



Guido Camata
Enrico Spacone



CERNIERE PLASTICHE

Descrizione delle cerniere plastiche sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma AEDES

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 d i 4 2

SOMMARIO

SOMMARIO	2
ELENCO DELLE FIGURE.....	3
ELENCO DELLE TABELLE	4
1. TERMINI E DEFINIZIONI	5
2. INTRODUZIONE.....	8
3. CERNIERE PLASTICHE SECONDO NORMATIVA FEMA 356	9
Parametri per la classificazione delle cerniere plastiche secondo le FEMA 356.....	12
Parametri per la scelta dei livelli di protezione sismica secondo le FEMA 356	18
4. CERNIERE PLASTICHE IMPLEMENTATE NEL PROGRAMMA AEDES	21
Premessa.....	21
Cerniere implementate e livelli di danno considerati.....	21
Definizione ed assegnazione delle cerniere plastiche.....	23
Cerniera flessionale su travi.....	25
Cerniera a taglio su travi in c.a.	28
Cerniera a pressoflessione deviata sui pilastri	30
Cerniera a taglio su pilastri in c.a.	39
Verifiche da effettuare durante gli step di Pushover	40

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 d i 4 2

ELENCO DELLE FIGURE

FIGURA 1 COMPORTAMENTO DELLA CERNIERA PLASTICA SECONDO LE FEMA 356	9
FIGURA 2 COMPORTAMENTO CERNIERA PLASTICA SECONDO LE FEMA 356	10
FIGURA 3 SCARICO ELASTICO IN UNA CERNIERA PLASTICA (NON CONSIDERATO IN AEDES)	10
FIGURA 4 GENERICA CERNIERA A FLESSIONE E PRESSOFLESSIONE	22
FIGURA 5 GENERICA COMPORTAMENTO DI UN ELEMENTO STRUTTURALE CON ROTTURA A TAGLIO	23
FIGURA 6 LEGAME COSTITUTIVO CERNIERA FLESSIONALE PER TRAVI (PER SEZIONI NON SIMMETRICHE $M_y \neq M_y^+$)	26
FIGURA 7 DIAGRAMMA DI INTERAZIONE PM_2M_3	31
FIGURA 8 DIAGRAMMA DI INTERAZIONE P-M	34
FIGURA 9 DIAGRAMMA DI INTERAZIONE M_2, M_3	35

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 4 d i 4 2

ELENCO DELLE TABELLE

TABELLA 1 TABELLA 6-7 DELLE FEMA 356 PER TRAVI IN CEMENTO ARMATO	13
TABELLA 2 TABELLA 6-8 DELLE FEMA 356 PER COLONNE IN CEMENTO ARMATO	16
TABELLA 3 DEFINIZIONE DEL PARAMETRO "A" PER TRAVI CONTROLLATE DA ROTTURA A FLESSIONE	27
TABELLA 4 DEFINIZIONE DEL PARAMETRO "A" PER PILASTRI CONTROLLATI DA ROTTURA A PRESSOFLESSIONE.....	38

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 5 d i 4 2

1. TERMINI E DEFINIZIONI

α_1, α_2	Esponenti della formula per il calcolo del dominio di interazione M2-M3 secondo il metodo di Bresler;
β	Esponente utilizzato per il calcolo del dominio di interazione M2-M3 ed espresso come: $\log(0,5) / \log(\alpha_2)$;
a, b, c	Lunghezza rami nella risposta delle cerniere plastiche secondo FEMA 356
A_g	Area lorda della sezione di calcestruzzo di un pilastro o di una trave = b h.
A'_s	Area della sezione di acciaio compresso;
A_s	Area della sezione di acciaio teso;
A_{si}	Area della i-esima area di armatura della sezione, da considerare alternativamente per le due direzioni principali;
A_{st}	Area della sezione di acciaio della staffatura resistente a taglio = Area sezione staffa per il numero di bracci;
A_{stot}	Area complessiva di armatura della sezione (in genere nei pilastri);
b	Larghezza lorda della sezione di calcestruzzo;
b_w	Larghezza dell'anima di una trave in c.a. avente sezione a "T", uguale a b per sezioni rettangolari;
δ	Coefficiente moltiplicativo della resistenza a taglio del calcestruzzo, pari all'unità se la sezione è in compressione e pari a zero se la sezione è in trazione (D.M. LL.PP. 09/01/1996);
d	Altezza utile della sezione, calcolata come distanza tra la fibra più esterna di calcestruzzo compresso ed il baricentro dell'armatura tesa (fila più esterna);
d_G	Distanza tra il lembo di calcestruzzo compresso più esterno ed il baricentro delle armature della sezione, da considerare alternativamente per le due direzioni principali: $d_G = \sum (A_{si} d_i) / A_{stot}$;
d_i	Distanza tra il lembo di calcestruzzo compresso più esterno ed il baricentro dell'i-esima area di armatura A_{si} , da considerare alternativamente per le due direzioni principali;
d'	Distanza tra la fibra più esterna di calcestruzzo compresso ed il baricentro dell'armatura compressa (fila più esterna);
E_c	Modulo di elasticità tangenziale del calcestruzzo a compressione;
ϵ_{cl}	Deformazione del calcestruzzo a compressione al termine della sua fase elastica, ovvero al termine del ramo parabolico del diagramma convenzionale parabola-rettangolo: $\epsilon_{cl} = 0,0020$;
ϵ_{cu}	Deformazione ultima a rottura del calcestruzzo a compressione: $\epsilon_{cu} = 0,0035$;
E_s	Modulo di elasticità tangenziale dell'acciaio;
ϵ_{su}	Deformazione ultima a rottura dell'acciaio: $\epsilon_{su} = 0,0100$ (in base al DM

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PH.D. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 6 d i 4 2

	1996);
ϵ_{sy}	Deformazione dell'acciaio a snervamento: $\epsilon_{sy} = f_y / E_s$;
ϵ_{yd}	Deformazione di calcolo dell'acciaio a snervamento: $\epsilon_{yd} = (f_y / F_C) / E_s$ (in base all'OPCM 3431);
FC	Fattore di confidenza della struttura (in base all'OPCM 3431);
f_c	Resistenza cilindrica di rottura del calcestruzzo a compressione (Tensione di rottura del calcestruzzo) = $0,83 R_c$;
f_{cd}	Resistenza di calcolo del calcestruzzo a compressione: $f_{cd} = f_c / FC$ per la flessione o la pressoflessione, $f_{cd} = f_c / (FC \gamma_s)$ per il taglio (in base all'OPCM 3431);
f_{ctd}	Resistenza di calcolo del calcestruzzo a trazione: $f_{ctd} = 0,70 * 0,27 R_c^{2/3} / (FC \gamma_c)$, [formula da utilizzarsi previa conversione del valore di R_c in N/mm ²] (in base all'OPCM 3431), utilizzato per il calcolo dello sforzo resistente a taglio della sezione di calcestruzzo;
f_y	Resistenza di snervamento dell'acciaio longitudinale a trazione (Tensione di snervamento dell'acciaio);
f_{yd}	Resistenza di calcolo dell'acciaio longitudinale = f_y / FC (in base all'OPCM 3431);
f_{yst}	Resistenza di snervamento dell'acciaio trasversale (staffe) a trazione (Tensione di snervamento dell'acciaio);
f_{ystd}	Resistenza di calcolo dell'acciaio trasversale (staffatura) = $f_{yst} / (FC \gamma_s)$ (in base all'OPCM 3431);
h	Altezza della sezione di calcestruzzo;
M_{bal}	Momento resistente della sezione in condizioni di rottura bilanciata con il raggiungimento simultaneo della deformazione a rottura della fibra di calcestruzzo compressa più esterna e dello snervamento dell'acciaio teso più esterno;
M_y	Momento resistente nominale della sezione a snervamento, scelto in questo documento in condizione di iniziale snervamento dell'acciaio;
θ	Rotazione totale della cerniera;
θ_{pl}	Rotazione plastica della cerniera: $\theta_{pl} = \theta - \theta_y$;
θ_y	Rotazione della cerniera in corrispondenza del termine della fase di comportamento elastico lineare (rotazione a snervamento);
P_{oc}, P_{ot}	Sforzo normale centrato ultimo della sezione, rispettivamente in condizione di sezione in compressione e di sezione in trazione;
P_{bal}	Per sezioni soggette a pressoflessione, azione assiale resistente in condizioni di rottura bilanciata con il raggiungimento simultaneo della deformazione a rottura della fibra di calcestruzzo compressa più esterna e dello snervamento dell'acciaio teso più esterno;
ρ	Rapporto geometrico dell'armatura tesa = $A_s / (b d)$;
ρ'	Rapporto geometrico dell'armatura compressa = $A'_s / (b d)$;
ρ_{bal}	Per una sezione con sola armatura tesa, rapporto geometrico di armatura ρ che porta la sezione in condizioni di rottura bilanciata a flessione semplice con raggiungimento simultaneo della deformazione a rottura

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 7 d i 4 2

del calcestruzzo compresso e dello snervamento dell'acciaio teso.

ω	Rapporto meccanico dell'armatura della sezione = $f_{yd} \sum A_{si} / (f_{cd} b h)$;
Q	Forza generica nella cerniera plastica
Q_y, Q_u	Forza di primo snervamento, e forza ultima nella cerniera plastica
R_c	Resistenza di rottura del calcestruzzo a compressione (Tensione di rottura del calcestruzzo), caratteristica (nuove costruzioni) oppure media (costruzioni esistenti);
s	Passo delle staffe verticali;
SL_CO	Stato Limite di Collasso;
SL_DL	Stato Limite di Danno Limitato;
SL_DS	Stato Limite di Danno Severo;
V_{cd}	Contributo del calcestruzzo al taglio resistente nominale di una sezione (4.2.3.2 del D.M. LL.PP. 09/01/1996)
V_R	Taglio nominale resistente della sezione di una trave
V_s	Taglio sollecitante calcolato per il generico incremento n del carico di pushover;
V_{sdu}	Taglio sollecitante massimo di calcolo della sezione (4.2.2.2.2 del D.M. LL.PP. 09/01/1996);
V_{std}	Contributo della staffatura al taglio resistente nominale di una sezione (4.2.3.2 del D.M. LL.PP 09/01/1996)
V_u	Taglio sollecitante di progetto, calcolato con la combinazione di carico definita dall'utente (notazione della FEMA 356);
x	Distanza dell'asse neutro della sezione fessurata misurata rispetto alla fibra di calcestruzzo compresso più esterna;
γ_c	Coefficiente di sicurezza del materiale valido per il calcestruzzo, pari a 1,60 (Testo Unico sulle Costruzioni, D.M. 25/09/2005);
γ_s	Coefficiente di sicurezza del materiale valido per l'acciaio, pari a 1,15 (Testo Unico sulle Costruzioni, D.M. 25/09/2005);

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 8 d i 4 2

2. INTRODUZIONE

Le analisi non lineari statiche (pushover) necessitano di modelli semplici, ma allo stesso tempo accurati, che consentano di seguire il comportamento di telai soggetti a forze laterali crescenti. La semplicità dei modelli è necessaria per assicurare tempi di calcolo ragionevoli mentre l'accuratezza è richiesta per poter ottenere una risposta che, avvicinandosi il più possibile all'effettivo comportamento della struttura, possa descrivere i meccanismi di danneggiamento e rottura più comuni, quali le rotture a flessione, pressoflessione e taglio di travi e pilastri.

In questo documento viene descritto l'approccio utilizzato per la formulazione e l'implementazione di cerniere plastiche concentrate in elementi trave e colonna, in cemento armato, per il programma di calcolo AEDES. Le cerniere plastiche considerate nel prosieguo del presente documento sono fondamentalmente quattro: cerniere a flessione e a taglio per le travi, cerniere a pressoflessione e a taglio per le colonne. Il comportamento delle cerniere a flessione e a pressoflessione si distingue da quelle a taglio per l'assenza di un ramo plastico di tipo incrudente in queste ultime. Le prime hanno infatti un comportamento duttile, nel senso che un ramo plastico incrudente segue la prima plasticizzazione (e quindi l'attivazione della cerniera plastica), corrispondente al primo snervamento dell'armatura tesa più esterna. Le seconde invece seguono invece un comportamento elasto-fragile e nel momento in cui il taglio sollecitante raggiunge il taglio resistente della cerniera plastica a taglio, si ha la formazione e la contemporanea rottura della cerniera.

Seguendo la filosofia del programma AEDES, una volta raggiunta la rotazione ultima per le cerniere a flessione e a pressoflessione, e la resistenza a taglio per le cerniere a taglio, il grado di libertà corrispondente alla rottura viene rimosso, la relativa forza viene portata a zero e l'analisi ricomincia da zero.

Per le cerniere plastiche a flessione e a pressoflessione è fondamentale definire l'andamento della risposta dopo l'attivazione della cerniera plastica. In questo documento si è scelto di seguire la filosofia (ma non tutti i dettagli) del documento FEMA (Federal Emergency Management Agency, Washington, USA) 356, che stabilisce regole semplici e chiare per la definizione del comportamento plastico delle cerniere. A seconda del livello di armatura delle sezioni e del livello di resistenza a taglio, si avrà una variazione della riserva di duttilità disponibile nella cerniera.

Infine, per poter definire il raggiungimento di diversi stati limite, in particolare stato limite di danno limitato, severo e collasso, si è seguita l'impostazione fornita dal O.P.C.M. 3431.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 9 d i 4 2

3. CERNIERE PLASTICHE SECONDO NORMATIVA FEMA 356

Definizione della curva di comportamento delle cerniere plastiche

Il comportamento di una cerniera plastica definita secondo i criteri stabiliti dal documento FEMA 356 è rappresentata da una curva carico/deformazione come quella mostrata nella Figura 1 ove in ordinata è rappresentata la forza generica ed in ascissa la corrispondente deformazione. Si tratta ovviamente di una schematizzazione dell'effettivo comportamento non lineare, ma concettualmente i rami indicati in Figura 1 corrispondono a precise fasi nella risposta non lineare di un elemento strutturale in cemento armato. Nel caso della Figura 1 la deformazione è rappresentata dalla rotazione θ del punto ove è collocata la cerniera plastica.

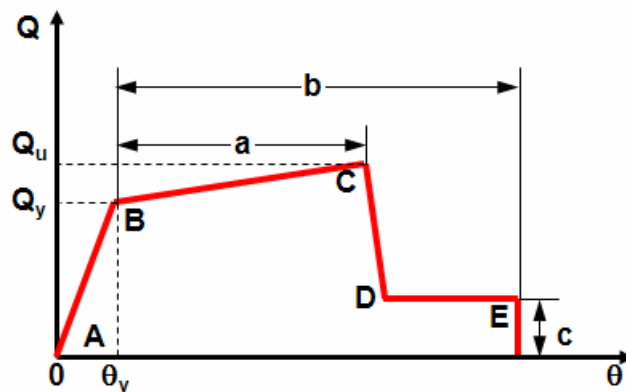


Figura 1 Comportamento della cerniera plastica secondo le FEMA 356

Il medesimo diagramma può essere rappresentato con riferimento alla rotazione plastica della cerniera $\theta_{pl} = \theta - \theta_y$, nel qual caso la curva assume il seguente aspetto.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 0 d i 4 2

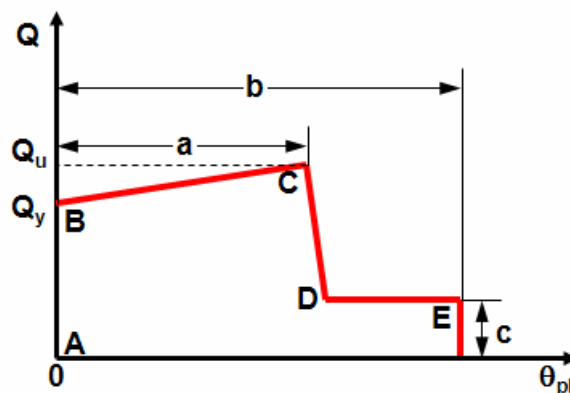


Figura 2 Comportamento cerniera plastica secondo le FEMA 356

Per definire completamente le curve di Figura 1 e Figura 2 è necessario calcolare ascissa ed ordinata dei punti A, B, C, D ed E che definiscono i vari tratti rettilinei aventi il seguente significato:

- **Tratto A-B:** Fase di comportamento elastico lineare della sezione fino al raggiungimento del carico di snervamento Q_y . In tale fase non si è ancora formata la cerniera plastica e la cerniera non è quindi attiva;
- **Tratto B-C:** Fase plastica incrudente fino al raggiungimento del carico ultimo Q_u ;
- **Tratto C-D:** Fase di degrado della resistenza della cerniera;
- **Tratto D-E:** Fase con resistenza ridotta fino alla rottura della cerniera plastica per raggiungimento della deformazione limite.

Nel caso una cerniera in fase plastica venga scaricata elasticamente, la fase di scarico segue una retta parallela alla fase elastica (tra i punti A e B) senza ulteriori deformazioni plastiche come mostrato in Figura 3.

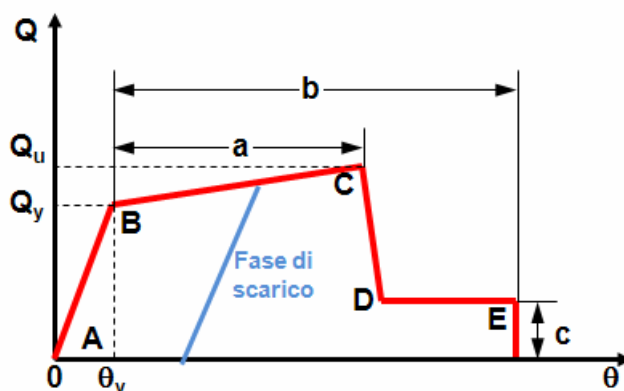


Figura 3 Scarico elastico in una cerniera plastica (non considerato in AEDES)

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 1 d i 4 2

I valori a , b e c (con il significato riportato nelle figure) sono definiti nel documento FEMA 356 in base alla tipologia di cerniera ed alla sua classificazione in funzione di vari parametri che tengono in conto, oltre che dei carichi agenti sulla sezione e della geometria (in particolare le armature longitudinali ed a taglio), anche di possibili carenze nella disposizione delle armature.

Il valore della sollecitazione a snervamento Q_y della cerniera è calcolabile una volta noti materiali e la geometria mentre la sollecitazione ultima Q_u è calcolabile a partire dal valore della Q_y utilizzando alcune relazioni fornite dalla letteratura tecnica o dalle normative:

- 1) FEMA 356: si considera una retta con pendenza compresa tra lo 0% ed il 10% di quella della fase elastica lineare (nel caso si volesse implementare tale relazione tra Q_y e Q_u , è consigliabile utilizzare un valore pari al 10% a causa di possibili problemi di convergenza della soluzione);
- 2) ATC 40: si considera una retta con pendenza compresa tra il 5% ed il 10% di quella della fase elastica lineare (nel caso si volesse implementare tale relazione tra Q_y e Q_u , è consigliabile di utilizzare un valore pari al 10% a causa di possibili problemi di convergenza della soluzione);
- 3) Department of Defense (2001) – Antiterrorism/Force Protection Construction Standards, Guidance on Structural Requirements: si considera $Q_u = 1,10 Q_y$;
- 4) General Service Administration (2003) – Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects: si considera $Q_u = 1,25 Q_y$;

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 2 d i 4 2

PARAMETRI PER LA CLASSIFICAZIONE DELLE CERNIERE PLASTICHE SECONDO LE FEMA 356

La classificazione delle cerniere plastiche definite dal documento FEMA 356 per elementi in calcestruzzo armato segue lo schema generale presentato in questa sezione. Nelle FEMA 356 vengono distinte le seguenti tipologie di cerniere:

- cerniere plastiche a flessione su travi in c.a.
- cerniere plastiche a presso-flessione su pilastri in c.a.
- cerniera plastica a taglio su nodi travi-pilastri in c.a. (qui non trattata)

Cerniera flessionale su elemento trave in c.a.

Le cerniere plastiche secondo le FEMA 356 per le travi sono determinate in base alla modalità di rottura dell'elemento. Come indicato nella Tabella 1 (tabella 6-7 delle FEMA 356), le modalità di rottura considerate sono quattro:

1. Modalità di rottura controllata dalla flessione
2. Modalità di rottura controllata dal taglio
3. Modalità di rottura controllata da una lunghezza di ancoraggio o di sovrapposizione delle armature longitudinali inadeguata
4. Modalità di rottura controllata da un ancoraggio inadeguato delle armature nel nodo

Nel caso della classificazione della cerniera plastica di cui al punto i. della Tabella 1, è ammesso calcolare i valori dei parametri di deformazione "a", "b" e "c" definiti in Figura 2 per interpolazione lineare dei valori riportati in tabella.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 3 d i 4 2

Tabella 1 Tabella 6-7 delle FEMA 356 per travi in cemento armato

Table 6-7 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams

Conditions			Modeling Parameters ³			Acceptance Criteria ³				
			Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians				
						Performance Level				
						IO	Component Type			
							Primary		Secondary	
		a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP	
i. Beams controlled by flexure ¹										
$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01
ii. Beams controlled by shear ¹										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.2	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
iii. Beams controlled by inadequate development or splicing along the span ¹										
Stirrup spacing ≤ d/2			0.0030	0.02	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.01	0.02
Stirrup spacing > d/2			0.0030	0.01	0.0	0.0015	0.0020	0.0030	0.005	0.01
iv. Beams controlled by inadequate embedment into beam-column joint ¹										
			0.015	0.03	0.2	0.01	0.01	0.015	0.02	0.03

1.

When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.

2.

"C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops (V_h) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming.

3.

Linear interpolation between values listed in the table shall be permitted.

1. Modalità di rottura controllata dalla flessione (punto i. in Tabella 1)

La scelta dei parametri "a", "b", e "c" che definiscono il legame costitutivo della cerniera plastica viene effettuata in base ai seguenti parametri:

a) Rapporto di armatura: $\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$

b) Conformità o non conformità della staffatura

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 4 d i 4 2

La conformità o meno della staffatura viene definita in base ad una semplice verifica sul passo delle staffe (vengono considerate solo staffe verticali) e ad una verifica di conformità sulle sollecitazioni di taglio agenti. E' considerata conforme una cerniera con staffe distanziate di $s \leq d/3$ nella regione della cerniera plastica, e, per le cerniere plastiche con domanda di duttilità da moderata ad alta, con resistenza a taglio delle sole staffe V_s (nella notazione di tabella) pari ad almeno il 75% del taglio sollecitante.

c) Taglio sollecitante di progetto normalizzato: $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$

V è il taglio sollecitante di progetto. In teoria, esso varia durante il sisma. Nella FEMA 356 V è il taglio corrispondente ad una combinazione di carico specificata dall'utente. V potrebbe essere per esempio il taglio corrispondente all'applicazione dei soli carichi gravitazionali. Il termine $b_w d \sqrt{f'_c}$, posto al denominatore della relazione, è proporzionale alla resistenza nominale a taglio della sola sezione di calcestruzzo, determinata in base alle indicazioni fornite dalle norme ACI 318 (secondo le quali la resistenza dovuta al solo calcestruzzo è pari a $2b_w d \sqrt{f'_c}$).

In funzione dei valori del rapporto di armatura, della conformità o meno della staffatura e del taglio sollecitante, si ottengono per interpolazione i diversi valori dei parametri "a", "b" e "c" che definiscono la curva di comportamento della cerniera plastica, unitamente ai valori dei momenti flettenti a snervamento ed ultimi calcolati in base ai dati forniti dall'utente.

2. Modalità di rottura controllata dal taglio (punto ii. in Tabella 1)

Quando la modalità di rottura della sezione è controllata dal taglio, la scelta del valore dei parametri "a", "b", e "c", che definiscono la curva di comportamento della cerniera plastica, è funzione del rapporto tra il passo delle staffe e l'altezza utile della sezione: s/d

3. Modalità di rottura controllata da una lunghezza di ancoraggio o di sovrapposizione delle armature longitudinali inadeguata (punto iii. in Tabella 1)

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 5 d i 4 2

Per rottura controllata da sfilamento delle armature, il valore dei parametri "a", "b", e "c" è funzione del rapporto tra il passo delle staffe e l'altezza utile della sezione: $\frac{s}{d}$

4. Modalità di rottura controllata da un ancoraggio inadeguato dell'armatura nel nodo (punto iv. in Tabella 1)

Tale modalità di rottura deve essere esplicitamente assegnata dall'utente ed il documento FEMA 356 non richiede ulteriori classificazioni della modalità di rottura per la definizione dei parametri "a", "b" e "c".

Cerniera a pressoflessione su elemento pilastro in c.a.

Le cerniere a pressoflessione per i pilastri secondo le FEMA 356 sono definite in base alla modalità di rottura dell'elemento. Seguendo un approccio molto simile a quello adottato per le travi e come indicato nella Tabella 2 (tabella 6-8 delle FEMA 356), le modalità di rottura considerate sono quattro:

1. Modalità di rottura controllata dalla pressoflessione deviata
2. Modalità di rottura controllata dal taglio
3. Modalità di rottura controllata da una lunghezza di ancoraggio o di sovrapposizione delle armature longitudinali inadeguata:
4. Modalità di rottura controllata da un elevato carico assiale

Nel caso della classificazione della cerniera plastica di cui al punto i. della Tabella 2, è ammesso calcolare i valori dei parametri "a", "b" e "c" relativi alle curve di comportamento della cerniera plastica e dei criteri di accettabilità per interpolazione lineare dei valori riportati in tabella.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 6 d i 4 2

Tabella 2 Tabella 6-8 delle FEMA 356 per colonne in cemento armato

Table 6-8 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Columns

Conditions			Modeling Parameters ⁴			Acceptance Criteria ⁴				
			Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians				
						Performance Level				
						IO	Component Type			
							Primary		Secondary	
		a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP	
i. Columns controlled by flexure ¹										
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Trans. Reinf. ²	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.1	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.015	0.02	0.02	0.03
≤ 0.1	C	≥ 6	0.016	0.024	0.2	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
≥ 0.4	C	≤ 3	0.015	0.025	0.2	0.003	0.012	0.015	0.018	0.025
≥ 0.4	C	≥ 6	0.012	0.02	0.2	0.003	0.01	0.012	0.013	0.02
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.006	0.015	0.2	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015
≤ 0.1	NC	≥ 6	0.005	0.012	0.2	0.005	0.004	0.005	0.008	0.012
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.003	0.01	0.2	0.002	0.002	0.003	0.006	0.01
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.002	0.008	0.2	0.002	0.002	0.002	0.005	0.008
ii. Columns controlled by shear ^{1, 3}										
All cases ⁵			—	—	—	—	—	—	.0030	.0040
iii. Columns controlled by inadequate development or splicing along the clear height ^{1,3}										
Hoop spacing ≤ d/2			0.01	0.02	0.4	0.005	0.005	0.01	0.01	0.02
Hoop spacing > d/2			0.0	0.01	0.2	0.0	0.0	0.0	0.005	0.01
iv. Columns with axial loads exceeding 0.70P _o ^{1, 3}										
Conforming hoops over the entire length			0.015	0.025	0.02	0.0	0.005	0.01	0.01	0.02
All other cases			0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

1. When more than one of the conditions i, ii, iii, and iv occurs for a given component, use the minimum appropriate numerical value from the table.
2. "C" and "NC" are abbreviations for conforming and nonconforming transverse reinforcement. A component is conforming if, within the flexural plastic hinge region, hoops are spaced at ≤ d/3, and if, for components of moderate and high ductility demand, the strength provided by the hoops (V_h) is at least three-fourths of the design shear. Otherwise, the component is considered nonconforming.
3. To qualify, columns must have transverse reinforcement consisting of hoops. Otherwise, actions shall be treated as force-controlled.
4. Linear interpolation between values listed in the table shall be permitted.
5. For columns controlled by shear, see Section 6.5.2.4.2 for acceptance criteria.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 7 d i 4 2

1. Modalità di rottura controllata dalla pressoflessione deviata

La scelta dei parametri "a", "b", e "c" per definire il legame costitutivo della cerniera viene effettuata in base ai seguenti parametri:

- a) Azione assiale sollecitante di progetto normalizzata: $\frac{P}{A_g f'_c}$

L'azione assiale sollecitante di progetto P è quella corrispondente ad una combinazione di carico specificata dall'utente in fase di definizione dei modelli generali di cerniera plastica. P viene calcolata con una semplice analisi lineare (statica o dinamica modale). Una volta calcolato P , si controlla il rapporto tra l'azione sollecitante di progetto P ed $A_g f'_c$.

Il termine $A_g f'_c = P_0$, posto al denominatore della relazione, è la resistenza nominale a compressione della sola sezione di calcestruzzo, determinata in base alle indicazioni fornite dalle norme ACI 318.

- b) Conformità o non conformità della staffatura

La conformità o meno della staffatura viene definita in base ad una semplice verifica sul passo delle staffe (vengono considerate solo staffe verticali) e ad una verifica di conformità sulle sollecitazioni di taglio agenti. E' considerata conforme una cerniera con staffe distanziate di $s \leq d/3$ nella regione della cerniera plastica, e, per le cerniere plastiche con domanda di duttilità da moderata ad alta, con resistenza a taglio delle sole staffe V_s (nella notazione di tabella) pari ad almeno il 75% del taglio sollecitante.

- c) Taglio sollecitante di progetto: $\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_c}}$

Secondo le FEMA 356 la duttilità e quindi i valori di "a", "b", e "c" sono funzione anche del taglio sollecitante.

Per quanto riguarda il calcolo del taglio sollecitante di progetto V , vale quanto detto per le travi nella sezione precedente. In generale, nel pilastro esistono due direzioni di taglio sollecitante.

In funzione dei valori dei precedenti parametri si ottengono per interpolazione dalla Tabella 2 i diversi valori dei parametri "a", "b" e "c" che definiscono la curva di comportamento della cerniera plastica.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 8 d i 4 2

2. Modalità di rottura controllata dal taglio

Se la modalità di rottura del pilastro è controllata dal taglio, la normativa FEMA 356 non definisce alcun parametro relativo alla fase plastica, ovvero si considera una rottura di tipo fragile al termine della fase lineare elastica.

3. Modalità di rottura dei pilastri controllata da una lunghezza di ancoraggio o di sovrapposizione delle armature longitudinali inadeguata

Per rottura controllata da sfilamento delle armature, la scelta del valore dei parametri "a", "b", e "c", che definiscono la curva di comportamento della cerniera plastica, è funzione del rapporto tra il passo delle staffe e l'altezza utile della sezione: s/d

4. Modalità di rottura del pilastro controllata da elevato carico assiale

Il legame costitutivo della cerniera è influenzato da un elevato carico assiale. Quando il carico assiale è maggiore del 70% della resistenza nominale ultima della sezione in condizione di sforzo assiale centrato, P_0 , i parametri di "a", "b" e "c" dipendono dalla conformità della staffatura.

PARAMETRI PER LA SCELTA DEI LIVELLI DI PROTEZIONE SISMICA SECONDO LE FEMA 356

Per valutare il livello di protezione sismica e di performance strutturale richiesto alla struttura, il documento FEMA 356 definisce i valori di rotazione plastica della cerniera (valori riferiti alla sola fase plastica e quindi depurati dal contributo dovuto alla fase lineare elastica come mostrato in Figura 2) relativi ai seguenti livelli di sicurezza della costruzione:

- 1) **IO – Agibilità Immediata (Immediate Occupancy):** lo stato di danno strutturale atteso a seguito del sisma è molto limitato. I sistemi ai quali è affidata la resistenza alle forze verticali ed orizzontali mantengono praticamente inalterate la loro rigidità e resistenza. Il rischio di pericolo per le persone, a causa di danno strutturale, è molto basso e sono ammessi solamente circoscritti interventi di riparazione che non pregiudicano l'agibilità della struttura. Tale livello di danno risulta equiparabile allo "Stato Limite di Danno Limitato" previsto dalle vigenti normative Italiane.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 1 9 d i 4 2

- 2) **LS – Protezione della vita (Life Safety):** lo stato di danno strutturale atteso a seguito del sisma è significativo ma esistono ancora margini di sicurezza rispetto allo stato di collasso, totale o parziale, della struttura. Alcuni elementi e componenti strutturali sono gravemente danneggiati e sono possibili danni alle persone anche se il rischio per la vita umana, a causa dei danni strutturali, rimane basso. Dovrebbe essere possibile riparare le strutture anche se non sempre ciò è economicamente conveniente. Non c'è rischio imminente di collasso, ma potrebbe essere necessario effettuare riparazioni od installare opere provvisorie prima di rioccupare l'edificio. Tale livello di danno risulta equiparabile allo "Stato Limite di Danno Severo" previsto dalle vigenti normative Italiane.
- 3) **CP – Stato Limite di Collasso (Collapse Prevention):** l'edificio è ai limiti del collasso con gravi danni alle strutture, tali da ridurre la rigidezza e la resistenza del sistema resistente alle forze orizzontali, l'edificio ha grandi deformazioni residue ed mostra un degrado della capacità portante verticale. I componenti strutturali di maggior importanza sono comunque in grado di sostenere i carichi verticali. Il rischio per la vita è alto e dovuto alla caduta di grosse parti di elementi strutturali. Potrebbe essere tecnicamente non conveniente riparare la struttura, che non è agibile. Tale livello di danno risulta equiparabile allo "Stato Limite di Collasso" previsto dalle vigenti normative Italiane.

Al fine di poter effettuare la scelta dei valori di rotazione limite della cerniera plastica legati ai livelli di sicurezza strutturale indicati in precedenza è necessario aver preliminarmente effettuato la classificazione della cerniera plastica in base ai criteri descritti nel paragrafo precedente per la definizione dei valori "a", "b" e "c" relativi del diagramma della cerniera e quindi definire la tipologia di elemento strutturale sul quale è inserita la cerniera plastica in base alla seguente classificazione:

- a) **Componente primario (in grado di resistere alle azioni orizzontali del sisma):** componente strutturale in grado di assorbire le azioni sismiche orizzontali anche dopo essere entrato nel campo plastico e progettato per sostenere le forze e le

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 0 d i 4 2

deformazioni indotte dalle azioni sismiche assicurando nel contempo la capacità portante dei carichi gravitazionali.

b) Componente secondario (non in grado di resistere alle azioni orizzontali del sisma):

Componente strutturale non in grado di assorbire le azioni sismiche orizzontali e progettato unicamente per sostenere le deformazioni indotte dalle azioni sismiche assicurando nel contempo la capacità portante dei carichi gravitazionali. Un esempio di tale tipologia di elementi strutturali sono le colonne progettate per sostenere i soli carichi gravitazionali.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 1 d i 4 2

4. CERNIERE PLASTICHE IMPLEMENTATE NEL PROGRAMMA AEDES

PREMESSA

Al fine di poter procedere all'assegnazione ed all'utilizzo delle cerniere plastiche, è necessario disporre dei seguenti dati di partenza:

- 1) Modello strutturale completamente definito, comprensivo di geometria, caratteristiche dei materiali, carichi e combinazioni di carico;
- 2) Assegnazione delle armature a flessione ed a taglio di travi e pilastri in c.a.

Le cerniere plastiche possono essere posizionate ad uno, all'altro od ad entrambi gli estremi dell'elemento strutturale considerato.

CERNIERE IMPLEMENTATE E LIVELLI DI DANNO CONSIDERATI

Le tipologie di cerniere implementate nel programma sono quattro:

1. Cerniera flessionale (elementi travi)
2. Cerniera a pressoflessione deviata (elementi pilastri)
3. Cerniera a taglio (elementi travi)
4. Cerniera a taglio (elementi pilastri)

Nel caso di flessione e pressoflessione, quando l'elemento è ancora in fase lineare la cerniera è considerata inattiva. Quando le sollecitazioni nel punto in cui è stata posizionata la cerniera raggiungono il limite di plasticizzazione, la cerniera si attiva e il suo legame costitutivo è determinato in funzione del parametro "a" del documento FEMA 356, come mostrato in Figura 4.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 2 d i 4 2

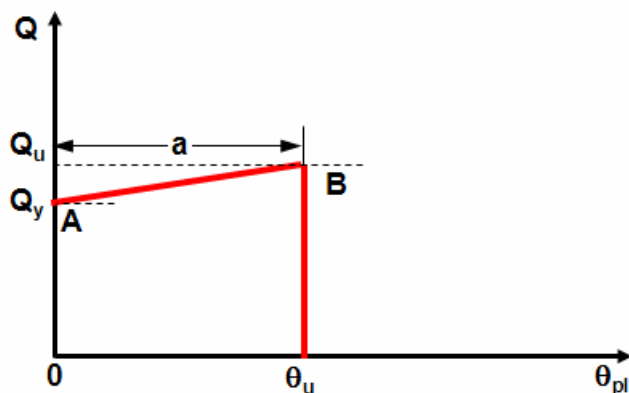


Figura 4 Generica cerniera a flessione e pressoflessione

Il valore “a” è definito in funzione della tipologia di cerniera e della sua classificazione in relazione ai vari parametri che tengono in conto, oltre che dei carichi agenti sulla sezione, della geometria e della disposizione delle armature.

La sollecitazione a snervamento Q_y in corrispondenza della quale si attiva la cerniera plastica corrisponde, nell'implementazione in AEDES, al raggiungimento della condizione di primo snervamento dell'armatura tesa.

Nel caso di cerniere a flessione per travi, il valore della sollecitazione ultima Q_u viene calcolata, in maniera approssimata, in base al valore della sollecitazione di snervamento Q_y secondo la relazione $Q_u = 1,25 Q_y$. Questo approccio è seguito nel documento “Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects” emesso dalla “General Service Administration” nell'anno 2003 per quanto riguarda le cerniere a flessione su travi.

Per cerniere a pressoflessione sui pilastri, viene invece utilizzata la relazione $Q_u = 1,10 Q_y$, contenuta nel documento “Antiterrorism/Force Protection Construction Standards, Guidance on Structural Requirements” emesso dal “Department of Defense” nell'anno 2001.

In aggiunta alle due tipologie di cerniere plastiche flessionali su travi e pilastri in c.a. è stata introdotta una tipologia di cerniera elasto-fragile a taglio sulle travi e sui pilastri avente il comportamento illustrato in Figura 5.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 3 d i 4 2

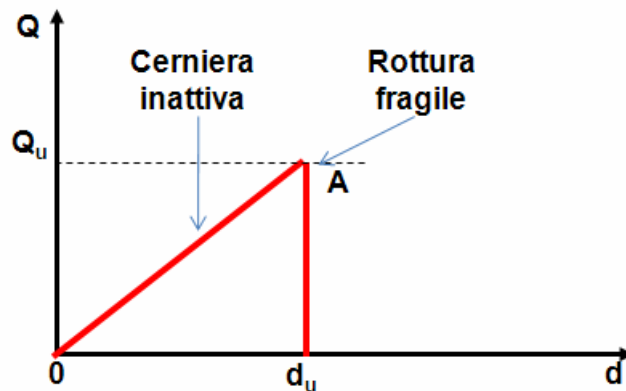


Figura 5 Generica comportamento di un elemento strutturale con rottura a taglio

La sollecitazione a rottura Q_u , in cui termina la zona con comportamento lineare elastico della sezione, corrisponde al raggiungimento della resistenza a taglio della sezione.

DEFINIZIONE ED ASSEGNAZIONE DELLE CERNIERE PLASTICHE

Affinché sia possibile generare le cerniere sugli elementi strutturali è necessario definire alcuni parametri di input:

A) Tipologia di cerniera

1) Cerniera a flessione su trave in c.a.

- *Ubicazione della cerniera*
 - Estremità 1;
 - Estremità 2;
 - Entrambe;
- *Conformità della staffatura*: conforme o non conforme;
Conforme se nella zona della cerniera plastica il passo staffe non è maggiore di \square dell'altezza utile della sezione;

2) Cerniera a pressoflessione deviata su pilastro in c.a.

- *Ubicazione della cerniera*
 - Estremità 1;
 - Estremità 2;
 - Entrambe;
- *Conformità della staffatura*: conforme o non conforme;

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 4 d i 4 2

Conforme se nella zona della cerniera plastica il passo staffe non è maggiore di \square dell'altezza utile della sezione;

3) Cerniera a taglio su trave in c.a.

- Ubicazione della cerniera

Estremità 1;

Estremità 2;

Entrambe;

4) Cerniera a taglio su pilastro in c.a.

- Ubicazione della cerniera

Estremità 1;

Estremità 2;

Entrambe;

B) Combinazione di carico utilizzata per il calcolo del taglio di progetto Vu (travi e pilastri)

Menu di scelta tra i diversi casi di carico e le diverse combinazioni di carico definite dall'utente

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PH.D. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 0 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 5 d i 4 2

CERNIERA FLESSIONALE SU TRAVI

Momento di snervamento per la cerniera flessionale su travi in c.a.

Nell'ipotesi in cui siano rispettate le ipotesi di Bernoulli di trave snella, il momento di snervamento della sezione di una trave è definito come il momento per il quale la sezione si trova nelle seguenti condizioni:

- L'armatura tesa più distante dall'asse neutro ha raggiunto il suo limite di snervamento: $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$
- il calcestruzzo al lembo compresso più distante dall'asse neutro è ancora in campo elastico:
 $\varepsilon_c < 0,002$;

Assumendo che al raggiungimento di M_y la sezione sia fessurata e il calcestruzzo compresso sia ancora in campo elastico, è possibile calcolare il momento statico ed il momento d'inerzia della sezione omogeneizzata rispetto al calcestruzzo fissando il coefficiente $n = E_s/E_c$, con $n = 15$ come indicato dalla vigente normativa italiana.

Imponendo l'equilibrio alla traslazione della sezione si ottiene un'equazione di secondo grado che fornisce la posizione dell'asse neutro, x :

$$x = \frac{n(A_s + A'_s)}{b} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{2b(A_s d + A'_s d')}{n(A_s + A'_s)^2}} \right)$$

Il momento di inerzia della sezione reagente rispetto all'asse neutro è dato da:

$$J_n = \frac{bx^3}{3} + n A'_s (x - d')^2 + n A_s (d - x)^2$$

Il momento flettente di snervamento M_y viene calcolato imponendo la condizione di snervamento delle barre in zona tesa:

$$M_y = \frac{J_n f_{yd}}{n(d - x)}$$

Legame costitutivo della cerniera plastica flessionale dopo l'attivazione

Il valore della rotazione plastica θ_{pl} è la differenza fra la rotazione totale della cerniera e la rotazione al limite di snervamento della sezione θ_y , $\theta_{pl} = \theta - \theta_y$. Il legame costitutivo di una generica cerniera a flessione attivata è mostrato in Figura 6.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 6 d i 4 2

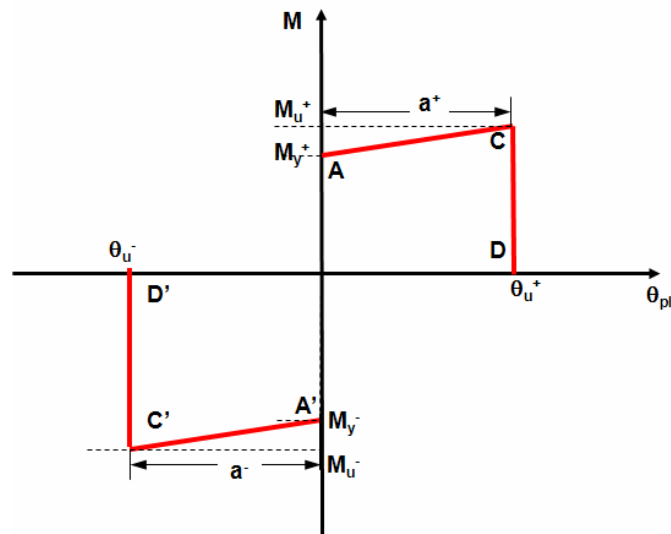


Figura 6 Legame costitutivo cerniera flessionale per travi (per sezioni non simmetriche $M_y \neq M_y^+$)

I punti del diagramma hanno il seguente significato:

Punto A:

- Momento $M = M_y^+$ (Momento positivo di snervamento);
- Rotazione plastica $\theta_{pl} = 0$ (in corrispondenza della condizione per la quale $M = M_y^+$;

Punto B:

- Momento $M = M_u^+$ (Momento positivo ultimo, $M_u^+ = 1.25 M_y^+$);
- Rotazione plastica $\theta_{pl} = \alpha^+$;

Punto D:

- Momento $M = 0$;
- Rotazione plastica $\theta_{pl} = \alpha^+$;
- Svincolo completo del grado di libertà o rimozione dell'elemento;

In generale le armature della sezione possono essere disposte non simmetricamente e di conseguenza il legame costitutivo della cerniera plastica può essere non simmetrico. E' importante quindi considerare sia le sollecitazioni positive che quelle negative. Il legame costitutivo della cerniera è analogo per le rotazioni e i momenti negativi.

In modo simile a quanto descritto nel documento FEMA 356, la scelta dei parametri della curva di definizione della cerniera a flessione viene effettuata classificando la cerniera in base ai seguenti parametri:

1. Rapporto di armatura, $\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 7 d i 4 2

ρ_{bal} è, per una sezione con sola armatura a trazione, il valore del rapporto di armatura che porta una rottura bilanciata della sezione. Questa rottura corrisponde al raggiungimento contemporaneo delle seguenti condizioni:

- L'armatura tesa più distante dall'asse neutro raggiunge il suo limite di snervamento: $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$
- il calcestruzzo al lembo compresso più distante dall'asse neutro raggiunge la sua deformazione ultima a rottura: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,0035$;

2. Conformità o non conformità della staffatura;

3. Taglio sollecitante di progetto $\frac{V_u}{b_w d \sqrt{f_{cd}}}$.

Nel programma AEDES si considerano solamente la modalità di rottura a flessione e il parametro "a", di conseguenza la Tabella 1 si semplifica secondo quanto riportato nella Tabella 3.

Tabella 3 Definizione del parametro "a" per travi controllate da rottura a flessione

$\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$	Staffe	$\frac{V_u}{b_w d \sqrt{f_{cd}}}$	a
			radianti
≤ 0	C	≤ 3	0.025
≤ 0	C	≥ 6	0.020
≥ 5	C	≤ 3	0.020
≥ 5	C	≥ 6	0.015
≤ 0	NC	≤ 3	0.020
≤ 0	NC	≥ 6	0.010
≥ 5	NC	≤ 3	0.010
≥ 5	NC	≥ 6	0.005

1. Rapporto di armatura $\frac{\rho - \rho'}{\rho_{bal}}$

Il primo parametro utilizzato per la classificazione delle cerniere plastiche è il rapporto di armatura. Nel caso tale rapporto sia compreso tra 0,0 e 0,5, il valore del

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PH.D. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 8 d i 4 2

parametro "a" non è direttamente fornito dalla Tabella 3, ma deve essere calcolato interpolando i valori tabellati.

2. Conformità (C) on non conformità (NC) della staffatura (Definita dall'Utente)

La conformità o meno della staffatura viene definita dall'utente in fase di input delle cerniere.

Ai fini della definizione della conformità della staffatura, si stabilisce il seguente criterio, derivato e semplificato dal documento FEMA 356:

Conformità geometrica: Conforme se lungo la lunghezza della cerniera plastica¹ il passo staffe non è maggiore di 1/3 dell'altezza utile della sezione. La conformità o non conformità della staffatura è un dato che l'utente deve inserire in fase di input.

3. Taglio sollecitante di progetto

Il taglio sollecitante di progetto (V_u secondo la FEMA 356) è il taglio corrispondente alla condizione di carico indicata in fase di input dall'utente. E' calcolato con un'analisi lineare (statica o dinamica modale).

Il termine $b_w d \sqrt{f_{cd}}$ è proporzionale alla resistenza nominale a taglio della sola sezione di calcestruzzo, determinata in base alle indicazioni fornite dalle norme ACI 318 ($V_c = 2b_w d \sqrt{f_{cd}}$). Poiché f_{cd} si trova sotto radice, si deve porre attenzione alle unità di misura, che sono quelle dell'ACE 318:

V_u espresso in libbre;

b_w e d espressi in pollici;

f_{cd} espresso in psi (libbre su pollici²)

Nel caso il rapporto $\frac{V_u}{b_w d \sqrt{f_{cd}}}$ sia compreso tra 3 e 6, il valore del parametro "a"

viene calcolato automaticamente dal programma interpolando i valori tabellati in Tabella 3.

CERNIERA A TAGLIO SU TRAVI IN C.A.

¹ Stime della lunghezza della cerniera plastica possono essere ricavate dalle formule fornite dall'OPCM 3431. In genere, si assume una lunghezza compresa fra $d/2$ e d .

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 2 9 d i 4 2

Come detto in precedenza, la cerniera a taglio è di tipo elasto-fragile. Questo significa che la capacità portante di un determinato elemento si annulla quando il taglio sollecitante supera il taglio resistente.

In accordo con le indicazioni contenute nel D.M. LL.PP. 09 gennaio 1996, il taglio resistente può essere calcolato come somma della resistenza a taglio del calcestruzzo e delle armature trasversali a taglio, con la limitazione che l'armatura trasversale a taglio deve essere in grado di assorbire almeno il 50% del taglio sollecitante. Qualora la sezione sia soggetta a sforzi di trazione, non deve essere considerato il contributo dovuto alla sezione di calcestruzzo.

Con le limitazioni innanzi dette il taglio resistente V_R della sezione può essere espresso con le seguenti relazioni:

- Sezione in compressione: $V_R = \min(2V_{std} ; V_{cd} + V_{std} ; 0.3f_{cd} b_w d)$
- Sezione in trazione: $V_R = V_{std}$;

dove:

V_{cd} = contributo del calcestruzzo al taglio resistente nominale di una sezione
 $V_{cd} = 0.6f_{ctd} b d \delta$

V_{std} = contributo della staffatura al taglio resistente nominale di una sezione:

$$V_{std} = \frac{A_s f_{ysd}}{s} 0.9d$$

Si deve notare che in questa trattazione non si è considerato il contributo dei ferri piegati in quanto in caso di azione sismica non si possono considerare efficaci nel contributo della resistenza a taglio.

Se V_s è il taglio sollecitante al generico passo dell'analisi di pushover, al verificarsi della condizione $V_s > V_R$ l'elemento deve essere rimosso.

Modifiche della curva del legame costitutivo della cerniera da parte dell'utente

Può essere fornita la possibilità all'utente di modificare le caratteristiche delle cerniere plastiche generate automaticamente dal programma. In particolare, sulla base del legame costitutivo della cerniera plastica, dovrebbe essere concesso all'utente modificare almeno i seguenti parametri:

- Il valore dei coefficienti di sicurezza dei materiali e del fattore di confidenza

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 0 d i 4 2

- La geometria delle armature longitudinali e trasversali (staffatura) della sezione, nonché la conformità o non conformità della stessa;
- Il valore di "a"
- I valori di rotazione plastica della cerniera associata ai criteri di accettazione dei livelli di sicurezza corrispondenti agli stati limite di Danno Limitato, Danno Severo e Collasso generati dal programma in base alle relazioni fornite dal O.P.C.M. 3431;
- Il valore della sollecitazione di snervamento, ad esempio il momento flettente o la forza di taglio per le cerniere plastiche sulle travi;
- Il rapporto tra il valore dell'azione ultima e quella di snervamento Q_u/Q_y oppure consentire di inserire direttamente il valore dell'azione ultima.

CERNIERA A PRESSOFLESSIONE DEVIATA SUI PILASTRI

Definizione della superficie di snervamento per la cerniera plastica a pressoflessione deviata su pilastri in c.a.

La superficie di snervamento per la cerniera plastica a pressoflessione deviata sui pilastri è funzione dell'interazione tra lo sforzo normale P ed i due momenti flettenti M2 e M3 lungo le due direzioni principali come indicato in Figura 7 e viene calcolata dal programma per ogni fase di carico durante il pushover fino ad avvenuta attivazione della cerniera plastica.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 1 d i 4 2

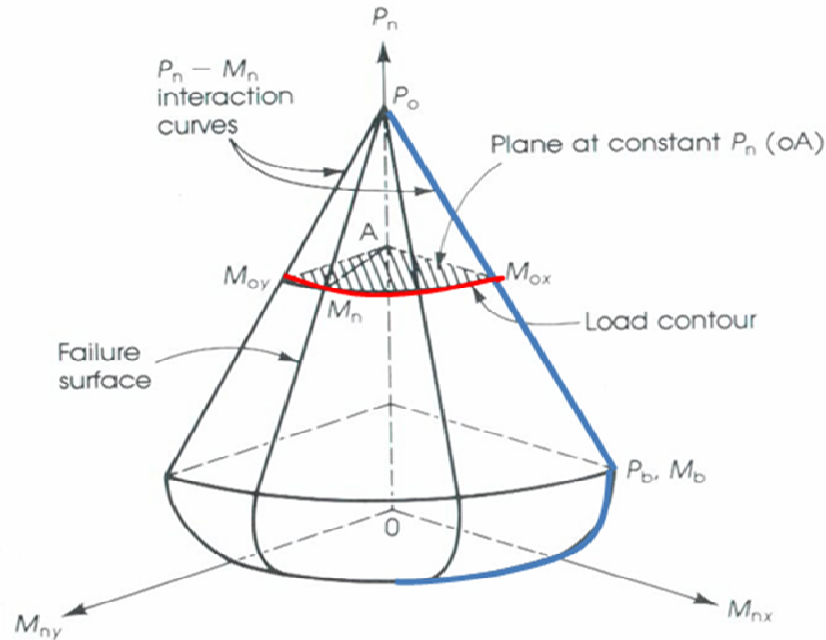


Figura 7 Diagramma di interazione PM_2M_3

Il calcolo della superficie di snervamento e la verifica dell'attivazione della cerniera plastica viene eseguita in quattro fasi:

- *Calcolo delle azioni resistenti invarianti durante le analisi.* Durante questa fase, il programma calcola alcune delle azioni caratteristiche della sezione che sono invarianti rispetto allo stato di sollecitazione della sezione. Negli spazi di flessione semplice, $P-M_2$ e $P-M_3$, vengono calcolati i momenti di flessione pura a snervamento, momenti ed azioni assiali in condizione di rottura bilanciata della sezione e sforzi normali ultimi.
- *Calcolo dei diagrammi di interazione $P-M_2$ e $P-M_3$ a primo snervamento.* Durante questa fase il programma calcola i due diagrammi di interazione tra lo sforzo normale ed ognuno dei momenti flettenti nelle due direzioni principali della sezione. I diagrammi di interazione $P-M$ vengono calcolati interpolando i valori delle azioni caratteristiche della sezione mediante linee rette e successivamente utilizzati per calcolare i valori dei momenti a snervamento M_{y0} e M_{x0} della sezione per un dato valore dell'azione assiale sollecitante P_s .
- *Calcolo del diagramma di interazione M_2-M_3 e verifica dell'attivazione della cerniera plastica.* Durante questa fase il programma calcola in forma

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 2 d i 4 2

approssimata, secondo il metodo di Bresler, il diagramma di interazione tra i due momenti flettenti M_2 ed M_3 nelle direzioni principali e verifica se la coppia di momenti sollecitanti M_{2s} ed M_{3s} calcolati per un carico assiale sollecitante P_s , sia esterna o meno al diagramma di interazione. Quando, in uno dei passi dell'analisi di pushover, si verifica che la coppia di momenti sollecitanti è esterna al diagramma di interazione, il programma salva la terna delle azioni sollecitanti P_s , M_{2s} ed M_{3s} ed attiva la cerniera plastica a pressoflessione calcolandone le caratteristiche. E' importante che i passi di carico del pushover siano sufficientemente piccoli. Da questo passo in poi si assume costante il valore dello sforzo assiale sollecitante.

- *Cerniera plastica a pressoflessione attiva.* Durante questa fase, il programma calcola le caratteristiche della curva della cerniera plastica a pressoflessione secondo modalità simili a quelle presentate nel documento FEMA 356.

Calcolo delle azioni invarianti

Momenti a flessione pura a snervamento per la cerniera plastica a pressoflessione su pilastri in c.a.

Il momento a flessione pura a snervamento della sezione di un pilastro viene definito in accordo con le ipotesi seguenti:

- L'armatura tesa più distante dall'asse neutro ha raggiunto il suo limite di snervamento: $\epsilon_s = \epsilon_{yd}$
- il calcestruzzo al lembo compresso più distante dall'asse neutro è ancora in campo elastico: $\epsilon < 0,02$;
- La sezione è soggetta a flessione pura nelle due direzioni principali.

Procedendo separatamente per i momenti flettenti nelle due direzioni principali, la posizione dell'asse neutro viene calcolata imponendo l'equilibrio alla traslazione della sezione, ottenendo così un'equazione di secondo grado che fornisce la posizione dell'asse neutro, x :

$$x = \frac{n A_{stot}}{b} \left(\sqrt{1 + 2 \frac{b d_G}{n A_{stot}}} - 1 \right) \quad \text{ove} \quad d_G = \frac{\sum_i A_{si} d_i}{A_{stot}}$$

b e d_G sono riferiti all'asse della sezione per il quale si sta calcolando il momento a snervamento.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PH.D. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 3 d i 4 2

Il momento d'inerzia della sezione reagente rispetto all'asse neutro è quindi dato da:

$$J_n = \frac{b x^3}{3} + n \sum_i A_{si} (x - d_i)^2$$

Il momento flettente di snervamento M_y viene calcolato imponendo la condizione di snervamento delle barre in zona tesa:

$$M_y = \frac{J_n f_{yd}}{n (d - x)}$$

Momenti ed azioni assiali in condizioni di rottura bilanciata per la cerniera pressoflessionale su pilastri in c.a.

Il momento flettente e lo sforzo normale in condizione di rottura bilanciata della sezione vengono calcolati imponendo il seguente diagramma lineare delle deformazioni di sezione

- L'armatura tesa più distante dall'asse neutro ha raggiunto il suo limite di snervamento: $\varepsilon_s = \varepsilon_{yd}$;
- il calcestruzzo al lembo compresso più distante dall'asse neutro ha raggiunto la sua deformazione ultima a rottura: $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0,0035$;

La procedura viene ripetuta per ognuna delle due direzioni principali della sezione.

In tali condizioni, la posizione dell'asse neutro è immediatamente calcolabile nell'ipotesi di sezione piana mediante la relazione: $x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_s} d = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + f_{yd}/E_s} d$.

Per ognuna delle aree di armatura A_{si} della sezione, detta d_i la distanza dell'armatura dal lembo di calcestruzzo compresso più distante dall'asse neutro, la deformazione a cui essa è soggetta può essere calcolata con la seguente relazione: $\varepsilon_{si} = \frac{\varepsilon_{cu}(x - d_i)}{x}$

Imponendo l'equilibrio alla traslazione della sezione si determina il valore dello sforzo normale in condizione di rottura bilanciata e imponendo l'equilibrio alla rotazione attorno al baricentro della sezione si ricava il momento bilanciato.

Sforzi normali centrati ultimi per la cerniera pressoflessionale su pilastri in c.a.

Gli sforzi normali centrati ultimi agenti sulla sezione vengono calcolati considerando il massimo sforzo che può essere sopportato dalla sezione in condizione di sforzo normale centrato.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PH.D. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 4 d i 4 2

Lo sforzo normale ultimo viene calcolato come $P_{0c} = 0,85 f_{cd} [(b \times h) - \sum A_{si}] + f_{yd} \times \sum A_{si}$ mentre per la sezione in condizione di trazione viene considerato il solo contributo delle armature longitudinali secondo la relazione: $P_{0t} = - f_{yd} \times \sum A_{si}$, considerando positivo lo sforzo di compressione.

Diagramma di interazione P-M

Il diagramma di interazione tra sforzo normale e momento flettente viene calcolato separatamente nelle due direzioni principali utilizzando una formulazione approssimata che, a vantaggio della sicurezza, considera il dominio di snervamento delimitato da tratti rettilinei che congiungono alcuni punti caratteristici della curva di interazione.

Vengono in particolare utilizzati i punti seguenti:

- sforzi normali ultimi a compressione ed a trazione P_{0c} e P_{0t} ,
- rottura bilanciata della sezione (P_{bal}^+ , M_{bal}^+) e (P_{bal}^- , M_{bal}^-) (calcolati considerando rispettivamente una condizione di momento flettente positivo e negativo)
- momenti a snervamento della sezione in condizione di flessione pura M_{y^+} e M_{y^-} (calcolati considerando rispettivamente una condizione di momento flettente positivo e negativo).

Il diagramma di interazione assume l'aspetto indicato nel Figura 8.

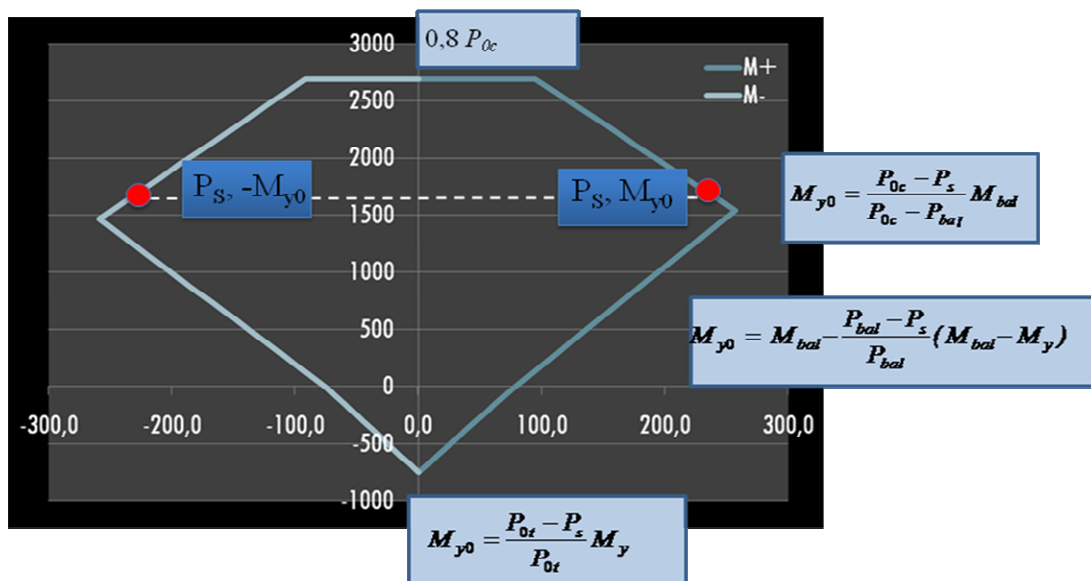


Figura 8 Diagramma di interazione P-M

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 5 d i 4 2

Si deve notare che lo sforzo normale è limitato all'80% dello sforzo normale centrato ultimo.

Una volta determinati i diagrammi di interazione P-M per le due direzioni principali, questi vengono utilizzati per determinare i valori dei momenti a snervamento della sezione in corrispondenza di uno sforzo normale sollecitante P_s .

Diagramma di interazione M_2 - M_3

Il diagramma di interazione tra i momenti flettenti nelle due direzioni principali viene calcolato in forma chiusa mediante una formula approssimata derivata dal criterio di resistenza di Bresler, genericamente espressa dalla relazione:

$$\left(\frac{M_{2y}}{M_{2y0}} \right)^{\alpha_1} + \left(\frac{M_{3y}}{M_{3y0}} \right)^{\alpha_2} = 1$$

dove M_{2y} ed M_{3y} sono le coppie di momenti che danno il primo snervamento (associati ad uno sforzo normale P_s) mentre M_{2y0} ed M_{3y0} sono i momenti a snervamento della sezione nelle due direzioni principali, calcolate mediante i diagrammi di interazione sforzo normale - momento P- M_2 e P- M_3 per un valore dello sforzo normale pari a P_s . Figura 9 indica il diagramma di interazione M_2 , M_3 .

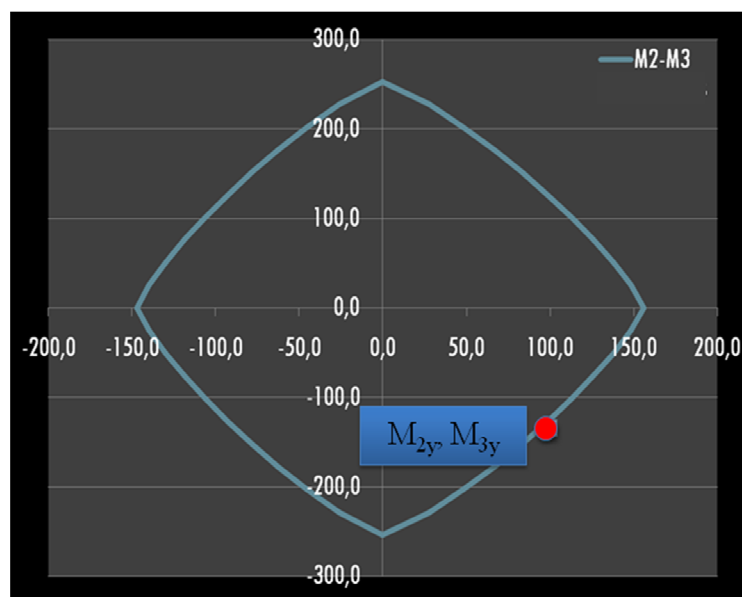


Figura 9 Diagramma di interazione M_2 , M_3

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PH.D. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 6 d i 4 2

Nella presente trattazione gli esponenti α_1 ed α_2 sono stati considerati identici e calcolati mediante la relazione $\alpha_2 = \log(0,5) / \log(\beta)$ ove β risulta funzione dello sforzo normale, della percentuale di armatura della sezione e dalle caratteristiche meccaniche dei materiali.

Definita la percentuale meccanica delle armature della sezione come:

$$\omega = \frac{A_{s\text{tot}} f_{yd}}{b h f_{cd}} = \frac{\sum_i A_{si} f_{yd}}{b h f_{cd}}$$

e lo sforzo assiale normalizzato come:

$$v = \frac{P_s}{0,85 b h f_{cd}},$$

il valore dell'esponente β viene calcolato mediante la seguente relazione:

$$\beta(v, \omega) = \max \left(0,5 + \frac{0,5}{1 + \omega} |v - 0,4|; 0,5 + 0,05(1,4 - \omega) \right).$$

Si ricava quindi l'esponente utilizzato nella formula di Bresler:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\log(0,5)}{\log(\beta)}.$$

Quando si verifica per la prima volta la condizione:

$$\left(\frac{M_{2s}}{M_{2y0}} \right)^{\alpha_2} + \left(\frac{M_{3s}}{M_{3y0}} \right)^{\alpha_2} \geq 1$$

la sezione ha superato la condizione di primo snervamento e si attiva quindi la cerniera plastica a pressoflessione.

I valori delle azioni sollecitanti P_s , M_{2s} ed M_{3s} corrispondenti allo stato di snervamento a pressoflessione della sezione vengono salvati come P , M_{2yu} ed M_{3yu} ed il programma procede a calcolare il valore del parametro "a" che determina il comportamento della cerniera plastica secondo il modello descritto nel documento FEMA 356.

Legame costitutivo della cerniera flessionale attiva

Una volta attivata la cerniera plastica a pressoflessione, si procede al calcolo delle caratteristiche dei legami costitutivi della cerniera plastica nelle due direzioni principali come indicato in Figura 6 per il momento flettente M_2 .

Nel caso delle cerniere plastiche a pressoflessione sui pilastri, la curva della cerniera plastica si sviluppa integralmente in uno solo dei quadranti in quanto la sua attivazione è

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 7 d i 4 2

avvenuta durante la fase di pushover ed i valori dei momenti a snervamento sono stati calcolati tramite i diagrammi di interazione P-M ed M-M.

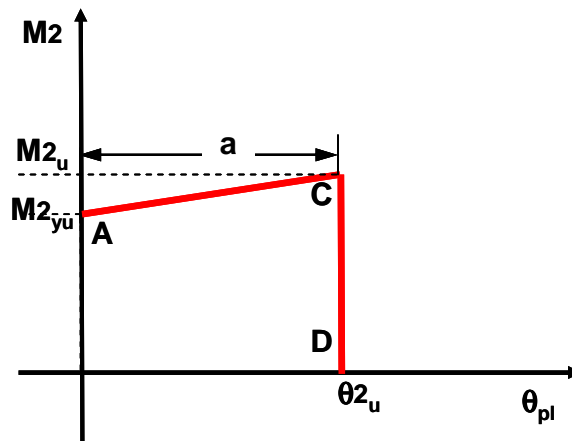


Figura 7 Legame costitutivo cerniera pressoflessionale per pilastri (per uno dei momenti)

I punti del diagramma hanno il seguente significato:

Punto A:

- Momento $M_2 = M_{2yu}$ (Momento di snervamento);
- Rotazione della cerniera plastica $\theta_{pl} = 0$ (in corrispondenza della condizione per la quale $M_2 = M_{2yu}$;

Punto B:

- Momento $M_2 = M_{2u}$ (Momento ultimo, $M_{2u} = 1,10 M_{2yu}$);
- Rotazione della cerniera plastica $\theta_{pl} = a$;

Punto D:

- Momento $M_2 = 0$;
- Rotazione della cerniera plastica $\theta_{pl} = a$;
- Svincolo completo del grado di libertà o rimozione dell'elemento;

In modo simile alle FEMA 356, la scelta dei parametri della curva di definizione della cerniera a pressoflessione viene effettuata classificando la cerniera in base ai seguenti parametri:

1. Azione assiale sollecitante, Rapporto di armatura, $\frac{P}{A_g f_{cd}}$;
2. Conformità o non conformità della staffatura;

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 8 d i 4 2

3. Taglio sollecitante di progetto $\frac{V_u}{b_w d \sqrt{f_{cd}}}$.

Nel programma AEDES si considerano solamente la modalità di rottura a flessione e il parametro "a", di conseguenza la tabella 6.8 delle FEMA 356 si semplifica come indicato in

Tabella 4.

Tabella 4 Definizione del parametro "a" per pilastri controllati da rottura a pressoflessione

$\frac{P}{A_g f_{cd}}$	Staffe	$\frac{V_u}{b_w d \sqrt{f_{cd}}}$	a
radianti			
$\leq 0,1$	C	≤ 3	0,020
$\leq 0,1$	C	≥ 6	0,016
$\geq 0,4$	C	≤ 3	0,015
$\geq 0,4$	C	≥ 6	0,012
$\leq 0,1$	NC	≤ 3	0,006
$\leq 0,1$	NC	≥ 6	0,005
$\geq 0,4$	NC	≤ 3	0,003
$\geq 0,4$	NC	≥ 6	0,002

1. Azione assiale sollecitante

Il primo parametro utilizzato per la classificazione delle cerniere plastiche è il rapporto tra lo sforzo assiale sollecitante P ed un fattore legato alla resistenza nominale a compressione della sezione di calcestruzzo. Nel caso tale rapporto sia compreso tra 0,1 e 0,4, il valore del parametro "a" non è direttamente fornito dalla Tabella 4, ma deve essere calcolato interpolando i valori tabellati.

Il carico P, nell'implementazione in AEDES, corrisponde al carico assiale dell'elemento al momento dell'attivazione della cerniera plastica, mentre il termine posto al denominatore della relazione $A_g f_{cd}$ è proporzionale alla resistenza nominale a compressione della sola sezione di calcestruzzo, determinata in base alle indicazioni fornite dalle norme ACI 318.

2. Conformità (C) o non conformità (NC) della staffatura (Definita dall'Utente)

La conformità o meno della staffatura viene definita dall'utente in fase di input delle cerniere.

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 3 9 d i 4 2

Ai fini della definizione della conformità della staffatura, si stabilisce il seguente criterio semplificato, derivato dal documento FEMA 356:

Conformità geometrica: Conforme se nel di lunghezza plastica il passo staffe non è maggiore di 1/3 dell'altezza utile della sezione;

L'utente dovrebbe comunque avere la facoltà di decidere se le staffe sono conformi o non conformi.

3. Taglio sollecitante di progetto

Il taglio sollecitante di progetto V_u corrisponde ad una condizione di carico (per esempio solo carichi gravitazionali) specificata dall'utente. V_u viene calcolato da un'analisi lineare (statica o dinamica modale). Il termine $b_w d \sqrt{f_{cd}}$ è proporzionale alla resistenza nominale a taglio della sola sezione di calcestruzzo, determinata in base alle indicazioni fornite dalle norme ACI 318. Poiché f_{cd} si trova sotto radice, le unità di misura devono essere le seguenti:

V_u espresso in libbre;

b_w e d espressi in pollici;

f_{cd} espresso in psi (libbre su pollici²)

Nel caso il rapporto $\frac{V_u}{b_w d \sqrt{f_{cd}}}$ sia compreso tra 3 e 6, il valore del parametro deve essere calcolato interpolando i valori tabellati in

Tabella 4.

CERNIERA A TAGLIO SU PILASTRI IN C.A.

Come per le travi, la cerniera a taglio è di tipo elasto-fragile. Questo significa che la capacità portante di un determinato elemento si annulla quando il taglio sollecitante supera il taglio resistente.

Il taglio resistente viene calcolato in accordo con il D.M. LL.PP. 09 gennaio 1996 come indicato per le travi. E' importante notare che, nel caso dei pilastri, sono stati considerati due assi di sollecitazione e due tagli resistenti. Al raggiungimento del primo taglio resistente, l'elemento viene rimosso.

Modifiche della curva del legame costitutivo della cerniera da parte dell'utente

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT Descrizione cerniere 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 4 0 d i 4 2

Può essere fornita all'utente la possibilità di modificare le caratteristiche delle cerniere plastiche generate automaticamente dal programma. In particolare, sulla base del legame costitutivo della cerniera, dovrebbe essere concesso all'utente modificare almeno i seguenti parametri:

- Il valore dei coefficienti di sicurezza dei materiali e del fattore di confidenza;
- La geometria delle armature longitudinali e trasversali (staffatura) della sezione, nonché la conformità o non conformità della stessa;
- Il valore di "a"
- I valori di rotazione plastica della cerniera associata ai criteri di accettazione dei livelli di sicurezza corrispondenti agli stati limite di Danno Limitato, Danno Severo e Collasso generati dal programma in base alle relazioni fornite dal O.P.C.M. 3431;
- Il valore dell'azione di snervamento, ad esempio il momento o la forza di taglio per cerniere su travi od i valori del taglio nelle due direzioni principali per cerniere su pilastri;
- Il rapporto tra il valore dell'azione ultima e quella di snervamento Q_u/Q_y oppure consentire di inserire direttamente il valore dell'azione ultima.

VERIFICHE DA EFFETTUARE DURANTE GLI STEP DI PUSHOVER

Verifiche relative alla formazione e rottura delle cerniere plastiche

Durante i vari passi incrementali di pushover si devono effettuare i seguenti controlli in corrispondenza dei punti nei quali l'utente ha posizionato le potenziali cerniere plastiche:

- 1) Controllo di attivazione della cerniera flessionale (per travi).** Controllo del momento sollecitante M_s al fine di verificare la formazione della cerniera plastica a flessione. Si verifica se l'azione sollecitante M_s supera il momento di snervamento della sezione M_y ;
- 2) Controllo di attivazione della cerniera a pressoflessione (per pilastri).** Controllo dell'azione sollecitante (M_{2s} , M_{3s} , P_s) al fine di verificare se la cerniera a plastica a pressoflessione si sta attivando. Si verifica se l'azione sollecitante (M_{2s} , M_{3s} , P_s) esce dalla superficie di snervamento;

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PH.D. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 4 1 d i 4 2

3) Controllo dopo l'attivazione della cerniera flessionale (per travi). Il controllo serve sia a determinare l'eventuale superamento dei valori limite di stati limite (SLD, SLDS, SLCO) che a definire il legame costitutivo della fase plastica incrudente della cerniera secondo le relazioni qui indicate:

$$E_{pl} = 0,25 M_y / \alpha;$$

$$M_{Cerniera} = M_y + M_{pl} = M_y + \theta_{pl} E_{pl}$$

Raggiunto lo stato limite di collasso il grado di libertà della cerniera in esame viene rimosso e l'analisi ricomincia da capo (in accordo con la filosofia del programma AEDES)

4) Controllo dopo l'attivazione della cerniera pressoflessione (per pilastri). Il controllo serve sia a determinare l'eventuale superamento dei valori limite di stati limite (SLD, SLDS, SLCO) che a definire il legame costitutivo della fase plastico incrudente della cerniera secondo le seguenti relazioni, che vengono applicate nelle due direzioni principali della sezione (2 e 3):

$$E_{pl} = 0,10 M_{yu} / \alpha;$$

$$M_{Cerniera} = M_{yu} + M_{pl} = M_{yu} + \theta_{pl} E_{pl}$$

Raggiunto lo stato limite di collasso i gradi di libertà flessionali della cerniera in esame vengono rimossi e l'analisi ricomincia da capo (in accordo con la filosofia del programma AEDES).

5) Controllo della cerniera a taglio. Controllo del taglio sollecitante V_s agente sulla cerniera per verificare che esso non superi il taglio resistente V_R , corrispondente al massimo taglio reagente nominale della sezione (con le eventuali modifiche apportate dall'utente). Nel caso si verifichi la condizione $V_s \geq V_R$, l'elemento viene rimosso e l'analisi ricomincia da capo (in accordo con la filosofia del programma AEDES). Da notare che nel caso dei pilastri gli assi di sollecitazione e le rispettive azioni resistenti sono due.

Verifiche prestazionali delle cerniere plastiche a flessione e pressoflessione

Per valutare il livello di protezione sismica e di performance strutturale richiesto alla struttura, l'O.P.C.M 3431 definisce, per i meccanismi duttili quali la flessione, i valori di rotazione plastica relativi ai seguenti livelli di sicurezza della costruzione:

1) Stato Limite di Danno Limitato (SL_DL): Limite = 0 (nessuna fase plastica)

PROF. ING. ENRICO SPACONE Via Sandro Pertini 29, 65129 Pescara Tel. 085/45.37.276 ING. PHD. GUIDO CAMATA Via Riccitelli 19, 65129 Pescara Tel. 085/45.10.942	CERNIERE PLASTICHE sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo AEDES				
	CLIENTE CLIENT A e d e s 2 0 0 0				
DOCUMENTO PROJECT DOCUMENT D e s c r i z i o n e c e r n i e r e 3 / 9 0 7	EMESSO DA ISSUED BY GC	CREATO CREATED 9 / 1 0 / 0 7	MODIFICATO MODIFIED 6 / 1 1 / 0 7	REVISIONE NUM. REVISION NUM. 7	PAGINA PAGE 4 2 d i 4 2

2) Stato Limite di Danno Severo (SL_DS): Limite = $\frac{3}{4}$ di Stato Limite di Collasso = $\frac{3}{4} \alpha$;

3) Stato Limite di Collasso (SL_CO): Limite = α ;

Nelle cerniere a taglio non è necessario definire tali livelli prestazionali, perché essendo fragili passano direttamente dalla fase elastica alla rottura.