

WP 11 – Contributi normativi relativi a Costruzioni Esistenti in Cemento Armato

Unità di Ricerca: Università degli Studi dell'Aquila - Responsabile Scientifico: Prof. Amedeo Gregori - Task 11.1

Analisi di sensitività di parametri modalì di un nodo Trave-Colonna in C.A. soggetto a danneggiamento progressivo sotto carichi ciclici

Amedeo Gregori, Lorenzo Bizzarri, Caterina D'Agostino, Angelo Aloisio, Riccardo Cirella, Rocco Alaggio

Abstract Lo studio teorico e sperimentale si è incentrato sulla graduale modifica dei parametri modalì di trave-colonna in C.A. sottoposti a un danneggiamento progressivo sotto carico ciclico. Come spesso riscontrato nelle strutture degli anni '70, i campioni sperimentali erano privi di specifiche armature a taglio nel pannello modale. I parametri modalì di trave-colonna sono stati utilizzati per prove di identificazione modale. In particolare, sono state eseguite le classiche tecniche con ampiezze crescenti e sono stati valutati i parametri modalì del campione in vari stadi di degrado del telaio. Stabilendo una correlazione tra le variazioni dei parametri modalì e gli indicatori meccanici del danno strutturale, questo studio ha permesso di approfondire l'utilità delle misure di vibrazione ambientale nella valutazione della salute strutturale di telai in C.A. e soprattutto nella caratterizzazione meccanica dei nodi trave-colonna.

SETUP E TEST SPERIMENTALE

Il tipo di campione esaminato in questo studio è un giunto a T in calcestruzzo armato, come esempio di tipica modale di telai in calcestruzzo armato tipico di edifici reali degli anni '70 [33]. Posizionato su un piano orizzontale, il provino è stato inserito su un telaio di carico in acciaio fissato saldamente al pavimento, come mostrato in figura 1 e in figura 2. In particolare, l'estremità sinistra "A" è fissata da un vincolo di carrello, mentre l'estremità inferiore "B" è sostenuta da un vincolo a cerniera. Si noti che il campione rappresenta solo una parte di un telaio reale. In particolare, le estremità "A", "B" e "C" del provino corrispondono alla metà della lunghezza della trave e della colonna di un telaio completo, dove di solito si trovano i punti di inflessione con Me=0 quindi si considerano i carichi simici. Per questo motivo, non si è seguita l'ipotesi di un appoggio fisso ed è stata invece considerata quella di un appoggio a cerniera. L'immagine in figura 2 presenta il provino reale testato, offrendo una visione parziale del setup sperimentale. La figura 1 illustra anche le dimensioni geometriche e i dettagli di rinforzo del provino. Sia la trave che la colonna sono caratterizzate da una sezione trasversale di 300 x 500 mm², con un'altezza complessiva della colonna di 2300 mm e una lunghezza totale della trave di 2500 mm. Inoltre, è presente una trave trasversale con un'area trasversale di 300 x 500 mm² e che si estende per 600 mm dalla faccia della colonna. Questa trave trasversale è stata introdotta per replicare più accuratamente la geometria dei telai in cemento armato che si trovano all'angolo di edifici esistenti comuni, in modo da considerare l'influenza di una trave ortogonale al telaio. L'armatura della colonna è costituita da barre nervate in acciaio da 4φ24 mm disposte longitudinalmente lungo entrambi i lati corti della sezione. Per quanto riguarda la trave, sono state adottate barre nervate da 2φ24mm più 3φ20mm come armatura longitudinale (su entrambi i lati corti della sezione). L'armatura della trave corta ortogonale al telaio consisteva in una singola barra nervata longitudinalmente da 4φ16 in cemento armato. L'armatura trasversale della colonna della trave comprendeva staffe di 10 mm di diametro poste a intervalli di 100 mm. Le staffe sono state deliberatamente escluse dallo spazio del giunto per ridurre la resistenza e quindi indurre una rottura a taglio nel giunto prima del raggiungimento, durante i carichi simici simulati, dello sovraccarico delle armature sia nella trave che nei tratti di colonna confluenti nel nodo.

Per misurare lo spostamento principale del telaio sono stati utilizzati due trasduttori di spostamento lineari variabili (LVDT). Sono stati posizionati rispettivamente uno all'estremità superiore "C" della colonna (figura 1) e uno allineato con l'asse principale della trave, all'estremità sinistra "A" della trave (figura 1). Per entrare il carico ciclico in procedura controllata dallo spostamento, all'estremità "C" della colonna è stato applicato un attuatore azionato elettricamente con una capacità di 500 kN. Mentre per registrare la forza resistita dalla struttura è stata utilizzata una cella di carico con capacità di 500 kN. Maggiori dettagli sull'impiego dei sensori sono riportati in figura 3. In particolare, sono mostrati un totale di sei accelerometri a bilanciamento di forza, il loro posizionamento strategico (mostrato anche nella figura 6(a)) è stata decisa per catturare il comportamento dinamico del provino attraverso la prova di vibrazione ambientale (AVT) con l'obiettivo di ottenere una valutazione approfondita della progressione del danno all'interno del provino. In particolare, la catena di misura accelerometrica ad array digitale include i convertitori SLO6 e accelerometri FFA10 prodotti da Sara Electronics Instruments (Italia). L'accelerometro ha una gamma dinamica superiore a 165 dB da 0.1 Hz a 200 Hz con 1 g di fondo scalo. D'altra parte, la gamma dinamica del convertitore digitale è di 144 dB, per cui la sensibilità è limitata da quella del sensore, che è inferiore. Di conseguenza, la sensibilità del sensore è di 0,119 g/mg. Gli accelerometri sono stati disposti in due catene di misura, ciascuna guidata da un'unità di registrazione master connessa a un punto di accesso Wi-Fi e sincronizzata da ricevitori GPS ricevitori GPS. Per quanto riguarda i materiali utilizzati per la preparazione dei provini, il calcestruzzo è stato caratterizzato da una resistenza media alla compressione di 29,3 MPa e le barre di rinforzo in acciaio da una resistenza allo snervamento di 450 MPa rispettivamente. Altre proprietà meccaniche dei materiali utilizzati sono riportate nella successiva tabella 1.

Per analizzare in modo esaustivo il comportamento meccanico e la variazione dei parametri modalì del telaio in calcestruzzo armato, l'indagine sperimentale di questo studio ha compreso diverse attività. In particolare, è stata eseguita una procedura di carico ciclico quasi statico sul telaio in calcestruzzo armato applicando una sequenza di spostamenti ciclici quasi-statici di ampiezza crescente Da all'estremità libera superiore "C" della colonna. La sequenza di carico adottata fa riferimento alla norma ACI 374.1 (2005) (come mostrato in figura 4) e la procedura di carico consistente in diverse serie di spostamenti volti a produrre un danno progressivo sugli elementi del telaio: ogni serie comprendeva tre cicli identici impostati in intensità. Nessun carico assiale è stato applicato alla colonna in direzione "BC", riducendo così qualsiasi influenza positiva sulla capacità di taglio del giunto [34]. I cicli di isteresi ottenuti sono rappresentati in figura 5 in termini di forza di taglio forza di taglio T resistita dal telaio rispetto allo spostamento completo D. Nello stesso grafico sono stati numerati alcuni cicli di isteresi sono stati numerati per confrontare successivamente i risultati sperimentali con quelli ottenuti dall'analisi numerica (si veda la sezione 5).

Al termine di una prova specifica di cicli e quindi in vari stadi del progressivo danneggiamento del telaio (quelli numerati nella figura 5), sono state eseguite prove di vibrazione ambientale (AVT) prima di riprendere con i gruppi di cicli successivi. In particolare, la figura 6(a) illustra la configurazione quasi statica del test di configurazione di prova quasi statica, mostrando il posizionamento del punto di carico, dei vincoli applicati al telaio RC e dei 6 accelerometri. Le prove di vibrazione ambientale (AVT) sono state condotte utilizzando un "martello" per attivare le vibrazioni del telaio. Gli studi di danno selezionati per l'esecuzione delle AVT sono stati basati sui valori di spostamento massimo vari massimi di spostamento aggiunti durante le prove quasi statiche. Per ogni prova di vibrazione ambientale, la durata dell'acquisizione è stata di circa 10 minuti, con una frequenza di campionamento di 200 Hz. Accettando i risultati delle prove quasi statiche con quelli delle prove di vibrazione ambientale, è stato possibile analizzare i risultati delle prove di vibrazioni ambientali, è stata effettuata un'indagine sul progressivo danneggiamento del telaio RC. Più in particolare, l'indagine si è concentrata sull'interazione tra le variazioni dei parametri modalì e la riduzione della rigidezza del telaio dovuta al carico ciclico incrementale.

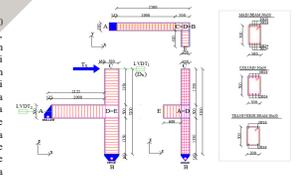


Figura 1 Varie viste del provino con dettagli su geometria e armatura.



Figura 2 Assemblaggio di prova.

Tabella 1. Proprietà meccaniche del calcestruzzo e delle barre di acciaio

Concrete						
f_c (MPa)	f_{ct} (MPa)	E_{cm} (MPa)	γ_c (N/mm ²)	ν_c	G_c (N/m ²)	
29.3	2.85	30373	2.5 E-3	0.2	0.05	
Steel						
f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (MPa)	γ_s (N/mm ²)	ν_s	ϵ_{yk} %	ϵ_{tk} %
450	540	210000	7.85 E-3	0.29	2.14	75



Figura 3 Layout sperimentale con vista dei dispositivi di misura.

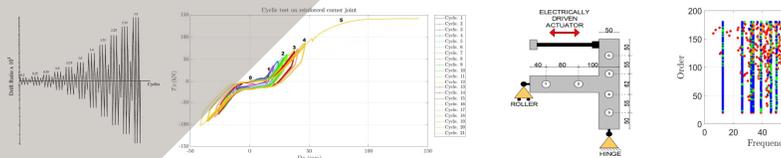


Figura 4 Protocollo di prova ACI 374.1 (2005)

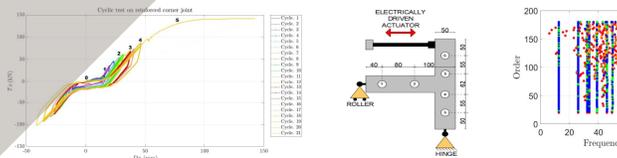


Figura 5 Forze e spostamenti registrati durante il carico ciclico. Numerazione delle misure AVT.

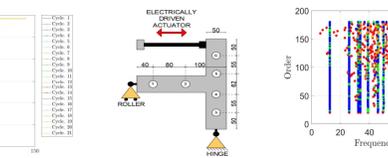


Figura 6(a) Setup sperimentale AVT

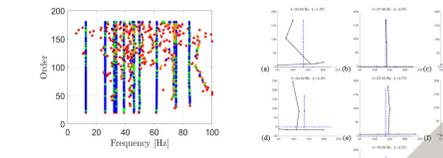


Figura 6(b) Diagramma di stabilizzazione riferito allo studio 0 (stadio non danneggiato del provino).

I dati della tabella 2 consentono un'analisi comparativa dei parametri dinamici misurati, offrendo relazione tra il danno strutturale e la risposta dinamica del campione. Per ogni livello di danno, la tabella elenca i valori delle frequenze naturali del telaio in Herz (Hz). Poiché ogni frequenza naturale rappresenta la frequenza intrinseca alla quale la struttura tende a vibrare quando è eccitata, può servire come indicatore cruciale della risposta strutturale del telaio, soprattutto in termini di caratteristiche di rigidezza. Infatti, con il progredire del livello di danno, si osservano notevoli cambiamenti nelle frequenze naturali. Ad esempio, nel livello di danno 1, si registra un leggero aumento di f_1 , mentre nel livello di danno 4, si osserva una riduzione significativa di f_1 rispetto alla fase non danneggiata (0). Queste variazioni evidenziano l'impatto del danno sulle proprietà dinamiche proprie dinamiche strutturali del telaio testato.

Oltre alle frequenze naturali, la tabella presenta i valori di smorzamento (ζ) associati a ciascun livello di danno. Lo smorzamento riflette la capacità di dissipazione dell'energia della struttura e della struttura e influisce sul tasso di decadimento delle ampiezze di vibrazione. Le variazioni dei valori di smorzamento indicano alterazioni del comportamento di dissipazione dell'energia della struttura a causa del danneggiamento. In particolare, si osservano fluttuazioni nei valori di smorzamento tra i diversi livelli di danno. Ad esempio, nel livello di danno 4, ζ_1 presenta un rapporto di smorzamento più alto rispetto alla fase non danneggiata, indicando un aumento della dissipazione di energia. L'analisi dei risultati riportati nella tabella 2 consente di comprendere meglio la risposta strutturale risposta strutturale e la sua evoluzione con l'accumularsi del danno. Le variazioni osservate in questi parametri offrono spunti di riflessione sul progressivo degrado del telaio in calcestruzzo armato e aiutano a valutare l'integrità inegrità strutturale. Il primo modo, come si vede in figura 7, presenta la distorsione più pronunciata del giunto e questo è proprio il motivo per cui è stato individuato tra i vari altri modi: è stato scelto per indicare un'evoluzione tra le alterazioni nella risposta dinamica del telaio e l'accumularsi dei danni strutturali durante il carico ciclico progressivo. Infatti, il grafico in figura 8 (b) evidenzia una relazione tra la rigidezza residua K_i allo stadio di danno i , normalizzata rispetto al livello non danneggiato K_0 (come ottenuto dalla prova sperimentale di carico ciclico) e la frequenza residua del primo modo $f_{1,i}$ (misurata con la prova di vibrazione ambientale) normalizzata rispetto al livello non danneggiato $f_{1,0}$. L'approssimazione polinomiale, espressa dall'equazione $K = 0.9913 f_{1,i}^{1.933}$ si adatta bene ai dati sperimentali con $R^2 = 0.9478$. In effetti, il grafico di figura 8 (b) illustra come il progressivo danneggiamento del sistema dovuto a spostamenti ciclici si traduce in una graduale riduzione della rigidezza del telaio sia della sua prima frequenza naturale frequenza naturale.

MODELLI NUMERICI E RISULTATI

Oltre alla caratterizzazione dinamica e meccanica sperimentale del telaio in calcestruzzo armato testato, sono stati preparati ed analizzati diversi modelli agli elementi finiti (FEM). Questo ha consentito di investigare e comprendere meglio la relazione tra l'evoluzione del comportamento dinamico del telaio ed il suo progressivo danneggiamento strutturale indotto dai carichi ciclici. In particolare, sono state condotte analisi numeriche per replicare il setup sperimentale e determinare la prima frequenza naturale del sistema in ogni fase del danno progressivo. Per simulare il danneggiamento progressivo, il modulo di Young E è stato fatto variare in diverse parti della struttura modella strutturale. In particolare, sono stati simulati sei stadi di danno riducendo progressivamente il modulo di Young da 0% sino all'80% del suo valore di riferimento iniziale $E_0 = 30373$ MPa. I dettagli sui FEM considerati in questa sezione del lavoro sono illustrati in figura 9. In particolare, per replicare il meccanismo di trazione e punzone che avviene nel giunto trave-colonna, il nodo strutturale è stato modellato utilizzando due biele diagonali con cerniere alle estremità. Per quanto riguarda la trave principale "BG" e le due semicolonne "L6" e "8A", esse sono state modellate come elementi di telaio, ciascuno suddiviso in cinque segmenti. È stato inoltre modellato un vincolo di carrello all'estremità destra della trave, mentre è stata introdotta una cerniera all'estremità inferiore della colonna. Come già detto, i valori E assegnati a ciascun segmento della struttura sono stati gradualmente ridotti in base al grado di danno (lo stadio di danneggiamento) di quella interazione, che rappresenta un sistema integro, fino allo stadio di danno 5. Al fine di comprendere meglio il progressivo danneggiamento sperimentale subito dal telaio e per studiare l'impatto di diversi tipi di danno sulla riduzione della frequenza naturale totale del sistema, sette diverse modellazioni FEM del telaio sono state analizzate, ognuna delle quali caratterizzata da un particolare elemento strutturale interessato dal danno. Le FEM considerate sono elencate come segue:

- Modello "J": solo il giunto si danneggia progressivamente.
- Modello "C": solo la colonna si danneggia progressivamente.
- Modello "BC": sia il giunto che la colonna si danneggia progressivamente.
- Modello "B": solo la trave si danneggia progressivamente.
- Modello "B1": sia il giunto che la trave si danneggia progressivamente.
- Modello "BC1": tutti gli elementi della struttura sono progressivamente danneggiati.

I nomi delle FEM sono acronimi che indicano la specifica parte del telaio interessata da un danno progressivo, contribuendo così a stabilire una nomenclatura coerente del modello. Ad esempio, gli stadi (a), (b), (c) della figura 9 mostrano come sono stati realizzati i modelli da B0 a B2. In particolare, il modello B0 è uguale ai modelli J0, C0, C0, B0, BC, BC10 poiché tutti corrispondono allo stadio di danno 0, in cui l'intero sistema non è danneggiato. Quindi, si ritiene che il modello B1 rappresenti un danno strutturale che inizia nella trave e in prossimità del giunto e quindi E1 è assegnato al segmento "BC" dove il momento flettente M e le forze di taglio T sono maggiori per la trave; gli altri segmenti della trave ("CD", "DE", "EF", "FG") sono considerati non danneggiati e per essi si assume E0. Pertanto, nel modello B2, si modella un danno maggiore alla trave assegnando un valore E2 ridotto al segmento "BC" (vicino al giunto), assegnando E1 al successivo segmento "CD" e assumendo il resto della trave non danneggiata con E = E0 (figura 9 (c)). In questo modo la trave presenterebbe un danno progressivo più alto nei punti più importanti in prossimità del giunto e progressivamente meno danni all'aumentare della distanza dal giunto. Questo fino al caso B5, in cui si assume che il danno in prossimità del giunto sia al livello massimo (E5) e al segmento "BC" e il danno minimo si trova nel segmento finale della trave (con E1 assegnato al segmento "FG"). Passando dal segmento "BC" (vicino al giunto) al segmento "FG" (alla fine della trave) si assegnano valori di E progressivamente decrescenti. Analogamente è stato fatto per tutti i modelli sopra elencati, e i FEM riferiti agli stadi di danno 0, 1-2 del modello CJ sono, come esempi, sono mostrati in figura 9 (d), (e) e (f), rispettivamente.

I dati della tabella 4 mostrano che la relazione tra il decadimento della frequenza e il decadimento della rigidezza dipende dal tipo di localizzazione del danno. In particolare, il decadimento della frequenza è più rapido nel caso di danno localizzato nella trave rispetto al caso di danno localizzato contemporaneamente in trave, colonna e nodo. Tutte le curve rappresentate in figura 10 evidenziano un decadimento non lineare della prima frequenza naturale con l'aumento del danno strutturale subito dal telaio. I risultati definiscono un intervallo di valori minimi e massimi entro il quale f_1 del sistema può variare quando cambia anche la distribuzione della rigidezza tra i componenti del telaio. Ad esempio, una riduzione al 40% della rigidità originale della struttura ($K/K_0 = 0.4$) può risultare da una varietà di distribuzioni di danno diverse (dal modello di danno J1 al modello di danno BC2), evidenziando anche diverse frequenze naturali residue (che vanno dal 62% al 92% del valore corrispondente allo stadio non danneggiato) poiché corrispondono alla stessa distribuzione della rigidezza residua fissata al 40% di quella iniziale. Il grafico mostra anche che una determinata riduzione di frequenza (ad esempio $f_{1,i}/f_{1,0} = 0.92$) può risultare da uno stadio di danneggiamento elevato nel giunto (stadio di danneggiamento 4) così come da uno stadio di danneggiamento inferiore nella trave (stadio di danno 2). Questo evidenzia, purtroppo, che non c'è una relazione univoca tra la variazione delle frequenze naturali rilevate con l'AVT ed il tipo ed il livello dei danni effettivamente subiti da un telaio in calcestruzzo armato. In questo esperimento, il decadimento della frequenza naturale non dipende dalle proprietà della struttura (costanti durante la prova), ma piuttosto dalla distribuzione della rigidezza in tutto il sistema strutturale (che cambia a causa del progressivo danneggiamento della struttura). In ogni modello studiato, il modulo di Young di Young è stato gradualmente ridotto nelle parti danneggiate per valutare la loro influenza sul decadimento della prima frequenza naturale del telaio. Le curve in figura 10 evidenziano inoltre come, tra tutte, il danno nella trave abbia l'influenza più significativa influenza sulla frequenza del telaio, mentre il danno nel giunto ha un impatto minore. Di conseguenza, si può affermare che l'impiego del monitoraggio della frequenza naturale per valutare se il giunto trave-colonna è in fase di esaurimento può essere meno efficace di quanto ci si aspetti. Al contrario, il monitoraggio della frequenza può essere molto sensibile nel rilevare lo stato di salute strutturale della trave, cioè l'elemento che prevalentemente influenza la variazione delle frequenze naturali del sistema. Va inoltre osservato che nel caso di monitoraggio di strutture esistenti (edifici, ponti, ecc.) il valore di rigidezza K_0 riferito allo stadio integro della struttura è spesso sconosciuto, essendo questo valore essendo quindi valutato concettualmente associato al momento M_0 in cui la struttura subisce il primo carico. Per questo motivo, solo la rigidezza attuale K_0 della struttura all'inizio dell'indagine può essere assunta come rigidezza di riferimento per il confronto con le misure di rigidezza riportate in tempi diversi in futuro. In questo spirito, i valori residui della rigidezza K_i e della prima frequenza $f_{1,i}$ sono stati normalizzati rispetto al loro valore in una fase precedente K_1 - $f_{1,1}$ rispettivamente e sono stati tracciati nella figura 11.

CONCLUSIONI

A seguito del danneggiamento del telaio testato, il valore sperimentale residuo della prima frequenza naturale del provino si è ridotto al 52,7% del valore di riferimento originale (fase non danneggiata) e il valore residuo della rigidezza del telaio è risultato pari al 43,82% di quello iniziale. Entrambi i risultati confermano che il monitoraggio della variazione delle frequenze modalì può fornire indicazioni quantitative per descrivere la salute strutturale dei telai in calcestruzzo armato. Usata in combinazione con prove statiche per la misura diretta delle variazioni di rigidezza strutturale, la tecnica AVT ha dimostrato di avere un potenziale interessante nel rilevare il tipo, il livello e la distribuzione del danno progressivo nelle strutture civili. Sono state definite curve di regressione per descrivere il decadimento della prima frequenza naturale all'aumentare del danno strutturale in varie parti del telaio, ed è stato dimostrato che la variazione della prima frequenza naturale è più determinata dal danno sulla trave che dal danno sul giunto.

Bibliografia: per le fonti bibliografiche richiamate nel testo, si prega di fare riferimento a quelle segnalate nello stesso ordine nella sezione pubblicazione.
 Gregori, A.; Bizzarri, L.; D'Agostino, C.; Aloisio, A.; Cirella, R.; Alaggio, R. Sensitivity Analysis of Modal Parameters of an RC Joint Subject to Progressive Damage under Cyclic Loads. Buildings 2024, 14, 1345. <https://doi.org/10.3390/buildings14051345>.

Damage level

D (mm)	1	2	3	4	5
f_1	12.79	18.1	17.7	18.46	16.49
f_2	28.41	26.6	27.4	23.56	26.59
f_3	27.98	27.99	18.78	17.18	12.28
f_4	24.04	24.03	23.74	20.71	18.51
f_5	27.98	27.99	18.78	17.18	12.28
f_6	29.91	27.38	29.23	30.84	32.74
f_7	14.54	16.21	16.78	16.34	16.00
f_8	17.95	20.25	20.10	20.60	22.59
f_9	14.54	16.21	16.78	16.34	16.00
f_{10}	18.08	16.58	16.59	19.81	16.49
ζ_1	1.81	1.54	1.17	1.29	1.05
ζ_2	4.92	4.55	1.31	1.09	2.18
ζ_3	1.81	1.54	1.17	1.29	1.05
ζ_4	1.38	1.39	4.39	2.16	2.65
ζ_5	1.73	1.86	1.32	2.22	1.44
ζ_6	2.02	1.55	2.88	1.80	1.21
ζ_7	2.17	1.77	1.99	0.93	1.48

Tabella 2. Valori di rigidezza, frequenza naturale e smorzamento stimati per lo stadio non danneggiato (0) e per i successivi cinque livelli di danno.

Figura 7 Rappresentazione bidimensionale dei primi sette modi sperimentali corrispondenti alla fase non danneggiata del provino.

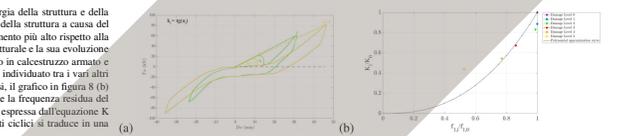


Figura 8 (a) Significato grafico del fattore di rigidezza $K = \tau g$ (a); (b) Relazione tra il decadimento della rigidezza K_i/K_0 e la variazione della prima frequenza $f_{1,i}/f_{1,0}$.

Modello	Modello						
	J	C	BC	B	BC1	BC2	BC3
$f_{1,i}/f_{1,0}$	0.988	0.979	0.966	0.950	0.952	0.984	0.984
$f_{2,i}/f_{2,0}$	0.979	0.985	0.984	0.922	0.930	0.851	0.836
$f_{3,i}/f_{3,0}$	0.987	0.982	0.981	0.941	0.910	0.772	0.787
$f_{4,i}/f_{4,0}$	0.954	0.980	0.936	0.764	0.729	0.654	0.632
$f_{5,i}/f_{5,0}$	0.929	0.798	0.680	0.655	0.624	0.583	0.447
K_i/K_0	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4
$K_{1,i}/K_{1,0}$	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
$K_{2,i}/K_{2,0}$	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
$K_{3,i}/K_{3,0}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
$K_{4,i}/K_{4,0}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabella 4. Valori residui della prima frequenza naturale e della rigidezza residua, calcolati per ciascuno dei sei stadi danneggiati per ciascuno dei sette modelli considerati.

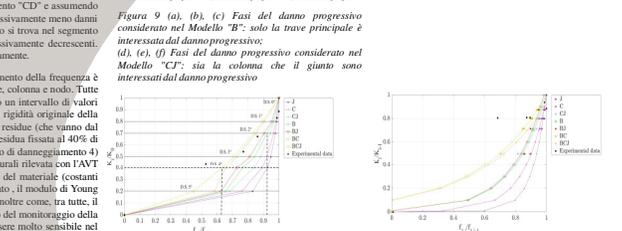


Figura 9 (a), (b), (c) Fasi del danno progressivo considerato nel Modello "B": (a) la trave principale e interessata dal danno progressivo; (d), (e), (f) fasi del danno progressivo considerato nel Modello "C": sia la colonna che il giunto sono interessati dal danno progressivo

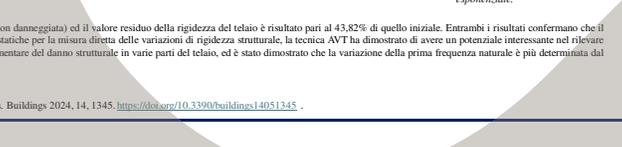


Figura 10 Relazione tra la rigidezza residua (K_i/K_0) e la frequenza residua ($f_{1,i}/f_{1,0}$) risultante dall'analisi dei FEM (sei livelli di danno per ciascuno dei sette modelli) e confronto con i modelli numerici.