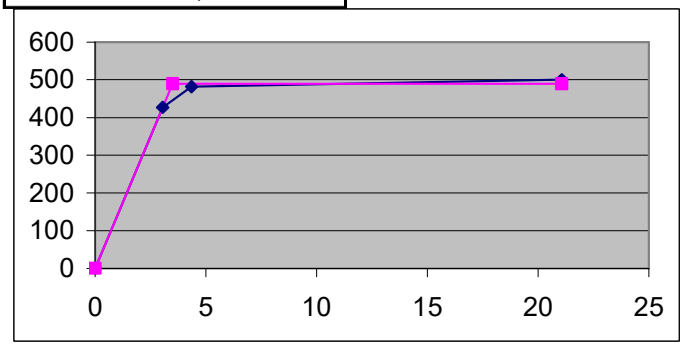
Telaio + Sist. Diss.		
K_y =	140	kN/mm
d_y =	3,1	mm
F_y =	427	kN
K_{y2} =	42	kN/mm
F_{y2} =	482	kN
d_u =	21,1	mm
K_u =	1,05	kN/mm
F_u =	501	kN



Si può osservare che il sistema dissipativo ha una rigidezza maggiore del telaio, quindi tale sistema può fornire una maggiore capacità dissipativa alla struttura. Nella curva di capacità descritta si osserva che il sistema dissipavo si plasticizza prima del telaio con una forza maggiore e quindi il sistema svolge a pieno la sua funzione.
Ora si valuti la curva di capacità bilineare secondo l'equivalenza delle aree:

Sistema Complessivo		
F_{y1} =	427	kN
d_{y1} =	3,05	mm
F_{y2} =	482	kN
d_{y2} =	4,36	mm
F_u =	501	kN
d_u =	21,07	mm

Sistema equivalente		
F^*_y =	490	kN
k* =	140	kN/mm
d^*_y =	3,5	mm
d^*_u =	21,1	mm
q_0 =	6,0	



La forza ultima del sistema equivalente risulta 483 kN e il fattore di struttura pari a 6,0. Tale valore risulta alto grazie al contributo che si ha con il sistema dissipativo.