



Approccio Upper e Lower Bound per la verifica di edifici isolati alla base con dispositivi attritivi a superficie di scorrimento curva

Antonello Mossucca^a, Felice Carlo Ponzo^a, Domenico Salvatore Nigro^a, Lorenzo Picone^a

^a Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano, 85100 Potenza, Italy

Keywords: isolamento alla base, Dispositivi Attritivi a Superficie di scorrimento curva, Upper and Lower Bound

ABSTRACT

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17/01/2018) stabiliscono che l'analisi del progetto di nuovi edifici isolati alla base venga effettuata considerando, per ciascuno stato limite da verificare, i valori estremi più sfavorevoli delle proprietà del sistema di isolamento. Tuttavia, le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17/01/2018) non forniscono indicazioni esaustive sulla trattazione dei fattori che modificano le proprietà del sistema e, pertanto, i progettisti sono portati ad utilizzare, per le analisi di strutture isolate, i valori medi delle caratteristiche meccaniche del sistema di isolamento.

La disponibilità di modelli numerici in grado di simulare in maniera più affidabile il comportamento dei dispositivi attritivi a superficie curva, consente di valutare la risposta delle strutture isolate in modo sempre più attendibile. Le condizioni di servizio, così come le caratteristiche meccaniche dei dispositivi di isolamento, possono, però, risultare molto variabili durante la vita utile della struttura, anche nell'ambito della stessa costruzione, come dimostrato dalle evidenze sperimentali. Ne consegue che il comportamento del sistema di isolamento può essere differente da quello stimato con le analisi considerando i valori medi, per via della variabilità delle proprietà meccaniche. In questo lavoro vengono trattati, con un approccio "upper and lower bound", gli effetti che le variazioni delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi attritivi a scorrimento a superficie curva determinano sulla risposta strutturale, sia nei riguardi della capacità di spostamento alla base, sia in termini di verifiche della sovrastruttura.

1 QUADRO NORMATIVO

Il concetto di isolamento sismico applicato alle costruzioni civili non è nuovo e non è cambiato negli anni. Ciò che è cambiata è la capacità di eseguire, progettare e realizzare strutture isolate sempre più affidabili. Grazie a nuove implementazioni di software dedicati e alla sperimentazione sui materiali, il comportamento dei dispositivi di isolamento attritivi può essere simulato in maniera più accurata e studiato sperimentalmente grazie alle dotazioni dei laboratori attrezzati per simulare condizioni di prova sempre più vicine alla realtà convenzionalmente definita. Per ottenere performance migliori in termini di sicurezza strutturale e garantire la funzionalità nel tempo del sistema di isolamento, sarebbe opportuno applicare correttamente le procedure di analisi per il progetto, considerando le diverse condizioni di servizio nelle quali i dispositivi si possono trovare ad operare. Queste ultime possono

risultare molto variabili e differenti tra loro nell'ambito anche della stessa costruzione. Le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17/01/2018) pongono l'attenzione sulle proprietà meccaniche del sistema di isolamento da adottare nelle analisi di progetto, stabilendo, al punto 7.10.5.1, che l'analisi del progetto debba essere effettuata considerando, per ciascuno stato limite da verificare, i valori estremi più sfavorevoli delle proprietà del sistema che si possono verificare durante il periodo di riferimento V_R considerato, ai fini della valutazione delle grandezze da verificare e coerenti con l'entità delle deformazioni subite dai dispositivi e degli effetti sulla sovrastruttura. Sempre al punto 7.10.5.1 sono elencati i fattori fisici ed ambientali (intervallo della temperatura di esercizio, invecchiamento, velocità di deformazione, fornitura) che determinano la variabilità delle caratteristiche meccaniche dei dispositivi ed è stabilito che solo nel caso in cui i valori estremi (massimo oppure minimo) differiscano di non più

del 20% dal valor medio, si potranno adottare i valori medi delle proprietà meccaniche del sistema di isolamento. Tuttavia le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 17/01/2018) non forniscono indicazioni esaustive sui fattori che modificano le proprietà del sistema e di come tali fattori debbano essere combinati tra loro. Anche le informazioni contenute nei cataloghi dei produttori di dispositivi antisismici risultano, in tal senso, talvolta non complete. Il rimando alla norma europea di prodotto UNI EN15129 (CEN, 2018), seppur non esplicitato, appare inevitabile. Detta norma europea chiarisce, al punto 4.4.2, che le caratteristiche (medie) di progetto (DP) devono essere dedotte dalle prove di tipo. Allo stesso punto si definisce, inoltre, che devono essere determinate in modo appropriato due serie di caratteristiche di progetto del sistema di dispositivi, una al limite superiore (*Upper Bound Design Project*) e una al limite inferiore (*Lower Bound Design Project*). I valori limite superiore ($UBDP$) e inferiore ($LBDP$) sono definiti mediante un metodo proposto da Constantinou et al. 1999 ed implementato per la prima volta nelle linee guida AASHTO, 2009. Detto metodo si basa sull'utilizzo e la combinazione di fattori λ che modificano le caratteristiche meccaniche nominali del dispositivo per effetto delle diverse cause (fattori ambientali, invecchiamento, produzione). Vale la pena evidenziare che i valori dei fattori λ contenuti nell'appendice J della EN 1998-2 (CEN, 2005), si riferiscono a dispositivi a superfici di scorrimento, probabilmente piane, in PTFE. Tuttavia gran parte dei produttori europei utilizzano attualmente materiali differenti dal PTFE nella realizzazione di dispositivi attritivi a superfici di scorrimento curve.

1.1 European Standard UNI EN15129

La norma europea UNI EN 15129 (CEN, 2018) è una norma di prodotto ed i dispositivi antisismici rientranti nel campo di applicazione di detta norma devono essere sottoposti a procedure di qualificazione, con verifica della conformità ai requisiti funzionali dichiarati e devono recare la marcatura CE. La UNI EN 15129 (CEN, 2018) è composta da 12 capitoli, più vari allegati, e tratta gli aspetti e le regole generali di progetto dei dispositivi antisismici e le procedure di prova per la caratterizzazione meccanica dei materiali utilizzati per la fabbricazione dei dispositivi e dei loro collegamenti alla struttura, sia dei dispositivi stessi. Mediante le prove bisogna determinare due serie di caratteristiche di progetto del sistema di isolamento:

- Upper Bound Design Properties ($UBDP$)
- Lower Bound Design Properties ($LBDP$)

Ambedue i limiti devono essere determinati considerando i valori quasi permanenti delle azioni variabili, come definite nelle condizioni sismiche delle azioni, eccetto il caso della temperatura, per la quale si deve considerare il valore frequente. I valori delle caratteristiche meccaniche di progetto al limite superiore ($UBDP$) e al limite inferiore ($LBDP$) di un isolatore attritivo a scorrimento a superficie curva devono tener conto dei seguenti fattori di variazione su ogni proprietà:

- f_1 : invecchiamento;
- f_2 : temperatura variabile tra T_U e T_L ;
- f_3 : tolleranza del $\pm 20\%$ nelle prove di controllo di produzione in fabbrica;

Secondo la EN 1998-2 (CEN, 2005), l'effetto di ogni fattore innanzi detto (f_i) su ciascuna delle proprietà meccaniche del dispositivo deve essere valutato comparando il massimo e il minimo valore ($maxDP_{f_i}$ e $minDP_{f_i}$) delle proprietà di progetto, affetti dall'influenza dei fattori f_i , con il massimo e il minimo valore nominale ($maxDP_{nom}$ e $minDP_{nom}$), rispettivamente, delle stesse proprietà misurate nei test di tipo (Type Test). I seguenti rapporti dovrebbero essere stabiliti per portare in conto l'influenza di ciascun fattore f_i sul valore di progetto investigato.

$$\lambda_{max,fi} = maxDP_{fi} / maxDP_{nom} \quad (1)$$

$$\lambda_{min,fi} = minDP_{fi} / minDP_{nom} \quad (2)$$

L'effettivo $UBDP$ da utilizzare in progetto dovrebbe essere stimato come segue (EN 1998-2):

$$UBDP = maxDP_{nom} \cdot \lambda_{U,fi} \cdot \lambda_{U,f2} \cdot \lambda_{U,f3} \quad (3)$$

$$con \lambda_{U,f1} = 1 + (\lambda_{max,fi} - 1) \cdot \psi_i \quad (4)$$

I fattori di combinazione ψ_i portano in conto la riduzione della probabilità della simultanea presenza degli effetti che massimizzano le variazioni positive delle proprietà meccaniche e dovrebbe essere assunto, secondo l'EC8 (CEN, 2005) in accordo alla classe di importanza e della struttura, in conformità all'Eurocodice 1998-2 (EC08), appendice J, paragrafo J2 "Combination factors". La UNI EN 15129 (CEN, 2018), invece, stabilisce che il fattore di combinazione delle tre

sudette grandezze debba essere assunto pari a 0,7 e che il rapporto tra i valori rappresentativi del limite superiore ed inferiore di qualsiasi caratteristica prestazionale di un isolatore a scorrimento a superficie curva, non superi il valore di 1,8. L'effettivo LBDP da utilizzare in progetto e i relativi fattori $\lambda_{L,fi}$ possono essere, in generale, determinati in analogia a quanto visto per l'UBDP.

2 DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI DI PROGETTO PIU' SFAVOREVOLI DI UPPER E LOWER BOUND

In Tabella 1 è stata definita la condizione di progetto (*CdP*), indicata con P1, che utilizza il valore nominale del coefficiente d'attrito $\mu=0.027$. Tale condizione è assunta come riferimento al fine di valutare la variazione della risposta dinamica nei modelli di *Upper e Lower Bound* per effetto delle variazioni $\Delta\mu$ dell'attrito. A partire da detta condizione, nell'ipotesi di utilizzo di dispositivi a scorrimento in PTFE sia lubrificati che non, sono state applicate le indicazioni dalla normativa europea EC08, determinando, attraverso la combinazione dei fattori $\lambda_{max,fi}$ e $\lambda_{min,fi}$, funzione dell'invecchiamento, della temperatura e fornitura, i valori di n.6 *UBDP* e n.6 *LBDP* rappresentative delle caratteristiche meccaniche del sistema di isolamento nelle ipotesi di servizio più sfavorevoli.

I coefficienti $\lambda_{max,f1}$ relativi all'invecchiamento di PTFE Lubrificato e non si riferiscono a condizioni ambientali normali e di dispositivo sigillato e sono state dedotte dalla Tabella J.5 riportata nell'Appendice J della UNI EN 15129 (CEN, 2018). L'invecchiamento determina generalmente incrementi dell'attrito e pertanto nella combinazione di lower bound si assumeranno sempre $\lambda_{min,f1}=1$.

I valori dei coefficienti $\lambda_{max,f2}$ relativi all'influenza del limite superiore di temperatura di esercizio T_U , sono stati fissati in accordo alla Tabella J.5 riportata nell'Appendice J della UNI EN 15129 (CEN, 2018) ed in funzione di $T_{min,b}$, che rappresenta la temperatura minima dell'isolatore, funzione dell'ubicazione (per i siti di L'Aquila e Napoli) Tabella J.1 dell'Appendice J della EN 1998-2.

La norma EN15129 prevede che i valori dei coefficienti $\lambda_{min,f2}$ relativi all'influenza del limite inferiore di temperatura di esercizio T_L , assumano valori unitari. Tuttavia, nelle condizioni di progetto *LBDP* indicate con la sigla P5 (Tabella 1) i valori dei coefficienti $\lambda_{min,f2}$ sono stati

diversamente definiti sulla base di evidenze sperimentali (Quaglini et al. 2012), le quali danno evidenza di variazioni in riduzione dell'attrito in funzione della temperatura.

I valori dei coefficienti $\lambda_{max,f3}$ e $\lambda_{min,f3}$, utilizzati per rappresentare la variabilità dell'attrito μ nell'ambito della fornitura, sono stati assunti facendo riferimento all'analisi di dati sperimentali ricavati nell'ambito delle prove di tipo (*TT*) e di controllo di produzione in fabbrica (*FPCT*), svolte per la marcatura *CE* (Ponzo et al. 2017), (Barone et al. 2017).

La variabilità del raggio di curvatura *R* nell'ambito della fornitura è stata, invece, trascurata in quanto, come dimostrato statisticamente, i valori massimi di variabilità sono sempre contenuti in un range del $\pm 10\%$ (Ponzo et al. 2017).

L'influenza della contaminazione, intesa come condizione di esposizione delle superfici scorrevoli del dispositivo (presenza di sigillatura, orientamento delle superficie etc), è stata volutamente trascurata in quanto non fondamentale ai fini del presente studio.

Ulteriori n. 2 condizioni di progetto (*CdP*), indicate con P2.1 e P2.2 in Tabella 1, sono state definite per rappresentare le condizioni di *upper e lower bound*, nelle condizioni di variazione dell'attrito pari esattamente a $\Delta\mu=\pm 20\%$, considerando la variabilità nell'ambito della sola fornitura rispetto al valore nominale rappresentato nella condizione P1. Come si può osservare dalla Tabella 1 la variabilità del coefficiente d'attrito è maggiore in condizioni di *UBDP* e nel caso di superfici lubrificate, in cui si ipotizzano incrementi fino al +77% (condizione di progetto P4.1L); viceversa nei casi di *LBDP* si rileva una riduzione massima del coefficiente d'attrito nel caso P5.2L in cui la combinazione dei fattori sperimentali legati sia alla fornitura e sia all'influenza della temperatura (Quaglini et al. 2012) restituisce un valore di *LBDP* pari a -29%.

Tabella 1: Condizioni di progetto in funzione del materiale di scorrimento e delle condizioni di servizio - modelli 1gdl.

Condizioni di progetto (CdP)	N. modelli	Coefficienti λ				μ	Variazione $\Delta\mu$ rispetto a P1
		Invecchiamento $\lambda_{max,f1} - \lambda_{min,f1}$	Temperatura $\lambda_{max,f2} - \lambda_{min,f2}$	Fornitura $\lambda_{max,f3} - \lambda_{min,f3}$			
P1	P1	1	-	-	-	0.027	0%
P2	P2.1	2	-	-	1.2	0.033	+20%
	P2.2	3	-	-	0.8	0.022	-20%
P3	P3.1 NL	4	1.10	1.09	1.20	0.035	+30%
	P3.2 NL	5	1.00	1.01	0.80	0.024	-13%
	P3.1 L	6	1.30	1.23	1.20	0.044	+60%
	P3.2 L	7	1.00	1.00	0.80	0.023	-14%

P4	P4.1 NL	8	1.10	1.09	1.37	0.040	+43%
	P4.2 NL	9	1.00	1.01	0.70	0.022	-20%
	P4.1 L	10	1.30	1.23	1.37	0.048	+77%
	P4.2 L	11	1.00	1.00	0.70	0.021	-21%
P5	P5.1 NL	12	1.10	0.97	1.37	0.036	+32%
	P5.2 NL	13	1.00	0.86	0.70	0.019	-29%
	P5.1 L	14	1.30	0.97	1.37	0.041	+49%
	P 5.2 L	15	1.00	0.86	0.70	0.019	-29%

NL=non lubrificato; L=lubrificato.

3 ANALISI SPEDITIVA DELLA RISPOSTA STRUTTURALE SU MODELLI AD 1 GDL

Per ciascuna condizione di progetto di Tabella 1 sono stati generati, mediante OpenSees®, n.15 modelli numerici ad un grado di libertà, tipo *Single Friction Pendulum Bearing Element*, caratterizzati dal legame *Coulomb Friction*, ai quali sono stati attribuiti i valori di attrito μ riportati nella penultima colonna di Tabella 1. L'input sismico utilizzato è riferito al sito di L'Aquila ed è rappresentato da quattro set (uno per ogni stato limite considerato) composti da n.20 coppie di accelerogrammi x e y ciascuno, estratti dal database ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it>). Dette coppie di accelerogrammi, per gli stati limite SLO, SLD, SLV, SLC, risultano spettrocompatibili con i Conditional Mean Spectra (CMS) (Baker 2011), associati alle Intensity Measure IM3, IM4 IM5 IM6 rispettivamente. Sono state effettuate n.20 analisi bidirezionali per ciascuno stato limite e per ciascun modello di Tabella 2, per il sito di L'Aquila. In totale sono state effettuate $15(\text{modelli}) \times 4(\text{SL}) \times 20(\text{coppie di acc.mmi}) = 1200$ analisi. La risposta dei modelli di upper bound (con $\Delta\mu > 0\%$) e di lower bound (con $\Delta\mu < 0\%$) di Tabella 1 è stata confrontata con quella del modello di riferimento P1. Per ciascuno stato limite, e per ogni modello caratterizzato dai valori di attrito riportati nella colonna sette di Tabella 1, è stato calcolato lo spostamento medio d_{med_SL} ottenuto come media degli spostamenti massimi $d_{max_i_SL}$, per $i=1,..,20$, dove i è l'indice degli accelerogrammi. In Figura 1 è rappresentato l'andamento dello spostamento medio del sistema di isolamento d_{med_SLC} relativo allo stato limite di collasso analizzato per le 15 condizioni di progetto considerate. Le condizioni di LBDP determinano sistematicamente un incremento della domanda di spostamento e nei casi P5.2L e P5.2NL, caratterizzati entrambi da una riduzione dell'attrito $\Delta\mu = -29\%$, lo spostamento medio d_{med_SLC} risulta maggiore della massima capacità di spostamento d_{Ed} dichiarata per il dispositivo utilizzato.

Al contrario, le condizioni di UBDP determinano sempre una riduzione della domanda

di spostamento del sistema di isolamento e non costituiscono una condizione sfavorevole in termini di verifica del sistema stesso.

Per evidenziare le tendenze degli effetti prodotti dalla variazione $\Delta\mu$ del coefficiente d'attrito, un ulteriore confronto, esteso a tutti gli stati limite considerati, è stato espresso in termini di variazioni percentuale dello spostamento medio Δd_{med_SL} del sistema di isolamento e della forza massima alla base ΔF_{med_SL} .

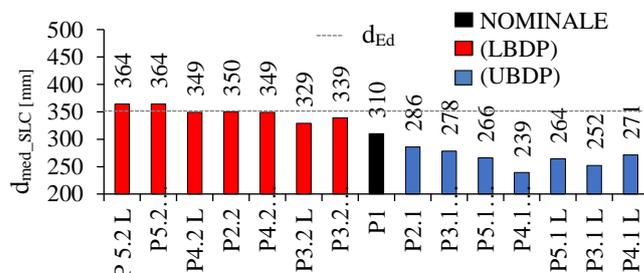


Figura 1. Valori dello spostamento medio d_{med_SLC} .

In particolare Δd_{med_SL} è calcolata come variazione tra la media degli spostamenti massimi del singolo modello e la media degli spostamenti massimi del modello di riferimento P1. Detti parametri di variazione sono stati valutati, mediante le espressioni (5) e (6), rispetto alla condizione di progetto nominale P1 e rappresentati graficamente in Figura 2 e Figura 3.

$$\Delta d_{med_SL} = \frac{media(d_{max_i}) - media(d_{max_i_P1})}{media(d_{max_i_P1})} \quad (5)$$

$$\Delta F_{med_SL} = \frac{media(F_{max_i}) - media(F_{max_i_P1})}{media(F_{max_i_P1})} \quad (6)$$

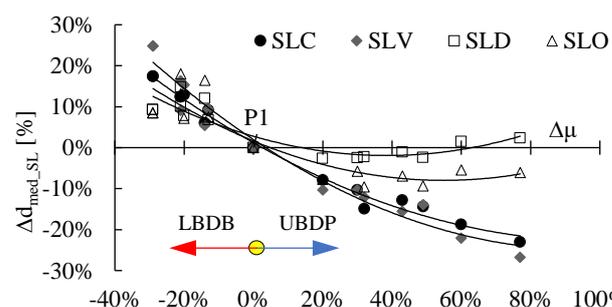


Figura 2. Variazione Δd_{med_SL} dello spostamento medio in funzione della variazione di attrito $\Delta\mu$.

I diagrammi di Figura 2 consentono una quantificazione preliminare dell'incremento o decremento della domanda di spostamento massimo a livello del sistema di isolamento in funzione della variazione di attrito. Per variazioni negative di attrito si osserva un incremento pressoché lineare della risposta, che allo SLC può essere stimata in un valore pari a circa $\Delta d_{med_SLC} = 15\%$ per un $\Delta\mu = -20\%$.

Per variazioni positive dell'attrito, si nota, invece, una riduzione delle risposta più marcata

per SLV e SLC, mentre allo SLO e SLD gli effetti sembrano essere trascurabili. In Figura 3 si osserva, invece, che la variazione della forza massima alla base, nelle condizioni di stati limite SLV e SLC, risulta poco influenzata da $\Delta\mu$. La stessa variazione ΔF_{med_SLD} e ΔF_{med_SLO} , invece, è sensibilmente influenzata da $\Delta\mu$, con incrementi che variano quasi linearmente in funzione della variazione dell'attrito (20% per $\Delta\mu=+20\%$ fino al 60% per $\Delta\mu\approx+80\%$).

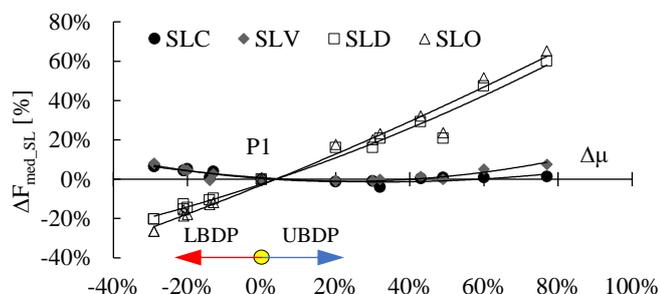


Figura 3. Variazione F_{med_SL} della della forza media di reazione alla base in funzione della variazione di attrito $\Delta\mu$.

4 VERIFICHE DI RIGIDEZZA SULLA SOVRASTRUTTURA MEDIANTE ANALISI DINAMICHE NON LINEARI SU MODELLI NUMERICI 3D

Le analisi eseguite nelle condizioni di UBDP sui modelli semplificati ad 1 gdl hanno fornito l'evidenza che allo SLD l'incremento di forza massima alla base, per valori di attrito $\Delta\mu>0$, può rapidamente raggiungere valori tali da determinare effetti significativi ai fini delle verifiche nella sovrastruttura. A tale scopo le indagini sono state ampliate considerando modelli numerici 3D generati mediante software OpenSees®, di due edifici in c.a isolati alla base con n. 24 dispositivi attritivi a superfici di scorrimento curve, progettati ai sensi delle NTC2018, uno per il sito di Napoli e l'altro per il sito di L'Aquila (Cardone et al. 2017). Per valutare la risposta degli edifici al variare delle caratteristiche meccaniche del sistema di isolamento, sono stati adottati i medesimi coefficienti di attrito assunti nel capitolo precedente per oscillatori a 1 gdl. In questo caso, come parametro di controllo, è stato considerato l'incremento di spostamento interpiano rispetto alla condizione di attrito nominale. Le analisi sono state effettuate solo per le condizioni di $\Delta\mu>0$ (solo *Upper bound*).

Dalle due condizioni di progetto nominali P1 con $\mu=3.8\%$ e $\Delta\mu=0$, per i siti di Napoli e L'Aquila, sono state, quindi, generate rispettivamente n.4 condizioni di progetto, descritte in Tabella 2.

La sovrastruttura considerata è costituita da un sistema intelaiato in c.a., composto da sei piani identici fra loro con superficie approssimativa di 240 m². I solai hanno tutti uno spessore di 25cm, orditi nella direzione maggiore in pianta. I materiali utilizzati sono calcestruzzo classe C28/35 e acciaio B450C per ferri di armatura. Il modello scelto per travi e pilastri in c.a. è quello di *Ibarra-Medina-Krawinkler*. I modelli numerici sono privi di tamponature. Per simulare il comportamento dei dispositivi di isolamento è stato adottato un modello numerico dipendente dalla velocità e dal carico verticale tipo *VelNormalFrcDep* (Constantinou 1990). Le caratteristiche fondamentali dei dispositivi di isolamento sismico sono riportati in Tabella 3. Per ciascun sito (Napoli e L'Aquila) è stato utilizzato un set di 20 accelerogrammi, combinati opportunamente in entrambe le direzioni x e y, estratti dal database ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it>). Dette coppie di accelerogrammi, per lo stato limite di danno SLD, risultano spettrocompatibili con il Conditional Mean Spectrum (CMS) (Baker 2011), associato alla Intesity Measure IM3 ($Sa(Te)_{IM3}$). Complessivamente sono state effettuate n.20 analisi bidirezionali allo stato limite di danno SLD per ciascun modello di Tabella 2.

Tabella 2: Condizioni di progetto - modelli 3D.

Condizioni di progetto		$\Delta\mu$	μ (L'Aquila)	μ (Napoli)
Nominale	P1	0.0%	3.8%	3.8%
UBDP	P2.1	+20.0%	4.6%	4.6%
UBDP	P3.1NL	+30.0%	4.9%	4.9%
UBDP	P4.1NL	+43.0%	5.4%	5.4%
UBDP	P4.1L	+77.0%	6.7%	6.7%

Tabella 3: Caratteristiche dei dispositivi CSS.

	SLC	L'Aquila	Napoli
R_e	[mm]	3700	2500
N_{Ed}	[kN]	1500	1500
N_{Sa}	[kN]	900	900
μ_{nom}	[%]	3.8	3.8
d_{Ed}	[mm]	±350	±150

Nel caso di tamponature fragili collegate rigidamente alla struttura e che interferiscono con la deformabilità della stessa, le NTC2018 (§ 7.3.11a) prevedono che la verifica di rigidezza (RIG) sulla sovrastruttura si ritenga soddisfatta qualora le conseguenti deformazioni degli elementi strutturali siano inferiori ai limiti indicati nel seguito:

$$d_{max}/h \leq 0,0050 \quad (7)$$

- h è l'altezza interpiano;
- d_r rappresenta il drift di interpiano

Per ognuna delle 20 analisi dinamiche non lineari, è stato selezionato il massimo drift interpiano denominato $d_{r_{max}i/h}$. In Figura 4 sono riportati gli andamenti dei drift massimi $d_{r_{max}i/h}$ in funzione della variazione di attrito. Per $\Delta\mu=0\%$, (condizione P1), la media drift è pari a 0.4% nel caso L'Aquila e 0.3% nel caso Napoli.

Come si può notare dalla Figura 4 e Figura 5, nel caso dell'Aquila variazioni positive dell'attrito superiori a circa il 35% del valore nominale determinino una condizione di superamento, in termini di media dei drift massimi, dei valori consentiti dalla norma. Nel caso di Napoli, invece, essendo la struttura progettata considerando sostanzialmente i minimi di norma, relativamente alle dimensioni degli elementi strutturali e dei quantitativi di armatura, ed essendo la sismicità dell'area inferiore a quella dell'Aquila, l'intero sistema strutturale dimostra risorse superiori anche in termini di capacità di contenimento dei massimi drift.

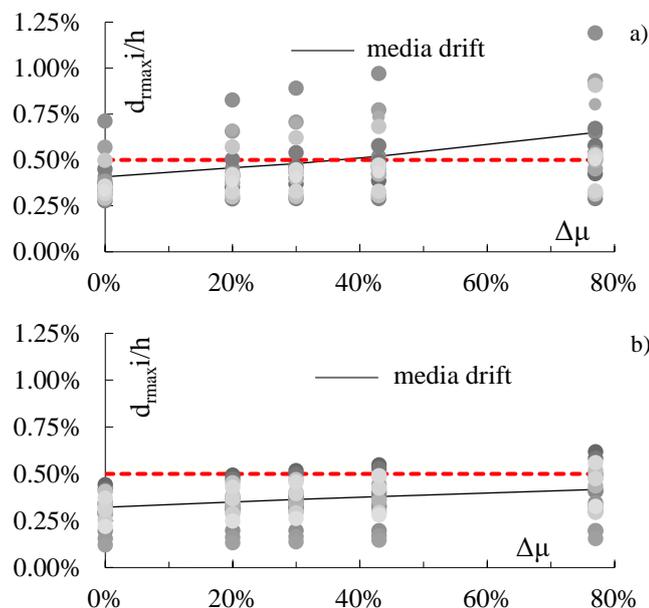


Figura 4. Drift massimi di interpiano $d_{r_{max}i/h}$ in funzione di $\Delta\mu$: a) caso L'Aquila; b) caso Napoli.

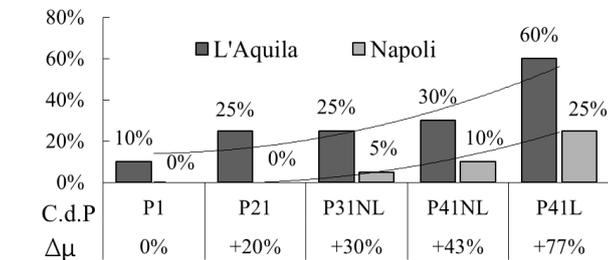


Figura 5. Percentuale di valori di $d_{r_{max}i/h}$ che non verificano lo stato limite di danno.

Per ciascuna analisi dinamica effettuata, il drift massimo $dr_{max,\Delta\mu_i/h}$ ricavato è stato normalizzato rispetto al drift massimo $dr_{max,P1_i/h}$, calcolato sul modello di riferimento P1. Detti valori, valutati mediante l'espressione (8) e definiti come Δdr_{max} , rappresentano il fattore di incremento del drift

massimo interpiano al variare di $\Delta\mu$. In entrambi i casi considerati, la tendenza media evidenzia un andamento pressoché lineare, per cui all'aumentare del coefficiente d'attrito aumenta la domanda di drift interpiano (Figura 6).

$$\Delta dr_{max} = (dr_{max,\Delta\mu_i/h}) / (dr_{max,P1_i/h}) \quad (8)$$

$$\Delta Dr_{max} = (dr_{max,\Delta\mu_i/h}) / (dr_{max,P1_{medio}/h}) \quad (9)$$

Operando in modo analogo, utilizzando l'espressione (9), i valori di drift massimo $dr_{max,\Delta\mu_i/h}$ sono stati normalizzati al valore medio dei drift massimi ($dr_{max,P1_{medio}/h}$) ricavati sul modello di riferimento P1. L'andamento di detti valori normalizzati, definito $\Delta Dr_{max}/h$, è rappresentato in Figura 7.

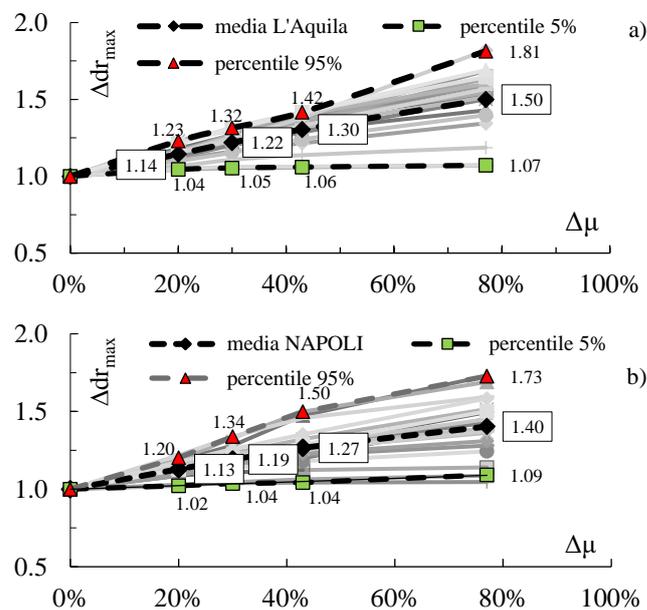


Figura 6. Coefficienti amplificativi dei drift massimi Δdr_{max} : a) L'Aquila; b) Napoli.

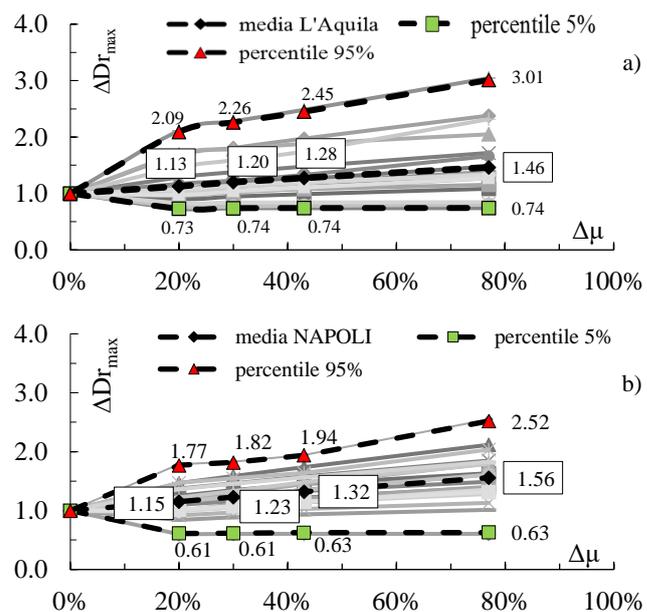


Figura 7. Coefficienti amplificativi dei drift massimi ΔDr_{max} : a) L'Aquila; b) Napoli.

Occorre specificare che gli andamenti, in funzione di $\Delta\mu$, dei valori medi di $\Delta d_{r_{max}}$ e $\Delta D_{r_{max}}$ (Figura 6 e Figura 7), quali coefficienti amplificativi del drift massimo interpiano, risultano pressoché equivalenti, indipendentemente dal sito di riferimento.

Tuttavia la maggiore dispersione dei valori di $\Delta D_{r_{max}}$, rappresentata in termini di percentili al 5% e 95%, rispetto alla dispersione di $\Delta d_{r_{max}}$ è solo determinata dalla variabilità dell'input sismico. Per chiarire meglio questo concetto in Figura 8 sono rappresentate le curve di distribuzione Gaussiana dei coefficienti amplificativi dei drift per i modelli *upper bound* con $\Delta\mu=77\%$.

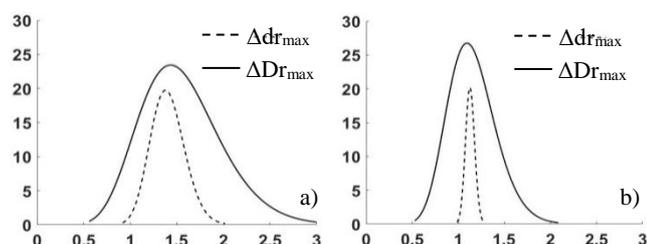


Figura 8. Distribuzione gaussiana dei coefficienti amplificativi dei drift $\Delta d_{r_{max}}$ e $\Delta D_{r_{max}}$ relative alla condizione di progetto con $\Delta\mu=77\%$: a) caso L'Aquila; b) caso Napoli.

5 CONCLUSIONI

Applicando l'approccio Upper e Lower Bound previsto dalle norme europee è stato investigato un range di variazione del coefficiente d'attrito compreso tra -29% e $+77\%$ rispetto alle condizioni nominali. Allo stato limite di collasso (SLC) una variazione media $\Delta\mu=-20\%$ comporta un incremento della domanda di spostamento nel sistema di isolamento mediamente pari al $+13\%$. Nel caso più sfavorevole di LBDP, in cui l'attrito varia del -29% , lo spostamento massimo del sistema di isolamento aumenta mediamente del 17.4% . Nella condizione più sfavorevole di UBDP, allo stato limite di collasso, ad incremento dell'attrito del $+77\%$ si stima una riduzione media dello spostamento alla base del -23% ed un incremento trascurabile della tagliante sismica dell'ordine del 1% . Dalle analisi condotte su due modelli 3D allo stato limite di danno emerge che a variazioni dell'attrito nominale $\Delta\mu$ del $+20\%$, $+30\%$, $+46\%$, $+77\%$ nel caso di L'Aquila corrispondono incrementi medi del drift di piano pari al $+14\%$, $+22\%$, $+30\%$ e $+50\%$, rispettivamente. Nel caso di edificio progettato a Napoli si riscontrano incrementi medi del drift analoghi al caso di L'Aquila. Affinché il progettista possa analizzare le condizioni di progetto più sfavorevoli, per ciascuno stato limite

considerato, così come richiesto dal D.M. 17.01.2018, è necessario che i software di calcolo e verifica strutturale siano programmati per applicare l'approccio Upper e Lower Bound, ovvero che possano tenere in conto, oltre alla variabilità delle azioni, anche la variabilità delle proprietà del sistema di isolamento.

6 RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito del Progetto ReLUIS-DPC 2019/2021 (Work Package 15, Contributi Normativi per Isolamento e Dissipazione). Gli autori ringraziano il Dipartimento della Protezione Civile per il supporto finanziario ricevuto.

REFERENZE

- AASHTO, 2009. Guide Specifications for Seismic Isolation Design. *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington*.
- Baker, J.W. 2011. Conditional Mean Spectrum: Tool for ground motion selection, *Journal of Structural Engineering*.
- Barone, S, Pavese, A, Calvi, GM, 2017. Experimental dynamic response of spherical friction-based isolation devices. *Journal of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1080/13632469.2017.1387201.
- Cardone, D., Conte, N., Dall'Asta, A., Di Cesare, A., Flora, A., Leccese, G., Mossucca, A., Micozzi, F., Ponzio, F.C., Ragni, L., 2017. RINTC project: Nonlinear analyses of Italian code-conforming base-isolated buildings for risk of collapse assessment. *COMPADYN 2017 - Proceedings of the 6th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Rhodes Island, Greece, 15–17 June 2017.
- CEN, 2018. Comité Européen de Normalisation TC 340, European Code UNI EN 15129:2018 Anti-seismic devices, *European Committee for Standardization, Brussels, Belgium*.
- CEN. 2005. Eurocode 8: Design of structures for earthquake Resistance-Part 2: Bridges *Brussels: European Committee for Standardization*.
- Constantinou MC, Mokha A, Reinhorn A 1990. Teflon bearings in base isolation. II: modeling. *Journal of Earthquake Engineering, Vol 116(2), 455 - 474*.
- Constantinou, M.C., Tsopelas, P., Kasalanati, A., and Wolff, E. 1999. Property Modification factors for seismic isolation bearings, *Technical Report MCEER-99-0012, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York*.
- D.M. 17/01/2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. D.M. 17/01/2018, *Gazzetta Ufficiale 20/02/2018, Italia*.

OpenSees®. Open System for Earthquake Engineering Simulation Pacific Earthquake Engineering Research Center. Available from <http://opensees.berkeley.edu>

Ponzo F.C., Mossucca A, Nigro D, Nigro A, Di Cesare A, Leccese G, 2017. Analisi della risposta sperimentale dei dispositivi per l'isolamento sismico ottenuta da prove di qualificazione di prodotto e di controllo di accettazione e chiarimenti relativi ai contenuti delle norme vigenti (D.M. 17.01.2018 e UNI EN15129). *Rapporto Tecnico Progetto di Ricerca DPC-ReLUIIS 2017 Linea 6 Isolamento e Dissipazione.*

Quaglini, V., Dubini, P., Poggi, C. 2012. Experimental assessment of sliding materials for seismic isolation systems. *Bulletin of Earthquake Engineering.*