



AGENZIA DEL DEMANIO

DIREZIONE REGIONALE LIGURIA



OGGETTO:

RILIEVO GEOMETRICO, ARCHITETTONICO E STRUTTURALE COMPATIBILE BIM,
VERIFICA DELLE VULNERABILITÀ SISMICA COMPRENSIVA DI INDAGINI STRUTTURALI
NONCHÉ INDAGINI AMBIENTALI PER FIBRE CONTENENTI AMIANTO
DEL COMPENDIO IMMOBILIARE DENOMINATO "EX CASERMA MAR. DI. CHI." - COMUNE DI LA SPEZIA (SP)

IL PROGETTISTA

Ing. Tommaso Mariacci



DIRETTORE TECNICO

Ing. Giuseppe Caruso



PROGETTAZIONE

AZ SRL
SOCIETÀ DI
INGEGNERIA

AZ S.r.l. Consulting & Commercial Engineering

Sede Legale: Galleria delle Porte Contarine 4, 35137 Padova

Sede Operativa: via Zucchini 61, 44122 Ferrara

C.F. e Partita IVA 03243310285

Tel/Fax 0532 769188

info@azec.it - www.azec.it

RILIEVO, INDAGINI E VERIFICHE DI VULNERABILITÀ'

ELABORATO : RELAZIONE TECNICO ILLUSTRATIVA

Rev	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato	Codice Commessa
03						AZ:07/2021
02						Elaborato REL-01
01						
00	MAGGIO 2021	PRIMA EMISSIONE	M.D.V.	G.C.	G.C.	Scala
WBS 00	TE REL	SETTORE ST	FASE VER	NOME FILE REL-01-Relazione tecnico illustrativa		

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

Sommario

1	PREMESSA.....	1
2	METODOLOGIE E STRUMENTI DI MISURA.....	1
3	METODOLOGIE DI CALCOLO	1
3.1	Modellazione della struttura	1
3.1.1	Caratterizzazione elementi non lineare	2
3.2	Risposta della struttura in presenza dell'azione sismica	7
3.2.1	Metodi di analisi e criteri di ammissibilità.....	7
3.2.2	Distribuzioni di forze laterali	9
3.2.3	Analisi pushover	9
3.2.4	Riferimenti normativi	13
4	CONCLUSIONI	15

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

1 PREMESSA

Il presente elaborato viene redatto al fine di illustrare le metodologie e le strumentazioni utilizzate per il rilievo del compendio immobiliare denominato "Ex Caserma Mar.Di.Chi.", sito nel Comune di La Spezia (SP) in via XV giugno e composto da quattro edifici, come identificati nell'elaborato "REL_02_ Rilievo fotografico, del quadro fessurativo e impiantistico", nonché le metodologie di calcolo impiegate per la determinazione della PGA.

2 METODOLOGIE E STRUMENTI DI MISURA

Per il compendio in esame è stato previsto il completo rilievo geometrico mediante strumentazione laser scanner, la quale ha permesso la restituzione di tutto il complesso in formato tridimensionale navigabile. Tale tecnologia ha consentito l'acquisizione di una nuvola di punti che rappresenta la geometria con un grado di precisione millimetrico. La tecnologia laser scanner permette, infatti, di acquisire milioni di coordinate metriche in tempi brevi con precisione millimetrica sul singolo punto acquisito ed anche a distanze elevate, riducendo notevolmente i tempi di lavoro. Oltre all'acquisizione delle tre coordinate spaziali "xyz" di ogni singolo punto, la strumentazione rileva un quarto dato, detto riflettanza, che rappresenta la quantità di luce restituita dal materiale indipendentemente dalla luce ambientale. In questo modo ogni superficie sarà descritta sia dal punto di vista quantitativo sia qualitativo. È quindi possibile visualizzare anche lo stato fessurativo e deformativo dell'edificio.

Tramite app desktop gratuite quali Recap, è possibile consultare la restituzione del rilievo mediante l'apertura del file "caserma laspezia.rcp" (elaborato digitale).

Si riportano nell'elaborato "REL_02_ Rilievo fotografico, del quadro fessurativo e impiantistico" alcune immagini esplicative relative al rilievo eseguito.

3 METODOLOGIE DI CALCOLO

3.1 Modellazione della struttura

Il modello di calcolo è stato realizzato mediante schematizzazione a telaio equivalente, in cui le pareti sono interconnesse da diaframmi orizzontali di piano (solai). Sono stati assemblati gli elementi resistenti (maschi e fasce) ed i nodi rigidi. In particolare, l'implementazione di elementi parete e di elementi orizzontamento (solai e copertura) permettono la discretizzazione dei maschi murari e delle fasce di piano. Quindi, la parete è stata divisa in tratti orizzontali corrispondenti ai vari piani e, avendo nota l'ubicazione delle aperture, è stato possibile determinare automaticamente le porzioni di muratura, i maschi murari e le fasce di piano. Grazie a questa suddivisione, il modello della parete è del tutto assimilabile a quello di un telaio piano.

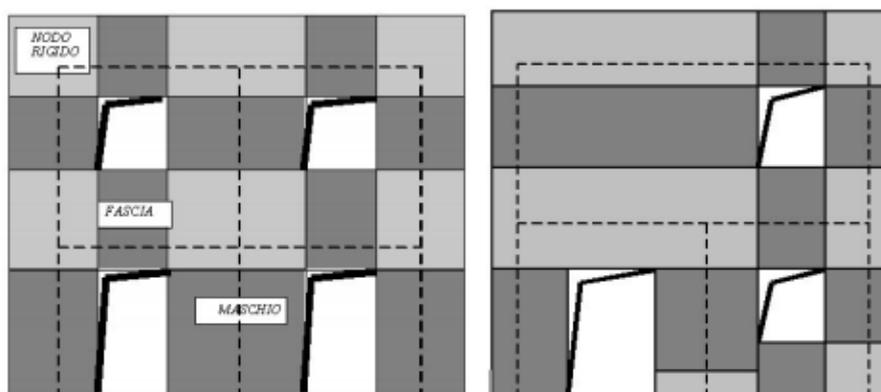


Figura 1 Modello a telaio equivalente

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

Nella modellazione sono stati associati i materiali ai diversi elementi, come muri e solai. Questi ultimi sono stati modellati con elementi solaio a tre nodi connessi ai nodi tridimensionali, caricati perpendicolarmente al loro piano con i carichi accidentali e permanenti secondo i valori definiti caso per caso.

3.1.1 Caratterizzazione elementi non lineare

Dall’osservazione dei danni indotti dai terremoti reali e dall’analisi dei dati di prove sperimentali su singoli pannelli in muratura soggetti a forze orizzontali, si riconoscono **tre principali meccanismi di collasso** per il generico pannello: pressoflessione, taglio per fessurazione diagonale e per scorrimento.

Discriminante per l’attivazione del meccanismo effettivo tra quelli citati è una combinazione di fattori di diversa natura: la geometria del pannello (snellezza), l’entità del carico, le caratteristiche meccaniche del materiale. Il software utilizzato consente di definire il comportamento del singolo macro-elemento murario mediante un modello non lineare a plasticità concentrata, che si basa sulla possibile formazione di cerniere assunte puntuali.

Tale modello meccanico consente di associare la risposta di un singolo macro-elemento in muratura (*pannello di maschio o fascia*) a quello di un elemento **beam non lineare**, caratterizzato da cerniere plastiche a flessione (agli estremi) e a taglio (al centro) che simulano i possibili meccanismi di collasso nel piano.

Convenzionalmente tali cerniere vengono assunte come puntuali, associando ad esse leggi costitutive non lineari del tipo forza-spostamento in accordo con le disposizioni normative.

Tali modelli a plasticità concentrate possono essere implementati nelle analisi non lineari di strutture in muratura, modellate ai macro-elementi mediante sistemi spaziali a telaio equivalente.

Diversi sono stati i modelli basati sulla formulazione non lineare di macro-elementi rappresentativi delle caratteristiche dei pannelli in muratura proposti da alcuni autori nel tempo (*Braga e Liberatore 1991; Gambarotta e Lagomarsino 1996; Magenes e Della Fontana 1998*).

Tra questi, uno dei più avanzati è il modello a macroelementi non lineare proposto dai ricercatori dell’Università di Genova (*Gambarotta e Lagomarsino 1996-1998*).

Tale modello si differenzia rispetto agli altri in quanto può essere implementato sia per l’analisi statica non lineare, sia per analizzare il comportamento ciclico di pareti in muratura (analisi dinamica non lineare). È un modello meccanico in cui è formulato un legame costitutivo non lineare con danneggiamento, degrado di resistenza con softening e degrado di rigidità, che consente di cogliere i tre meccanismi di collasso tipici dei pannelli murari.

Tale modello è alla base del codice di calcolo 3MURI (Galasco et al. 2002 - 2004) utilizzato per sviluppare le analisi numeriche in merito al caso studio in oggetto.

Nell’ambito di una modellazione a macroelementi (telaio equivalente), il generico pannello murario è definito mediante uno schema monodimensionale la cui formulazione si basa sulle condizioni cinematiche, in termini di spostamenti e rotazioni nodali (w, u, ϕ) e sulle condizioni statiche al contorno, in termini di sollecitazioni risultanti (M, N, T). Il modello implementa inoltre ulteriori due gradi di libertà interni ($\delta; \theta$) al centro del macro-elemento, che conferiscono carattere di “bidimensionalità” all’elemento, consentendo una migliore gestione dei meccanismi di collasso considerando l’interazione taglio-flessione.

Il modello considera il generico pannello murario di larghezza (b) e spessore (s) suddiviso in tre parti. La deformabilità assiale (plasticizzazione a pressoflessione) è concentrata nei due elementi di estremità (1) e (3) aventi spessore infinitesimo (Δ), infinitamente rigidi a taglio. La deformabilità tangenziale (plasticizzazione a taglio) è riferita all’elemento centrale (2) di altezza (h), il quale risulta invece indeformabile assialmente e

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

flessionalmente. Il modello cinematico completo per il macroelemento presuppone tre gradi di libertà (w_i, u_i, ϕ_i) dei nodi di estremità (i, j). Le ipotesi di rigidità introdotte consentono di semplificare la cinematica del macroelemento imponendo opportune condizioni di congruenza interne dell'elemento (2) introducendo soli due ulteriori gradi di libertà ($\delta; \theta$). Detti (w, u, ϕ) gli spostamenti e rotazioni dei nodi di estremità (i, j), per congruenza alle interfacce 1-2: [$u_1 = u_i$; $u_2 = u_j$] (per effetto dell'infinita rigidità a taglio dei corpi di estremità), [$w_1 = w_2 = \delta$; $\phi_1 = \phi_2 = \theta$] (in quanto il corpo centrale è infinitamente rigido assialmente e flessionalmente); dove ($\delta; \theta$) rappresentano rispettivamente rotazione e spostamento dell'elemento interno. Si avranno pertanto 8 gradi di libertà: le sei componenti di spostamento dei nodi di estremità ($u_i; w_i; \phi_i$; $u_j; w_j; \phi_j$) più le due componenti del macroelemento ($\delta; \theta$). Di conseguenza la rottura per pressoflessione (rotazione del pannello murario) e la corrispondente componente di deformazione anelastica si realizzano alle estremità supponendo un contatto elastico monolatero alle interfacce (1) e (3) che simula la parzializzazione delle sezioni (non resistenza a trazione della muratura). La rottura a taglio e la deformazione angolare interessano il solo modulo centrale (2) del macroelemento, schematizzata supponendo uno stato di tensione uniforme nell'elemento, attraverso un legame tra le componenti cinematiche, lo stato tensionale e le variabili descrittive del comportamento plastico ($\alpha =$ grado di danneggiamento, $\gamma_p =$ scorrimento plastico). La rottura per fessurazione diagonale, dove si verificano i meccanismi di taglio-scorrimento, è rappresentata mediante la deformazione (γ_p) che si attiva quando viene superata la condizione limite per attrito alla Coulomb. Si omette la trattazione teorica cui si rimanda alla letteratura specifica sul modello proposto.

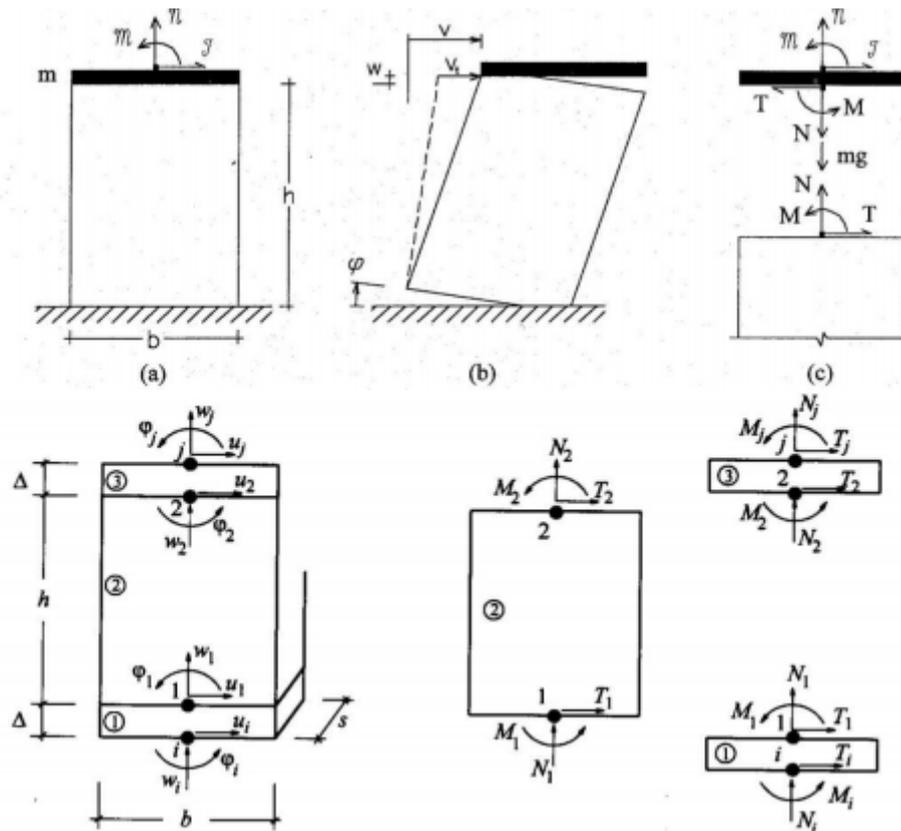


Figura 2 Modello a macroelementi

Nell'ottica di una modellazione della parete mediante il telaio equivalente, i maschi murari sono gli elementi verticali deformabili posti tra due aperture appartenenti allo stesso livello dell'edificio. In particolare il pannello di maschio avrà larghezza (B) e altezza efficace $H = H_{eff}$ della parte deformabile pari al tratto di elemento compreso tra due nodi rigidi in successione. La norma suggerisce di modellare la risposta sismica non lineare del generico pannello di maschio attraverso un **legame costitutivo taglio-spostamento ($V-\delta$)**

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

bilineare elastico perfettamente plastico. Si suppone cioè che il maschio abbia comportamento lineare elastico finché non viene verificato uno dei possibili criteri di rottura: pressoflessione, taglio per fessurazione e taglio per scorrimento. La condizione di crisi si ha quando, per effetto dell'azione sismica orizzontale, si raggiunge un valore del taglio ultimo (V_u) nel pannello corrispondente al minimo tra i valori corrispondenti ai meccanismi a flessione e taglio, su citati:

$$[V_u = \text{MIN} (V_f; V_t) \quad ; \quad \delta_u = \text{spostamento ultimo meccanismo}]$$

$$V_f = \frac{M_u}{h_0} = \left(\frac{B^2 \cdot s \cdot \sigma_0}{2 \cdot h_0} \right) \cdot \left(1 - \frac{\sigma_0}{0,85 \cdot f_d} \right) \quad (\text{Taglio ultimo a pressoflessione})$$

$$V_t = B \cdot s \cdot \frac{1,5 \cdot \tau_{0,d}}{p} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1,5 \cdot \tau_{0,d}}} = B \cdot s \cdot \frac{f_{td}}{p} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}} \quad (\text{Resistenza a taglio per fessurazione diagonale})$$

$$V_t = f_{vd} \cdot B' \cdot s \quad (\text{Resistenza a taglio per scorrimento})$$

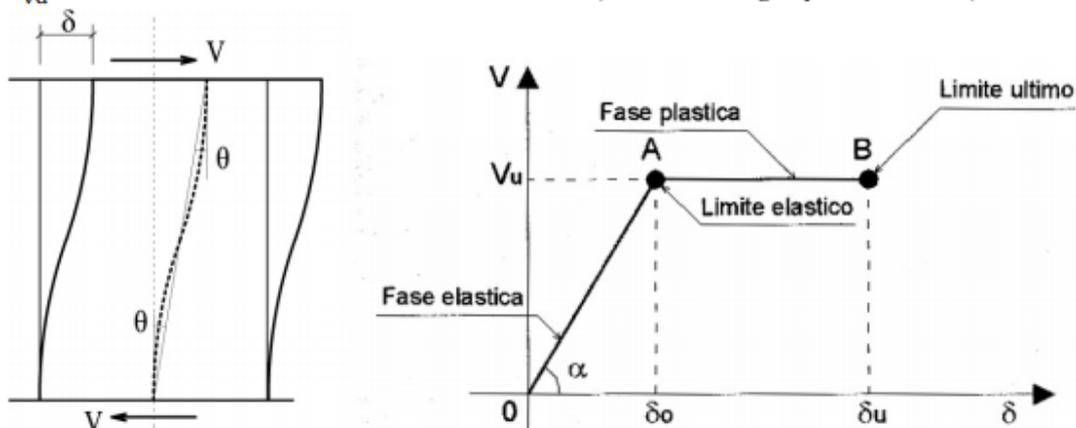


Figura 3 Legame costitutivo taglio-spostamento (v-d) bilineare elastico perfettamente plastico

Le proprietà meccaniche del materiale muratura sono definite in modo da individuarne al meglio il comportamento in campo non lineare.

Le caratteristiche principali sono:

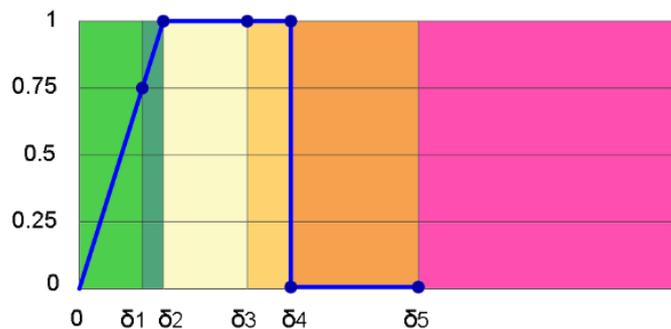
- Rigidezza iniziale secondo le caratteristiche elastiche (fessurate) del materiale;
- Redistribuzione delle sollecitazioni interne all'elemento tali da garantire l'equilibrio;
- Settaggio dello stato di danno secondo i parametri globali e locali;
- Degradazione della rigidezza nel ramo plastico;
- Controllo di duttilità mediante la definizione di drift massimo (δ_u) differenziato secondo quanto previsto nelle normative vigenti a seconda del meccanismo di danneggiamento agente sul pannello;
- Eliminazione dell'elemento, al raggiungimento delle condizioni limite senza interruzione dell'analisi.

Il comportamento non lineare si attiva quando un valore di forza raggiunge il suo massimo valore definito come il minimo fra i criteri di resistenza pressoflessione e taglio.

Il comportamento dei maschi murari associati ai meccanismi di taglio e pressoflessione può essere descritto attraverso diversi tratti che rappresentano i progressivi livelli di danno.

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
---	---	---------------------------------------

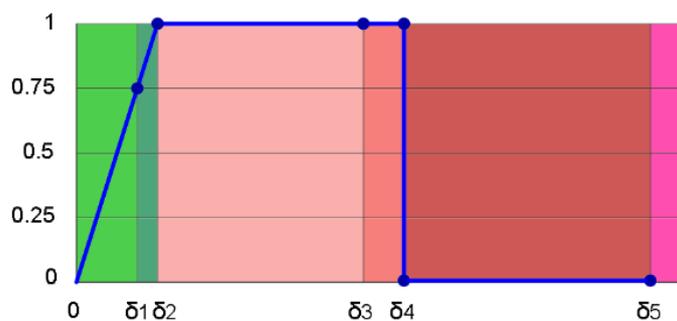
Maschio con meccanismo a taglio



Il comportamento del maschio murario a taglio si può descrivere attraverso i seguenti tratti, rappresentativi dei progressivi livelli di danno relativi al diagramma precedente:

0 - δ_1	elasticità
δ_1 - δ_2	incipiente di plasticità
δ_2 - δ_3	plastico per taglio
δ_3 - δ_4	incipiente rottura per taglio
δ_4 - δ_5	rottura per taglio
δ_5 - ∞	crisi grave

Maschio con meccanismo a pressoflessione



Il comportamento del maschio murario a pressoflessione, invece, si può descrivere attraverso i seguenti tratti:

0 - δ_1	elasticità
δ_1 - δ_2	incipiente di plasticità
δ_2 - δ_3	plastico per pressoflessione
δ_3 - δ_4	incipiente rottura per pressoflessione
δ_4 - δ_5	rottura per pressoflessione
δ_5 - ∞	crisi grave

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

Alcuni tra questi livelli di rottura sono necessari per descrivere con maggiore cura il progredire della crisi permettendo una più accurata previsione degli interventi e del livello di degrado della muratura:

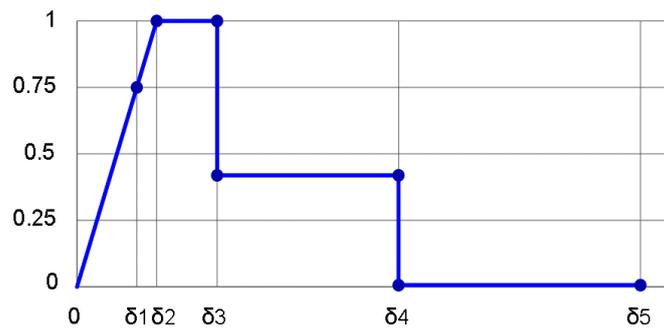
- Incipiente plasticità: Quando un elemento si trova ancora in campo elastico ma è prossimo alla plasticità;
- Incipiente rottura: Quando un elemento è in campo plastico ma è prossimo alla rottura;
- Crisi grave: Quando in seguito alla rottura dell'elemento le deformazioni diventano talmente significative da poter generare un crollo locale.

Il software mette a disposizione tre categorie di legame:

- Con degrado di resistenza a un valore residuo (Legame multilineare);
- Con resistenza pari al valore residuo (Legame bilineare);
- Priva di resistenza residua.

Tra queste le categorie di legame utilizzate all'interno del progetto in esame sono:

- Con degrado di resistenza a un valore residuo (Legame multilineare).



Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

3.2 Risposta della struttura in presenza dell'azione sismica

La risposta della struttura in presenza dell'azione sismica viene determinata mediante lo svolgimento di un'analisi statica non lineare.

3.2.1 Metodi di analisi e criteri di ammissibilità

Vista la tipologia strutturale del compendio oggetto di valutazione, è stato necessario impiegare, come metodologia di calcolo, l'analisi statica non lineare sulla base di quanto dettato dalle NTC 2018 e dalla circolare 7 del 21-1-2019:

"C8.7.1.3 MECCANISMI GLOBALI METODI DI ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA E CRITERI DI VERIFICA

Circ. 7/2019: "C8.7.1.3.1 Edifici singoli

L'analisi globale della risposta sismica degli edifici con struttura muraria "singoli" (cioè non facenti parte di un aggregato) può essere effettuata sia mediante l'analisi dei singoli setti murari sottoposti alle azioni di loro competenza (nel proprio piano e fuori dal proprio piano) in base ad una suddivisione per aree di influenza (come già esposto), sia mediante un modello globale in grado di ripartire tra i vari setti le azioni sismiche agenti sull'intero fabbricato. La scelta deve essere effettuata in base alle effettive capacità degli elementi costruttivi presenti di garantire la ripartizione delle azioni orizzontali.

L'analisi e le verifiche devono essere condotte considerando le sollecitazioni e le capacità di tutti gli elementi costruttivi, quali le pareti, i diaframmi di piano, le connessioni tra essi e con gli eventuali presidi di rinforzo (quali ad esempio gli incatenamenti). Nelle scelte di modellazione occorre considerare le incertezze sulle caratteristiche meccaniche delle murature, degli elementi lignei, dei vincoli tra gli elementi strutturali e dei vincoli esterni (ad esempio con edifici in aderenza la cui modellazione esplicita sia omessa). Oltre a ciò, può essere opportuno condurre diverse analisi con modelli alternativi e/o formulare diverse ipotesi nel campo di variabilità dei parametri in gioco.

La verifica della risposta globale di costruzioni esistenti in muratura allo stato limite ultimo può essere eseguita con i metodi dell'analisi lineare o non lineare.

Nell'analisi lineare, per la verifica a SLV le sollecitazioni in ciascun elemento sono valutate con un'azione sismica ridotta dal fattore di comportamento q ; tali sollecitazioni, eventualmente ridistribuite secondo quanto indicato al § 7.8.1.5.2 delle NTC, devono essere verificate con i criteri di resistenza indicati nel seguito.

Nell'analisi non lineare, il controllo della compatibilità tra sollecitazioni e resistenze a livello di singolo elemento è eseguito nel corso dell'analisi stessa e la verifica è effettuata a livello globale attraverso un confronto tra la domanda di spostamento e la corrispondente capacità. Eventuali meccanismi di rottura ritenuti significativi, ma non esplicitamente considerati nell'analisi (ad esempio quelli relativi ad alcuni elementi di connessione), devono essere verificati a posteriori.

Nel caso i diaframmi orizzontali siano di rigidità trascurabile, ovvero non in grado di garantire una significativa ripartizione delle azioni sismiche tra le diverse pareti murarie, l'analisi globale della risposta sismica può essere effettuata analizzando i singoli setti murari, sottoposti alle azioni di loro competenza in base a una suddivisione per aree di influenza.

Nel caso invece di diaframmi dotati di rigidità non trascurabile, l'analisi della risposta sismica globale può essere effettuata con uno dei metodi di cui al § 7.3, con le precisazioni e le restrizioni indicate al § 7.8.1.5, delle NTC. In particolare è possibile utilizzare l'analisi statica non lineare assegnando, come distribuzioni principale e secondaria, rispettivamente, la prima distribuzione, sia del Gruppo 1, sia del Gruppo 2, indipendentemente dalla percentuale di massa partecipante sul primo modo.

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

Nel caso di diaframmi di rigidità finita, non potendosi definire lo spostamento del centro di massa dell'ultimo livello (v. § 7.3.4.2 delle NTC), lo spostamento dc da assumersi per la curva di capacità può essere coerentemente assunto come lo spostamento medio tra quello delle diverse pareti, pesato con le corrispondenti masse sismiche.

Nella modellazione globale eventuali porzioni di muratura in grado di accoppiare la risposta degli elementi verticali possono essere considerate parte del sistema resistente, quando siano verificate entrambe le seguenti condizioni:

- *la porzione considerata sia sorretta da un architrave, da un arco o da una piattabanda strutturalmente efficace, che ne garantisca il sostegno anche nel caso in cui la stessa sia fessurata e danneggiata dal sisma;*
- *essa sia efficacemente ammorsata alle pareti che la sostengono (ovvero sia possibile confidare in una resistenza orizzontale a trazione, anche se limitata) o si possa instaurare nella porzione un meccanismo resistente a puntone diagonale (ad esempio per la presenza di una catena o di un elemento accoppiato resistente a trazione).*

Per le verifiche di sicurezza nei riguardi del comportamento sismico globale, è possibile applicare quanto prescritto dalle NTC per la progettazione delle nuove costruzioni in muratura, con le precisazioni nel seguito riportate.

Nel caso dell'analisi statica non lineare la capacità in spostamento relativa ai diversi stati limite è valutata, sulla curva taglio di base-spostamento, nei modi appresso indicati:

SLC: *per la definizione della bilineare equivalente, identificata seguendo i criteri indicati al § C.7.3.4.2, lo spostamento ultimo a SLC è dato dal minore tra quelli forniti dalle seguenti due condizioni:*

- *quello corrispondente ad un taglio di base residuo pari all'80% del massimo;*
- *quello corrispondente al raggiungimento della soglia limite della deformazione angolare a SLC in tutti i maschi murari verticali di un qualunque livello in una qualunque parete ritenuta significativa ai fini della sicurezza (questo controllo può essere omesso nelle analisi quando i diaframmi siano infinitamente rigidi o quando sia eseguita l'analisi di una singola parete).*

SLV: *lo spostamento ultimo a SLV, sulla bilineare equivalente sopra definita, è pari a $\frac{3}{4}$ dello spostamento a SLC*

SLD: *lo spostamento corrispondente è il minore tra gli spostamenti ottenuti dalle seguenti due condizioni:*

- *quello corrispondente al limite elastico della bilineare equivalente, definita a partire dallo spostamento ultimo a SLC;*
- *quello corrispondente al raggiungimento della resistenza massima a taglio in tutti i maschi murari verticali in un qualunque livello di una qualunque parete ritenuta significativa ai fini dell'uso della costruzione (e comunque non prima dello spostamento per il quale si raggiunge un taglio di base pari a $\frac{3}{4}$ del taglio di base massimo).*

SLO: *lo spostamento corrispondente è pari a $\frac{2}{3}$ di quello allo SLD.*

La domanda di spostamento, da confrontarsi con le suddette capacità di spostamento ai diversi stati limite, può essere valutata sul sistema bilineare equivalente attraverso le espressioni indicate nel § C.7.3.4.2, valide sia per la risposta in campo non lineare (SLV, con $q^ \leq 3$, e SLC, con $q^* \leq 4$) che in campo lineare equivalente (SLO e SLD).*

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

Nel caso di analisi dinamica non lineare, le domande di spostamento, per ciascuna direzione e verso, sono rappresentate dalla media dei valori massimi ottenuti applicando un numero significativo di storie temporali, compatibili con le condizioni di pericolosità del sito. Ciascuna domanda di spostamento deve essere confrontata con la corrispondente capacità ottenuta da un'analisi statica non lineare. Quest'ultima può essere definita attraverso un confronto tra le curve forza-spostamento cicliche, ottenute dalle analisi dinamiche, e quelle monotone, ottenute dalle analisi statiche con le due distribuzioni di forze come sopra indicato; in assenza di tale valutazione è possibile considerare la capacità di spostamento minore tra quelle fornite dalle due distribuzioni"

In sintesi, l'analisi statica non lineare è una procedura impiegata per determinare il comportamento di una costruzione a fronte di una determinata forza applicata e consiste nello "spingere" la struttura fino a che questa collassa o un parametro di controllo di deformazione non raggiunge un valore limite prefissato; la "spinta" si ottiene applicando in modo incrementale monotono un profilo di forze prestabilito (si veda il capitolo 3.2.2). Il sistema di forze in questione deve simulare nel modo più realistico possibile gli effetti di inerzia prodotti dal sisma nel piano orizzontale.

Tale metodologia consente di indagare in maniera puntuale e precisa la progressione del danno e gli elementi che per primi presentano un collasso, dando quindi la possibilità al progettista di indirizzare gli interventi sugli elementi maggiormente vulnerabili.

3.2.2 Distribuzioni di forze laterali

La normativa vigente (paragrafo 7.3.4.2 delle NTC 2018) impone l'utilizzo di due diverse distribuzioni di forze laterali, ciascuna appartenente ai seguenti due gruppi:

"Gruppo 1 - Distribuzioni principali:

- *se il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa non inferiore al 75% si applica una delle due distribuzioni seguenti:
distribuzione proporzionale alle forze statiche di cui al § 7.3.3.2, utilizzando come seconda distribuzione la a) del Gruppo 2,
distribuzione corrispondente a un andamento di accelerazioni proporzionale alla forma del modo fondamentale di vibrare nella direzione considerata;*
- *in tutti i casi può essere utilizzata la distribuzione corrispondente all'andamento delle forze di piano agenti su ciascun orizzontamento calcolate in un'analisi dinamica lineare, includendo nella direzione considerata un numero di modi con partecipazione di massa complessiva non inferiore allo 85%. L'utilizzo di questa distribuzione è obbligatorio se il periodo fondamentale della struttura è superiore a 1,3 TC.*

Gruppo 2 - Distribuzioni secondarie:

- a) distribuzione di forze, desunta da un andamento uniforme di accelerazioni lungo l'altezza della costruzione;*
- b) distribuzione adattiva, che cambia al crescere dello spostamento del punto di controllo in funzione della plasticizzazione della struttura;*
- c) distribuzione multimodale, considerando almeno sei modi significativi."*

3.2.3 Analisi pushover

L'analisi statica non lineare, detta anche pushover, prevede un sistema di forze che deve simulare nel modo più realistico possibile gli effetti di inerzia prodotti dal sisma nel piano orizzontale. Tali effetti, a loro volta,

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

dipendono dalla risposta stessa della struttura, per cui il sistema di forze applicato alla struttura dovrebbe cambiare durante l'analisi per fornire un adattamento della distribuzione delle sollecitazioni al livello di danneggiamento della struttura (pushover adattivo).

L'analisi di spinta è, pertanto, una tecnica di soluzione incrementale-iterativa delle equazioni di equilibrio statico della struttura in cui la forzante è rappresentata dal sistema di spostamenti o forze applicato.

La Pushover consente di definire un legame scalare forza-spostamento caratteristico del sistema studiato, detto curva di capacità (vedi Figura 6), che permette di ricondurre la ricerca dello spostamento massimo di un sistema soggetto ad una certa azione esterna a quella di un sistema Single Degree Of Freedom (SDOF) equivalente. L'analisi di spinta è particolarmente intuitiva nei sistemi SDOF, dato che sono schematizzabili da un semplice pendolo composto da una massa concentrata m sorretta da un elemento privo di massa con rigidezza k e collegato ad un elemento, privo di massa e rigidezza, responsabile dello smorzamento. La configurazione deformata del sistema è definita quindi da un unico parametro che può identificarsi con lo spostamento relativo della massa rispetto al suolo (spostamento orizzontale u in Figura 4).

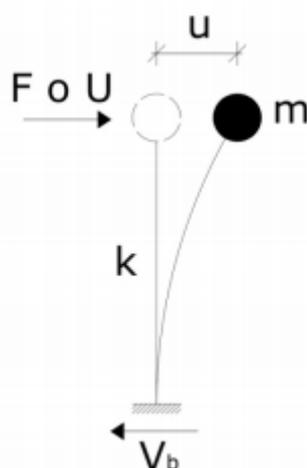


Figura 4 Schematizzazione di sistema ad un grado di libertà (SDOF)

In questi semplici casi, l'analisi di spinta consiste nell'applicare alla massa del sistema uno spostamento U o una forza F la cui intensità viene gradualmente incrementata nella direzione dell'unico grado di libertà disponibile. Le espressioni che definiscono la forzante (intesa in senso generalizzato come forza o spostamento) possono esprimersi come:

$$U = \alpha \cdot u$$

$$F = \beta \cdot f$$

Dunque, fissato arbitrariamente il valore di u o f , il fattore moltiplicativo α o β viene gradualmente incrementato da zero fino ad un valore finale che permetta di investigare il campo di risposta di interesse per il sistema in esame. Ad ogni valore di α o β corrisponde quindi un valore di U o F che rappresenta lo spostamento o la forza applicati alla massa del sistema. Il comportamento del sistema è definito da un legame forza-spostamento in cui la forza coincide con il taglio alla base V_b e lo spostamento con quello della massa u :

- nel caso di analisi a forze imposte (F è la forza applicata ad m): $V_b = F$ e $u = U$ essendo U lo spostamento di m prodotto da F ;

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

- nel caso di analisi a spostamenti imposti (U è lo spostamento applicato ad m): $u=U$ e $V_b=F$ essendo F la reazione vincolare risultante;

Nel caso di sistemi Multi Degrees Of Freedom (MDOF), l'approccio è simile con la differenza che la struttura viene eccitata applicando un profilo di forze o di spostamenti orizzontali in corrispondenza di ciascun piano (Figura 5) e che, per descrivere il comportamento dell'intero sistema in termini di legame forza-spostamento, è necessario scegliere un solo parametro di forza ed un solo parametro di spostamento. La scelta di tali parametri non è univoca e può dar luogo a differenti legami forza-spostamento, ossia a differenti legami costitutivi del sistema SDOF equivalente detti curva di capacità. Solitamente, come parametri di forza e di deformazione, si selezionano il taglio alla base e lo spostamento del punto di controllo che generalmente è scelto come punto più alto della struttura, per esempio coincidente con il baricentro dell'impalcato di copertura.

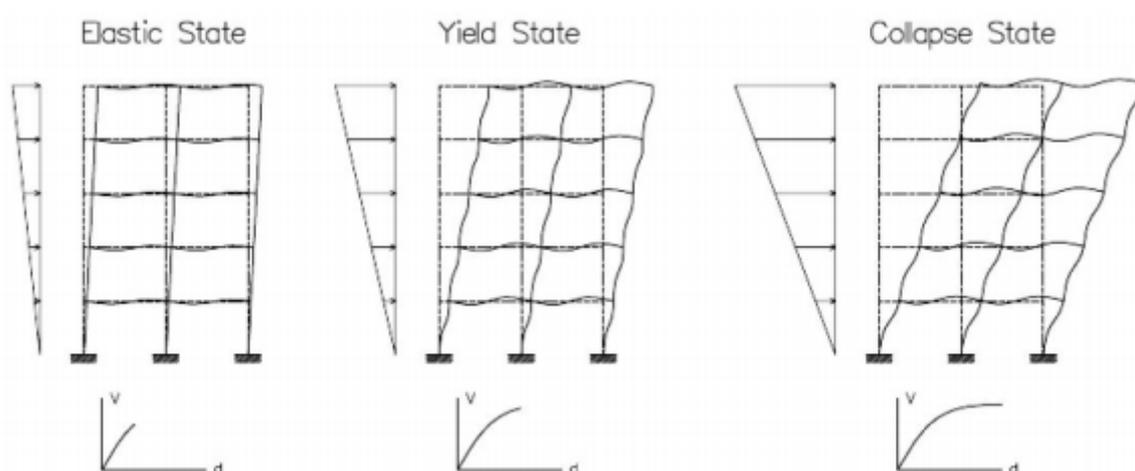


Figura 5 Applicazione dell'analisi di spinta ad un telaio con relative deformate e curve di capacità

In una analisi di spinta basata sugli spostamenti o sulle forze si impone alla struttura, in modo incrementale, un profilo di spostamenti $U = (U_1, U_2, U_3 \dots)^T$ o di forze $F = (F_1, F_2, F_3 \dots)^T$ a livello di piano che possono essere definite da un vettore di forma u o f moltiplicato per un fattore di scala α o β :

$$U = \alpha \cdot u$$

$$F = \beta \cdot f$$

Dove $u = (u_1, u_2, \dots, u_i, \dots, u_n)^T$ e $U_i = \alpha \cdot u_i$ è lo spostamento del piano i -esimo.

Per descrivere il comportamento del sistema attraverso un legame scalare forza - spostamento (detto curva di capacità) si scelgono comunemente il taglio alla base e lo spostamento U_j del piano j -esimo come ad esempio quello in sommità u .

Considerando che l'obiettivo è di simulare la risposta dinamica della struttura, sorge la questione se l'analisi di spinta debba essere condotta applicando un sistema di spostamenti o di forze.

Se la struttura avesse un comportamento elastico lineare i due approcci condurrebbero agli stessi risultati ma la presenza di effetti anelastici comporta una sensibile differenza tra le due alternative. Concettualmente l'analisi dinamica viene condotta con le forze inerziali per cui l'analisi di spinta a forze imposte sembrerebbe più appropriata ma, in un'analisi dinamica, perfino quando un modo è dominante, l'andamento delle forze di piano non rimane inalterato (ossia non variano proporzionalmente ad un fattore costante), quindi applicare una distribuzione di forze costante non è comunque esatto.

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

Inoltre possono sorgere difficoltà nel condurre analisi anelastiche stabili con controllo di forze, poiché queste non sono in grado di cogliere un eventuale comportamento softening della struttura né di seguire accuratamente risposte associate a rigidzze molto piccole, perciò può essere preferibile eseguire analisi a spostamenti controllati.

Di contro, lavorando a spostamenti imposti, si vincola la deformata della struttura, per cui si rischia di conseguire campi di forze completamente errati rispetto a quelli attesi in una struttura "libera" di deformarsi a fronte dell'evento sismico e quindi a risultati seriamente fuorvianti. Comunque, l'approccio basato sulle forze è quello che ha attirato maggiormente l'interesse perché di facile implementazione su tutti i più comuni programmi di calcolo.

Il risultato più immediato di un'analisi di pushover è la definizione della curva di capacità della struttura, ossia della curva forza-spostamento espressa, solitamente, in termini di taglio alla base (V_b) e spostamento in sommità (u) (Figura 6), che rappresenta appunto la capacità esibita dal sistema di fronteggiare una certa azione esterna. Considerando un sistema SDOF, l'andamento della curva di capacità dipende dalla rigidezza k o dalla flessibilità k^{-1} del sistema, che a loro volta dipendono essenzialmente dalle caratteristiche geometriche e meccaniche del sistema e sono funzioni non lineari rispettivamente dello spostamento e della forza applicata al sistema:

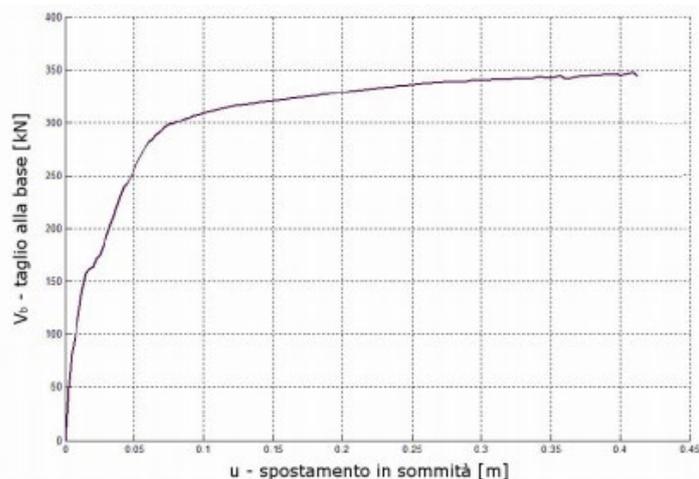


Figura 6 Esempio di curva di capacità

Nel caso più complesso, ma di maggiore interesse, di sistemi MDOF la curva di capacità mostra andamenti analoghi ai sistemi SDOF caratterizzati entrambi da un tratto inizialmente rettilineo, corrispondente al comportamento lineare della struttura, che si incurva quando inizia la plasticizzazione e la risposta progredisce in campo non lineare. La capacità di una struttura dipende dalle capacità di resistenza e di deformazione dei suoi singoli componenti. **La curva di capacità definisce la capacità della struttura indipendentemente da qualsiasi specifica richiesta sismica** (infatti non si fa riferimento alcuno all'azione sismica) **e quindi descrive le caratteristiche intrinseche del sistema resistente; in altre parole è una sorta di legame costitutivo semplificato della struttura.**

Trattandosi di un legame scalare forza-spostamento il comportamento del sistema MDOF viene così ricondotto sostanzialmente a quello di un sistema SDOF, che può ragionevolmente definirsi equivalente, dato che la curva di capacità è stata costruita tenendo conto del comportamento dell'intero sistema MDOF.

Quando un terremoto induce uno spostamento laterale sulla struttura la sua risposta è rappresentata da un punto su tale curva e, poiché la deformazione di tutti i suoi componenti è correlata allo spostamento globale della struttura stessa, ogni punto di questa curva definisce anche uno specifico stato di danno strutturale.

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
---	---	---------------------------------------

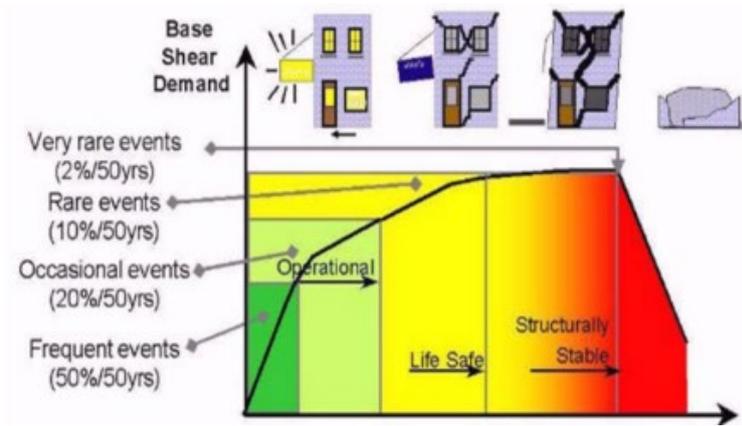


Figura 7 Curva di capacità legata al danno strutturale

3.2.4 Riferimenti normativi

All'interno del paragrafo 7.3.4.2 delle NTC viene precisato che: "L'analisi non lineare statica richiede che al sistema strutturale reale sia associato un sistema strutturale equivalente non lineare. Nel caso in cui il sistema equivalente sia ad un grado di libertà, a detto sistema strutturale equivalente si applicano i carichi gravitazionali e, per la direzione considerata dell'azione sismica, in corrispondenza degli orizzontamenti della costruzione, forze orizzontali proporzionali alle forze d'inerzia aventi risultante (taglio alla base) F_b . Tali forze sono scalate in modo da far crescere monotonamente, sia in direzione positiva che negativa e fino al raggiungimento delle condizioni di collasso locale o globale, lo spostamento orizzontale d_c di un punto di controllo coincidente con il centro di massa dell'ultimo livello della costruzione (sono esclusi eventuali torrini). [...] Il diagramma $F_b - d_c$ rappresenta la curva di capacità della struttura". L'analisi, effettuata in controllo di spostamento, deve essere eseguita fino a che non si verifica il decadimento del taglio del 20% dal suo valore di picco (circolare 7/2019, capitolo C7.8.1.5.4). Si calcola in corrispondenza di tale valore lo spostamento massimo (d_c) alla base dell'edificio generato dalla distribuzione di forze. Questo valore di spostamento costituisce il valore ultimo di spostamento dell'edificio. Nel paragrafo 7.8.1.6 la norma richiede che la curva di capacità bi-lineare del sistema equivalente (SDOF) sia costituita da due rette: la prima retta è passante per l'origine e interseca la curva del sistema equivalente in corrispondenza del 70% del valore di picco; la seconda retta dovrà essere parallela all'asse degli spostamenti e tale da generare l'equivalenza delle aree tra i diagrammi del sistema equivalente e quello bilineare (come si evince dalla Figura 8).

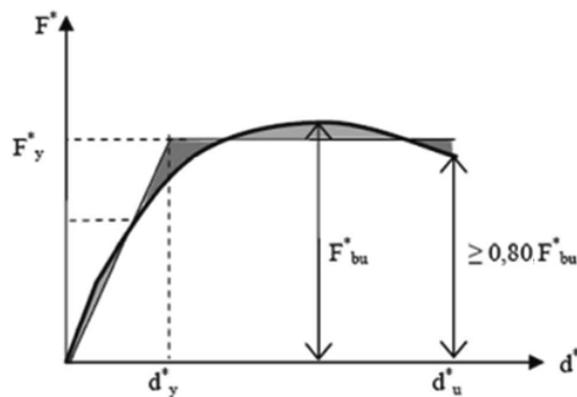


Figura 8 Rappresentazione bilineare della curva di capacità

La determinazione della curva relativa al sistema equivalente, permette di determinare il periodo con cui ricavare lo spostamento massimo richiesto dal sisma, secondo gli spettri riportati sulla normativa. Per quanto

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
--	--	--

riguarda le forze da utilizzare all'interno dell'analisi, la norma precisa che si devono considerare almeno due distribuzioni di forze d'inerzia, secondo quanto già indicato al capitolo **3.2.2** del presente elaborato.

In particolare per le costruzioni in muratura la norma precisa al paragrafo 7.8.1.5.4 che *“L'analisi statica non lineare è applicabile agli edifici in muratura secondo le modalità descritte al § 7.3.4.2, con la possibilità di estendere quanto ivi indicato per le strutture in cui il modo di vibrare fondamentale nella direzione considerata ha una partecipazione di massa non inferiore al 75%, anche ai casi in cui la partecipazione di massa sia non inferiore al 60%”*. Inoltre per le costruzioni esistenti in muratura, all'interno della Circolare vengono definiti ulteriori casi per i quali è consentito l'utilizzo dell'analisi statica non lineare. Questi casi sono stati già descritti al capitolo **3.2.1** del presente elaborato. Tali ulteriori prescrizioni presenti nella norma, relativamente alla percentuale della massa partecipante al primo modo di vibrare della struttura per gli edifici in muratura, e in particolare per quelli esistenti, vengono fornite in quanto per questa particolare categoria di edifici risulta difficile far attivare una percentuale di massa partecipante significativa anche per il modo di vibrare fondamentale della struttura. Tali difficoltà sono prevalentemente legate alla mancanza in molti edifici di orizzontamenti rigidi in grado di generare un comportamento “scatolare ed omogeneo” della struttura quando questa è sottoposta all'azione sismica.

Per le verifiche di sicurezza nei riguardi del comportamento sismico globale, si applica quanto prescritto ai paragrafi 7.8.1.6, 7.8.5 delle NTC. Nel caso in cui sia richiesta la verifica per lo Stato limite di esercizio, i valori limite di spostamento di interpiano consigliati per la verifica allo Stato limite di danno sono quelli forniti al § 7.3.6.1 delle NTC, riportati di seguito:

- per costruzioni con struttura portante in muratura ordinaria 0,002 h;
- per costruzioni con struttura portante in muratura armata 0,003 h;
- per costruzioni con struttura portante in muratura confinata 0,0025 h.

I valori limite di spostamento di interpiano consigliati per la verifica allo Stato limite di operatività sono i 2/3 di quelli per lo Stato limite di danno. Nella verifica allo Stato limite ultimo di salvaguardia della vita, lo spostamento ultimo per azioni nel piano di ciascun pannello sarà assunto pari a 0,5% dell'altezza del pannello, nel caso di rottura per taglio, e pari a 1,0%, nel caso di rottura per pressoflessione. I predetti limiti sono definiti al netto degli spostamenti dovuti ad un eventuale moto rigido del pannello (ad esempio conseguente alla rotazione della base), e si incrementano di un'aliquota fino al 100% nel caso di rottura per pressoflessione di pannelli che esibiscono un comportamento a mensola. In presenza di edifici in aggregato, caso tipico nei centri storici, e di edifici a struttura mista, frutto di sistemi costruttivi relativamente moderni o di trasformazioni successive recenti, gli usuali metodi non sempre sono adeguati ed è opportuno seguire appropriati criteri di modellazione e di verifica.

Agenzia del Demanio – Direzione Regionale Liguria	Rilievo 20/30 geometrico, architettonico e struttura/e compatibile BIM, verifica delle vulnerabilità sismica comprensiva di indagini strutturali nonché indagini ambientali per fibre contenenti amianto del Compendio Immobiliare denominato "Ex Caserma Mar. di. chi." – Comune di La Spezia (SP)	REL_01_Relazione tecnico illustrativa
---	---	---------------------------------------

4 CONCLUSIONI

Le metodologie e le strumentazioni utilizzate per il rilievo sono state illustrate nel presente elaborato. Trattasi, in particolare, di rilievo laser scanner dell'intero compendio. Come riportato al capitolo 2, tramite app desktop gratuite è possibile consultare la restituzione del rilievo mediante l'apertura del file "*caserma laspezia.rcp*" (elaborato digitale).

In seguito all'esecuzione del rilievo e delle indagini, è stata condotta l'analisi allo stato di fatto della costruzione, determinandone le vulnerabilità e i conseguenti indici di rischio:

SINTESI ANALISI SISMICHE		SISNTESI ANALISI STATICHE	
Edificio	Indice di rischio sismico minimo	Analisi	Indice di rischio statico minimo
1	0,306	Globale X	>1
2	0,27	Meccanismi locali	0
3	0,359	Globale Y	0
4	0,17	Meccanismi locali	-

Come si può osservare, i valori ottenuti hanno evidenziato la necessità di interventi di miglioramento sismico (indici <0,6) e di adeguamento statico (indici <1) che, una volta realizzati, permettono il raggiungimento del livello minimo di sicurezza previsto dalla normativa vigente (0,6 $a_{g,SLV}$ per il caso sismico).