

Aedes versioni 2026

**Funzionalità avanzate e contenuti innovativi
Comprendere il reale comportamento statico e sismico**



- Studi ed elaborazioni per il patrimonio edilizio esistente
- Analisi di vulnerabilità. Edilizia ordinaria, storica e monumentale. Recupero e consolidamento
- Analisi Parametrica: gestione delle incertezze e ottimizzazione degli interventi
- Classificazione sismica (sismabonus)
- L'Indice di Qualità Muraria. Gerarchia del comportamento strutturale:
Disgregazione muraria, Cinematismi di corpo rigido, Comportamento globale elasto-plastico



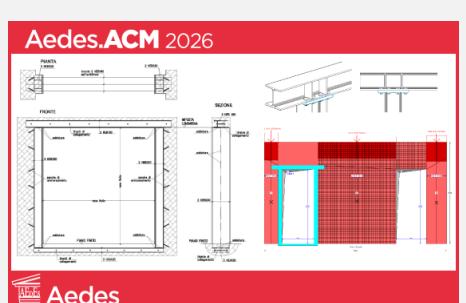
Aedes.PCM 2026

- Analisi Locale e Globale di Costruzioni in Muratura inclusi edifici monumentali
- Analisi Cinematica Non Lineare
- Indici di Qualità Muraria (IQM) con possibile influenza del Jerk sismico
- Verifica di Disgregazione muraria
- Volte: varie tipologie e calcolo del peso proprio



Aedes.SAV 2026

- Archi e Sistemi Voltati a botte, a crociera, a vela. Con verifiche di piedritti, spalle, pile.
- Ponti stradali e ferroviari, muratura e calcestruzzo, obliqui, in curva, mono e multicampata
- Analisi Limite SLU, Elastica SLE, Modale, Cedimenti alle imposte. Condizioni integre e fessurate
- Analisi Statica; Sismica: Combinazione direzionale con componenti trasversale e verticale.
- Consolidamento: Cappa in cls, Compositi FRP/FRCM, Arco armato



Aedes.ACM 2026

- Aperture e Telai di Cerchiatura con effetti degli ancoraggi telaio-muratura
- Interventi locali su murature scadenti: disgregazione, ristilatura dei giunti
- Verifiche di sicurezza tenendo conto dell'influenza del verso dell'azione sismica
- Limiti su variazioni di rigidezza, resistenza e spostamento. Analisi parametrica
- Interventi locali e cerchiature: sicurezza delle pareti sottostanti



Aedes.SLC 2026

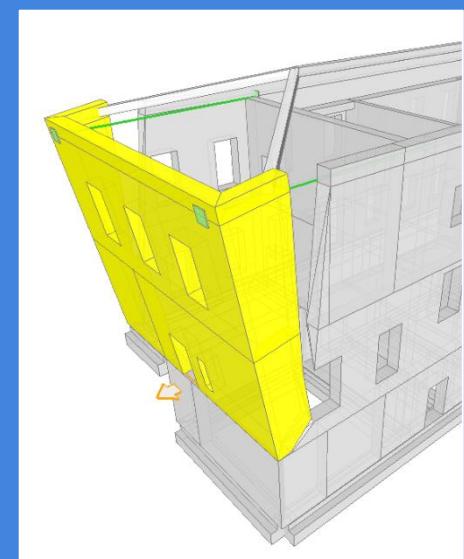
- Azioni sismiche impulsive: effetti sui nodi di collegamento
- Probabilità di danno da jerk verticale
- Studio statico e dinamico del solaio in legno-calcestruzzo
- Resistenza al fuoco per orditura principale e secondaria

Aedes versioni 2026

Aedes.PCM 2026 Analisi Cinematica Non Lineare

Aedes.PCM 2026, attraverso il **modulo ECS**, introduce una novità sostanziale nell'ambito della modellazione dei meccanismi di collasso locale: l'**Analisi Cinematica Non Lineare**, in conformità a quanto previsto dalle NTC 2018 (§C8.7.1.2.1.2).

Questa modalità di analisi consente di superare l'approccio classico lineare, offrendo una valutazione più articolata e realistica del comportamento locale delle strutture murarie soggette ad azioni sismiche. In particolare, l'analisi non lineare prevede la determinazione del **moltiplicatore di collasso α** non solo sulla configurazione iniziale della catena cinematica, ma anche lungo un insieme di configurazioni deformate che rappresentano l'evoluzione progressiva del cinematismo. Il percorso evolutivo del meccanismo viene descritto in funzione dello **spostamento orizzontale di un punto di controllo**, definito come il **baricentro dei corpi rigidi coinvolti** nel cinematismo. In questo modo, è possibile rappresentare in modo continuo la trasformazione della catena cinematica, valutando la risposta meccanica del sistema nelle diverse fasi del suo sviluppo.

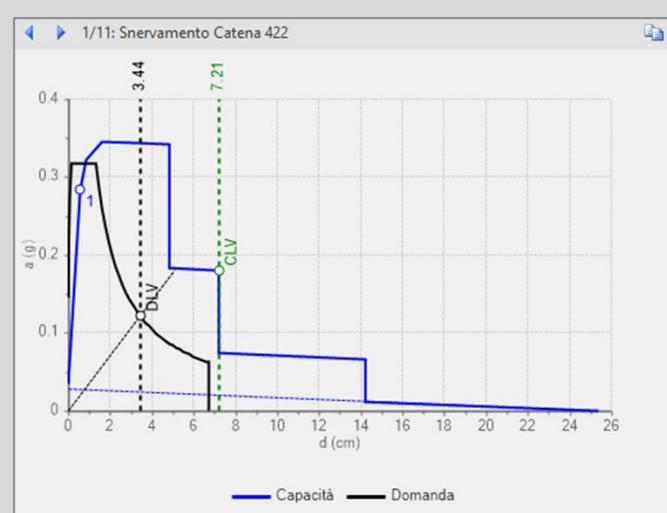


Effetti non lineari considerati

L'analisi cinematica non lineare consente di tenere conto di importanti fenomeni strutturali che non possono essere rappresentati con l'approccio lineare classico, tra cui:

- **Stabilità geometrica degli elementi strutturali**, ad esempio, lo sfilamento di travi dalle sedi d'appoggio, o il collasso di volte.
- **Comportamento degli elementi di rinforzo**, come i tiranti tradizionali o i dispositivi dissipativi, con modellazione delle diverse fasi del loro funzionamento. Nel caso di tiranti tradizionali, vengono considerate le soglie di snervamento e rottura; mentre per i dispositivi dissipativi si tiene conto anche della fase di attivazione e dell'eventuale fine corsa.

Questi aspetti, cruciali nella valutazione della **vulnerabilità sismica locale**, sono gestiti all'interno dell'ambiente di modellazione in maniera interattiva e integrata, con possibilità di aggiornamento in tempo reale dei risultati



La **curva di capacità** descrive il comportamento di un oscillatore equivalente non lineare a un grado di libertà, in termini di accelerazione spettrale e spostamento. Ogni punto della curva rappresenta uno **stato evolutivo significativo** del meccanismo locale e corrisponde a un evento specifico, come: lo snervamento o la rottura di un tirante, la perdita di appoggio di un solaio, l'instabilità di una volta, il distacco di un rinforzo, l'attivazione o il fine corsa di un dispositivo dissipativo.

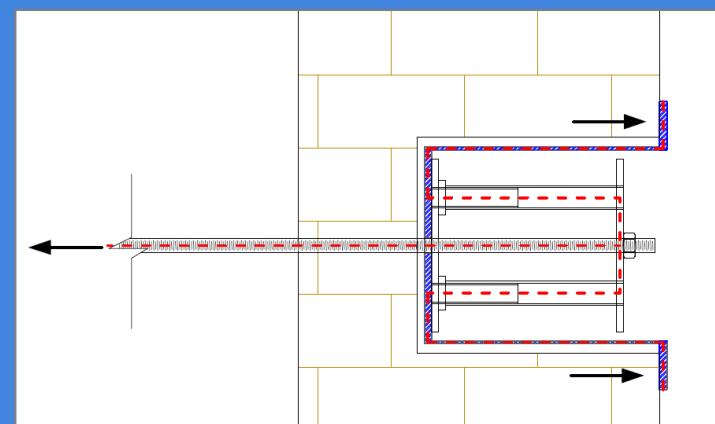
Nel grafico, sono riportati gli elementi necessari per la verifica allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). Una linea tratteggiata verticale di colore verde o rosso (a seconda dell'esito della verifica), indica la **capacità di spostamento CLV**. La linea nera continua rappresenta la **curva di domanda**, ovvero lo spettro di risposta elastico in spostamento. Mentre la **domanda di spostamento DLV** è individuata graficamente tramite una linea tratteggiata verticale di colore nero.

Tiranti dissipativi

Aedes.PCM 2026, consente dunque la modellazione di tiranti dissipativi.

A differenza dei tiranti tradizionali, che entrano in trazione non appena si genera uno spostamento relativo tra le estremità, i **dispositivi dissipativi** introducono un comportamento più evoluto e controllato. Il loro **scopo principale** è duplice:

- **Dissipare l'energia** trasmessa dal sisma alle pareti oscillanti, attraverso un comportamento meccanico non lineare;
- **Limitare gli effetti impulsivi** sui tiranti e sulla muratura, riducendo il rischio di rottura della catena e di danneggiamento locale nei punti di ancoraggio.



Schema di un dispositivo dissipativo
tratto dalle linee guida LICORD

Il dispositivo è applicato in serie ad un tirante tradizionale, in corrispondenza dell'ancoraggio. Il funzionamento tipico prevede:

1. **Rigidezza iniziale molto elevata**, fino al raggiungimento di una soglia di attivazione;
2. **Entrata in funzione di una rigidezza ridotta**, dovuta a molle o dispositivi viscosi, che permette l'assorbimento progressivo dell'energia;
3. **Fine corsa meccanico**, oltre il quale il dispositivo si irrigidisce nuovamente, attivando il comportamento resistente del tirante tradizionale.

In caso di terremoti di bassa intensità, il sistema può restare completamente nel campo elastico, lasciando che il tirante lavori come una semplice catena di collegamento. Nei sismi più severi, invece, il dispositivo si attiva, contribuendo in modo determinante a limitare la domanda sismica e a prevenire i collassi locali.

Aedes versioni 2026

Aedes.PCM 2026

Indici di Qualità muraria (IQM)

Aedes.PCM, in combinazione con il **modulo ECS** dedicato agli Elementi Costruttivi Storici e monumentali, offre la possibilità di determinare le proprietà meccaniche delle murature esistenti attraverso il metodo **IQM, Indici di Qualità Muraria** [1].

Il metodo IQM è nato nel 2002 presso l'**Università di Perugia** ed è stato perfezionato nel corso degli anni successivi anche grazie a ricerche condotte in ambito ReLUIS. Esso si basa su un esame visivo dei paramenti e della sezione di un pannello murario, con lo scopo di verificare il grado di rispetto delle regole dell'arte muraria. Sulla base di tali verifiche si perviene ad un indice numerico che appare ben correlato sia con i parametri meccanici più significativi della muratura in esame, sia con le risposte strutturali attese.

Inoltre, IQM consente una **valutazione della maggiore o minore propensione alla disgregazione** delle murature soggette alle azioni sismiche.

[1] A. Borri, A. De Maria: L'Indice di Qualità Muraria (IQM) e la disgregazione delle murature per effetto del sisma, Structural n. 229. Maggio-giugno 2020



Nella sezione **Parametri della Regola dell'Arte** sono presenti sette parametri la cui valutazione determina gli Indici di Qualità Muraria:

- P.D. Presenza dei Diatoni, ingranamento trasversale
- MA. Qualità della Malta, efficace contratto fra elementi
- F.EL. Forma degli Elementi resistenti
- S.G. Sfalsamento dei Giunti
- R.EL. Resistenza degli Elementi
- OR. Orizzontalità dei filari
- D.EL. Dimensione degli Elementi resistenti

Ad ognuno di questi parametri è necessario attribuire un **giudizio** sul rispetto della regola dell'arte:

- R. parametro rispettato
- P.R. parametro parzialmente rispettato
- N.R. parametro non rispettato

I giudizi sui parametri della regola dell'arte e i conseguenti Indici di Qualità Muraria sono **distinti per Analisi Statica e Analisi Sismica**. In questo modo, nell'Analisi Sismica è possibile degradare la qualità della muratura al fine di tenere conto degli effetti delle vibrazioni ad alta frequenza associate al **Jerk sismico**. Tali vibrazioni possono causare fenomeni di disgregazione progressiva della tessitura muraria, riducendo l'efficacia dell'ingranamento tra gli elementi e, conseguentemente, le proprietà meccaniche globali della muratura.

(M. Mariani, F. Pugi: Accelerazione, Jerk e disgregazione muraria: effetti sismici sugli edifici esistenti in muratura. Ingenio, 17/07/25)

The screenshot shows the Aedes.PCM software interface for IQM analysis. It includes sections for 'Parametri della Regola dell'Arte' (with sliders for NR, PR, R), 'Analisi Statica' and 'Analisi Sismica' (with corresponding sliders), 'Indici di Qualità Muraria' (with tables for IQM_V, IQM_{FP}, IQM_{NP}), and 'Proprietà meccaniche (N/mm²)' (with tables for Modulo di elasticità normale, Modulo di elasticità tangenziale, Resistenza media a compressione, and Resistenza media a taglio). Buttons for OK, Annulla, and Applica are at the bottom right.

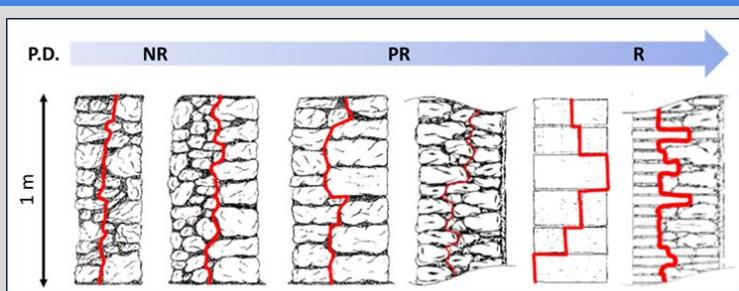
Per alcuni parametri, il giudizio sul rispetto della regola dell'arte può essere determinato attraverso **Valutazioni quantitative**:

- **Linea di Minimo Tracciato trasversale**
- **Malta di pessima Qualità**
- **Linea di Minimo Tracciato frontale**
- **Dimensione massima degli elementi**

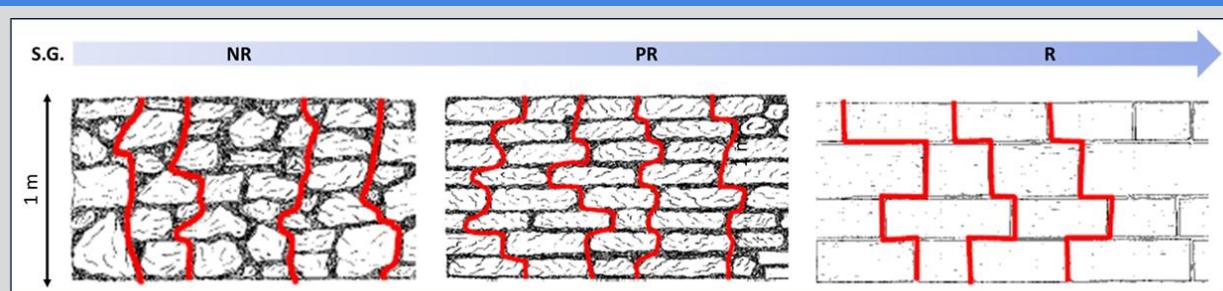
Nella sezione **Indici di Qualità Muraria** vengono riportati i seguenti valori di IQM e la corrispondente categoria:

- IQM_V** Indice di Qualità Muraria per azioni Verticali
- IQM_{FP}** Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano
- IQM_{NP}** Indice di Qualità Muraria per azioni Ne Piano

Qualora l'Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano sia **IQM_{FP} ≤ 4**, un messaggio indica la **possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità** e la corrispondente **accelerazione sismica di attivazione**.

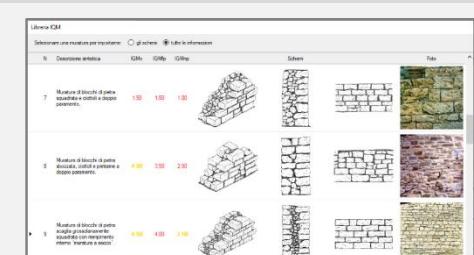


LMT trasversale e sua influenza sul parametro P.D.



LMT frontale e sua influenza sul parametro S.G.

Il comando **Importa da Libreria** consente di importare la descrizione, gli schemi e i parametri della regola dell'arte da una libreria di 22 murature predefinite. Le informazioni sono tratte dalle schede di valutazione della Qualità Muraria pubblicate dagli autori del metodo IQM, nell'ambito della ricerca ReLUIS. Dopo aver importato una muratura dalla Libreria, tutte le informazioni possono essere modificate dall'Utente per adeguarle al caso della muratura oggetto di studio.



Aedes versioni 2026

Aedes.PCM 2026

Verifica di Disgregazione muraria

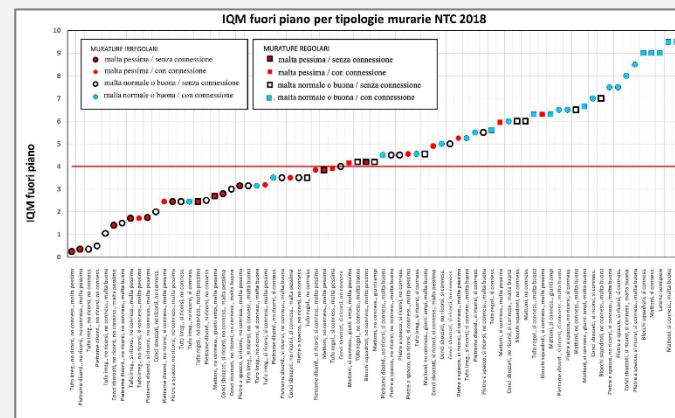
Aedes.PCM consente di effettuare la **verifica di disgregazione muraria** per gli edifici esistenti, un aspetto determinante nel caso di murature storiche dove si rileva una qualità muraria mediocre con scarsa consistenza della malta.

Il fenomeno della disgregazione è evidenziato nei contenuti della Normativa Tecnica. Nel paragrafo §C8.7.1.2.1 delle NTC 2018, dedicato alle modalità di svolgimento dell'analisi cinematica, si specifica anzitutto che **"la rappresentazione della struttura come catena cinematica di corpi rigidi è attendibile solo se la parete non è vulnerabile nei riguardi di fenomeni di disgregazione"**.

STEP	Situazione strutturale	Comportamento sismico	Analisi più adatta	Intervento prioritario
Preliminare CONOSCENZA DELLA COSTRUZIONE				
0	Muratura di qualità meccanica insufficiente	Disgregazione muratura	Valutazione qualità muraria	Migliorare la qualità della muratura e la sua coesione interna
1	Muratura di sufficiente qualità Assenza di collegamenti efficaci	Locale (formazione di cinematicismi)	Analisi cinematica dei meccanismi di collasso Analisi per carichi verticali (solai, copertura) Riconoscimento delle vulnerabilità locali	Inserire vincoli (catene, collegamenti, etc...) Rinforzo di solai e coperture (se necessario) Eliminare vulnerabilità
2	Muratura di sufficiente qualità e presenza di collegamenti efficaci e diffusi sull'intera costruzione	Impalcati deformabili	Complessivo (risposta d'insieme e carichi per zone d'influenza) Assenza di effetti torcenti globali	Analisi non lineare su modello 3D Analisi non lineare per allineamenti
		Impalcati rigidi	Globale (risposta d'insieme e carichi proporzionali alle rigidezze) Presenza di effetti torcenti globali	Analisi non lineare su modello 3D

Nel **metodo IQM** si evidenzia come il valore dell'indice di qualità muraria fuori piano (IQM_{FP}) condensa in sé il rispetto o meno di quelle regole dell'arte rivolte ad ottenere un comportamento di tipo monolitico.

Gli Autori del metodo, tenendo come riferimento le varie tipologie proposte nella normativa italiana, e sulla base delle esperienze condotte nei rilevamenti post sismici dei vari terremoti italiani, hanno proposto di utilizzare, per gli edifici ordinari posti in zone con pericolosità sismica medio-alta, il valore di $IQM_{FP} = 4$ come valore di soglia. **Valori di IQM_{FP} eguali o inferiori a 4 indicano la possibilità di manifestazione di fenomeni disgregativi.**

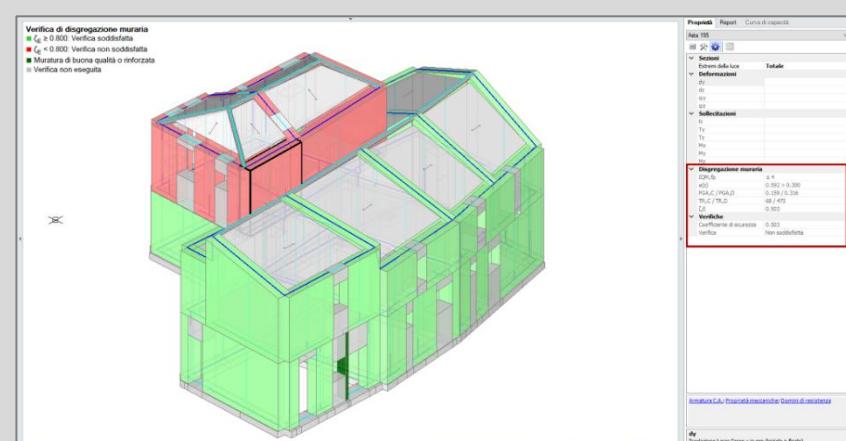


La scarsa qualità identificata con $IQM_{FP} \leq 4$ è una condizione necessaria per la disgregazione, ma affinché il fenomeno si manifesti occorre un'accelerazione sismica di intensità sufficientemente elevata. La **soglia di accelerazione sismica oltre la quale si può innescare il fenomeno disgregativo** è determinata in funzione dell'Indice IQM_{FP} attraverso la seguente relazione:

$$a_D = 0.150g \cdot \left(\frac{IQM_{FP}}{2} + 1 \right)$$

In Aedes.PCM, la **verifica nei confronti della disgregazione** viene condotta con le seguenti modalità:

- **Per ogni maschio murario avente $IQM_{FP} \leq 4$, viene valutata l'accelerazione strutturale di progetto alla base della parete,** definita attraverso lo spettro di piano che considera i dati sismici del sito di ubicazione, la posizione della parete lungo l'elevazione dell'edificio e le proprietà dinamiche dell'edificio stesso.
- **Se l'accelerazione strutturale è maggiore della soglia che può innescare il fenomeno disgregativo, la verifica di disgregazione non è soddisfatta.**



La verifica di Disgregazione muraria viene eseguita in fase di modellazione strutturale con riferimento allo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV). Si tratta di una verifica interattiva che viene automaticamente rieseguita ogni volta interviene una modifica che ne condiziona il risultato.

Scegliendo di considerare la disgregazione muraria nella valutazione della sicurezza, l'indicatore di rischio sismico relativo a SLV terrà conto del comportamento di disgregazione muraria.

Intervento di Ristilatura Non Armata

Aedes.PCM consente l'intervento di consolidamento attraverso **ristilatura profonda dei giunti di malta**, comunemente definito Ristilatura Non Armata.

Nelle proprietà degli elementi strutturali in muratura esistente, scheda Interventi, è ora possibile attivare l'intervento di Ristilatura scegliendo tra Ristilatura Armata e Ristilatura Non armata.

In caso di **Ristilatura Non Armata** dei giunti di malta, le proprietà meccaniche della muratura vengono incrementate applicando il coefficiente correttivo relativo alla malta di buona qualità, pesato sulla percentuale di spessore effettivamente consolidato.

Proprietà Report	
Asta 6	
Iniezioni	No
Intonaco armato	No
Diatoni o tirantini	No
Ristilatura	Non armata
- spessore consolidato (%)	50
Altri interventi	Nessuno

Aedes versioni 2026

Aedes.PCM 2026

Volte: varie tipologie e calcolo del peso proprio

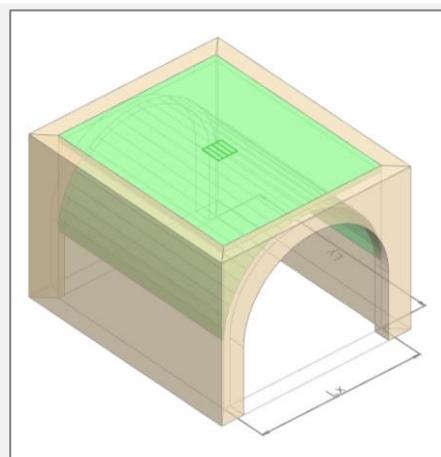
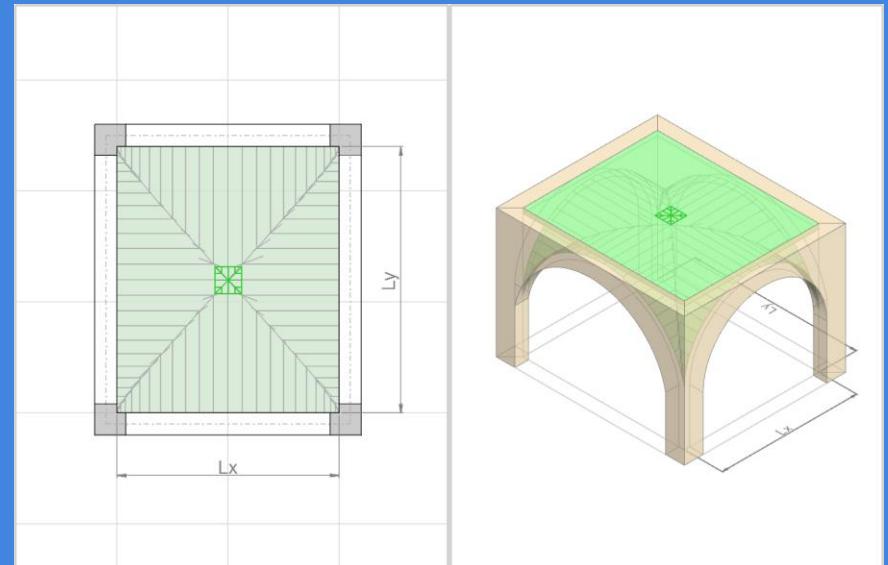
In Aedes.PCM le **volte in muratura** possono essere considerate nel modello per mezzo di solai con tipologia "volta". Questi elementi, al pari di tutti i solai, hanno la funzione di "raccogliere" carico (peso proprio e carichi superficiali) e distribuirlo agli elementi di contorno sottoforma di carichi verticali e (in presenza di spinte) orizzontali.

Le tipologie Volta a crociera, Volta a vela, Cupola e Cupola con pennacchi, richiedono il **modulo ECS** dedicato agli Elementi Costruttivi Storici e monumentali.

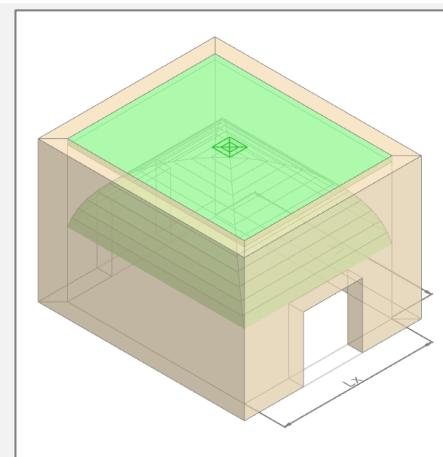
La rappresentazione 3D di solai con tipologia volta o cupola include ora la **superficie di intradosso** che permette all'utente di avere il pieno controllo sulla modellazione e sui parametri in input.

La definizione del **peso proprio** dei solai segue strade differenti a seconda della tipologia:

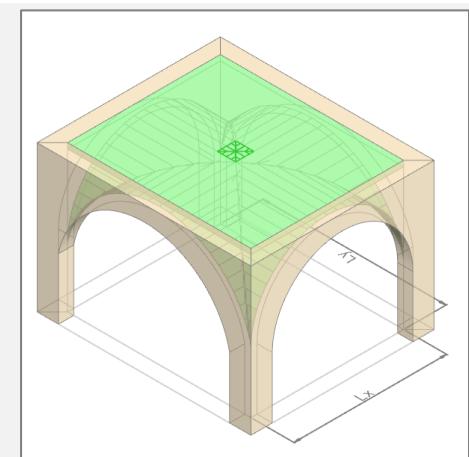
- nel caso di **solai piani e falde**, il peso proprio deve essere **specificato manualmente** dall'utente sotto forma di carico superficiale;
- nel caso di **volte e cupole**, il peso proprio è **considerato automaticamente** dal software sulla base delle proprietà in input.



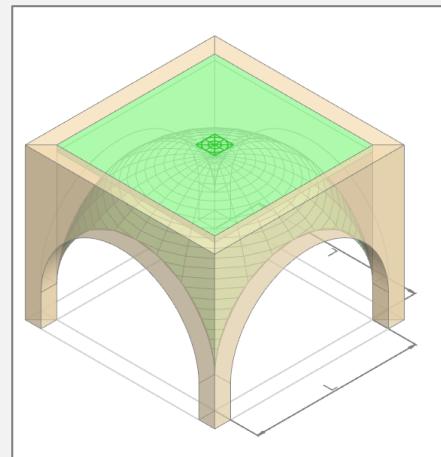
Volta a botte



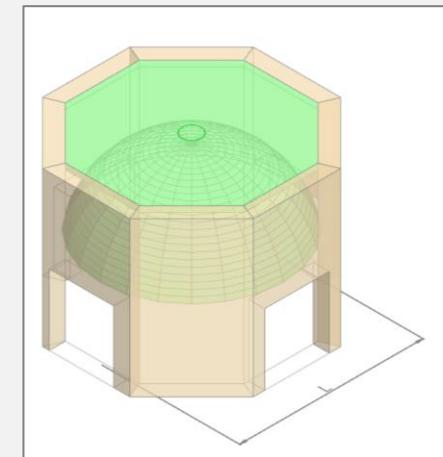
Volta a padiglione



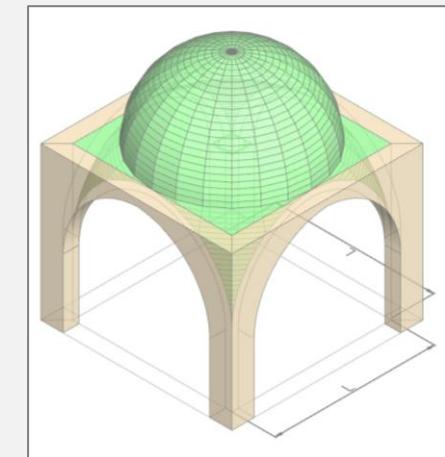
Volta a crociera



Volta a vela



Cupola

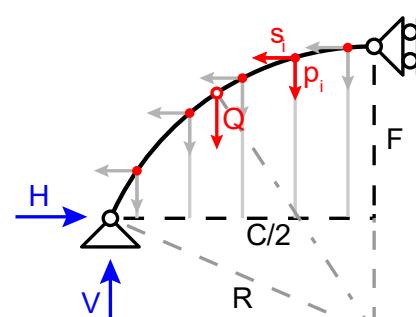
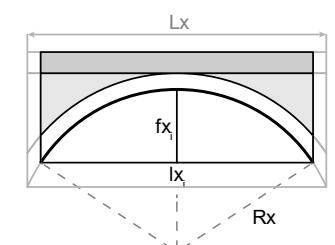
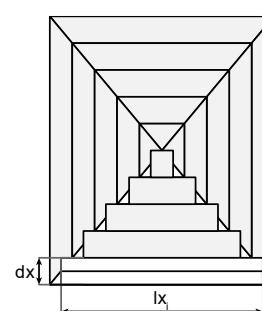


Cupola con pennacchi

Il calcolo del peso proprio e delle azioni alle imposte viene condotto per ogni tipologia di volta con dei metodi ben documentati.

Ad esempio, nel caso della **volta a crociera**, ognuna delle 4 unghie viene suddivisa in una serie di volte a botte affiancate, dette **lunette**. L'immagine illustra, in pianta, la discretizzazione di una volta a crociera in lunette (5 per unghia) e si focalizza su una delle lunette in direzione x (rappresentata in sezione longitudinale).

Per ogni lunetta, vengono calcolate le reazioni all'imposta, con un procedimento analogo a quello utilizzato per la volta a botte.



Successivamente, il calcolo del **carico verticale P** e della **spinta orizzontale S** esercitata dalla volta a crociera sui 4 vertici del perimetro viene svolto con riferimento a uno degli **archi diagonali** della volta. Si considera lo schema statico illustrato in figura, ipotizzando i seguenti vincoli: una cerniera in corrispondenza dell'imposta e un carrello scorrevole in direzione verticale in chiave. Sull'arco sono applicate le azioni alle imposte delle lunette, cioè le forze verticali (p_i) e le spinte orizzontali (s_i), ottenute dalla combinazione delle forze relative alle lunette in direzione x e y. Il peso proprio di eventuali costoloni è considerato come un carico concentrato (Q) agente nel punto medio dell'arco.

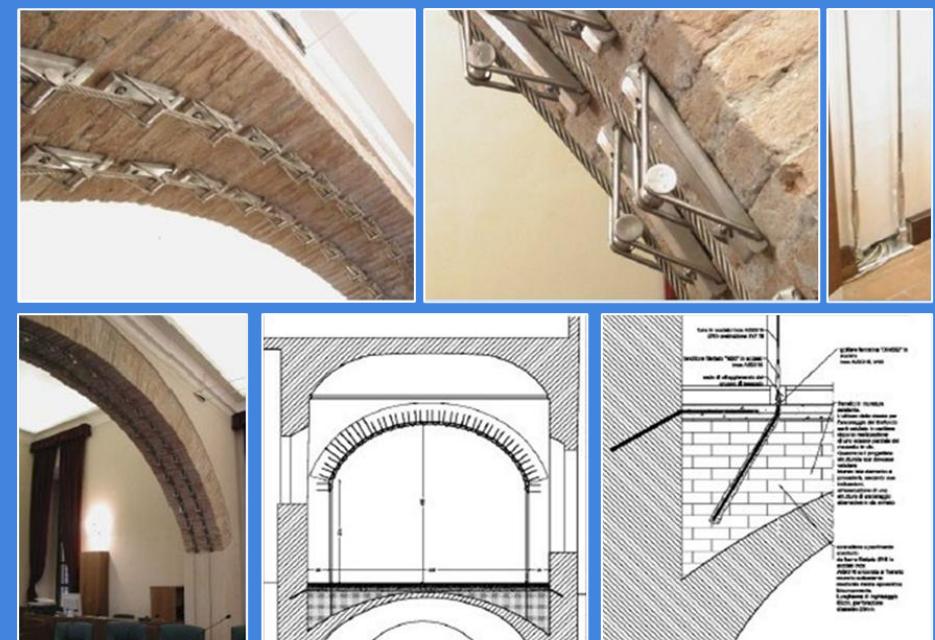
Aedes.SAV 2026

Consolidamento con Tecnica dell'Arco Armato

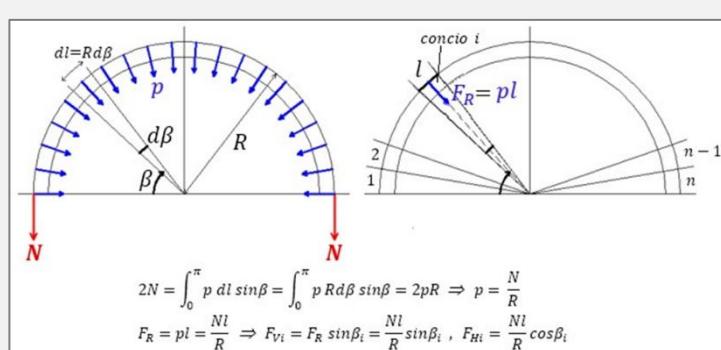
La **tecnica dell'“arco armato”**, proposta ed applicata dal Prof. Jurina [1], è un **metodo di consolidamento leggero, reversibile e privo di incrementi significativi di massa**, concepito per contrastare la formazione delle cerniere e ripristinare uno stato di sollecitazione prevalentemente di compressione.

Il metodo consiste nella posa di uno o più cavi metallici tesi, disposti parallelamente alla generatrice dell'arco o della volta, in posizione estradossale e/o intradossale. Il tiro imposto ai cavi induce uno stato di precompressione nei conci, rendendoli capaci di resistere anche a sollecitazioni flessionali. La tesatura dei cavi attiva un sistema di forze radiali che ricentra la curva delle pressioni, avvicinando il comportamento strutturale alla condizione ideale di compressione pura tra concio e concio, impedendo o posticipando la formazione delle cerniere.

[1] Jurina L., *L'arco armato nel consolidamento di archi e volte in muratura*, Recupero e Conservazione n°33, pp 54-61, 2000



Dettagli dell'arco armato intradossale realizzato nell'ex convento di San Cristoforo, in Lodi. Esempio applicativo (Jurina) [1]



L'efficacia della tecnica è legata all'intensità delle forze radiali trasmesse dal cavo teso alla muratura, che dipendono dal raggio di curvatura locale dell'arco (nell'immagine dello schema statico: le formule implementate in Aedes.SAV). Il cavo è sollecitato a sola trazione, e poiché il cavo segue la stessa curvatura dell'arco, le forze scambiate per azione e reazione inducono nell'arco uno stato di compressione pura. Per conseguenza, nell'arco si ottiene un incremento significativo della capacità portante nei confronti dei meccanismi di collasso di tipo flessionale.

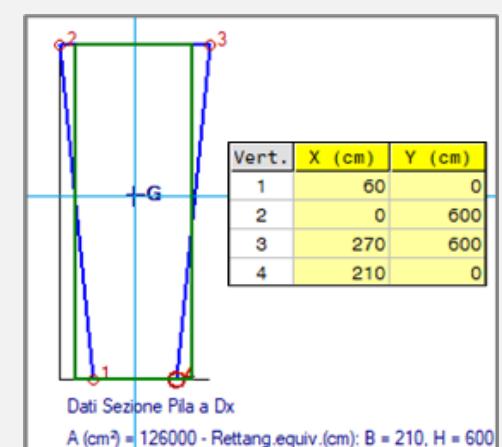
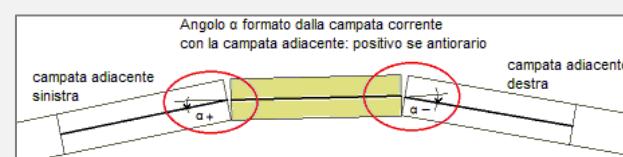
Funzionalità avanzate per i ponti multicampata

Dall'esperienza di numerose applicazioni progettuali, nuove funzionalità e utilità nei comandi di gestione agevolano ed estendono l'utilizzo di SAV per i ponti multicampata.

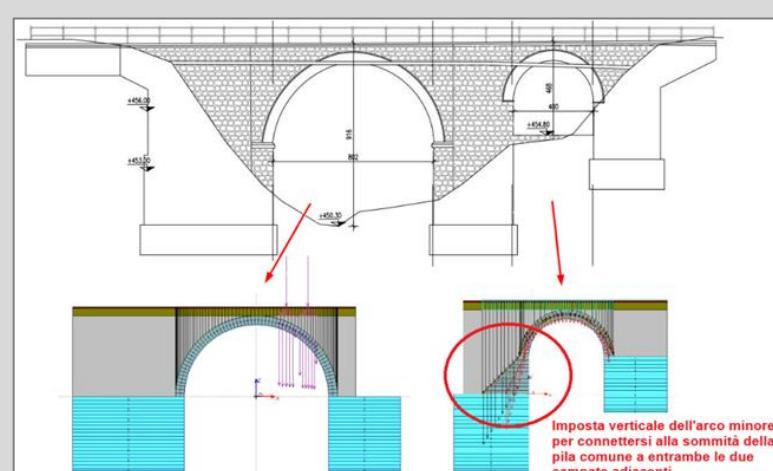
I ponti multicampata possono ora anche essere obliqui e in curva. I ponti in curva sono realizzati attraverso una successione di arcate formanti tra loro un angolo prefissato in pianta.

Nei ponti curvi le pile presentano sezioni a cuneo per assorbire l'angolo tra le campate: in SAV è ora possibile gestire **sezioni qualsiasi (definite per punti)** per le pile, in particolare aventi sezioni non rettangolari a cuneo (un esempio è riportato nell'immagine seguente, dove viene rappresentata la sezione a cuneo, utilizzata nell'analisi, insieme alla sezione rettangolare equivalente).

Le verifiche sono condotte sulla sezione reale, tenendo conto dell'area reagente a compressione per pressoflessione deviata (pila soggetta a sforzo normale e momenti longitudinale e trasversale).



Nuovi comandi per la **definizione di un'imposta verticale**, anche con spessore variabile in elevazione, consentono la corretta modellazione per ponti multicampata dove arcate successive presentano quote di imposta differenti, come nell'immagine seguente.



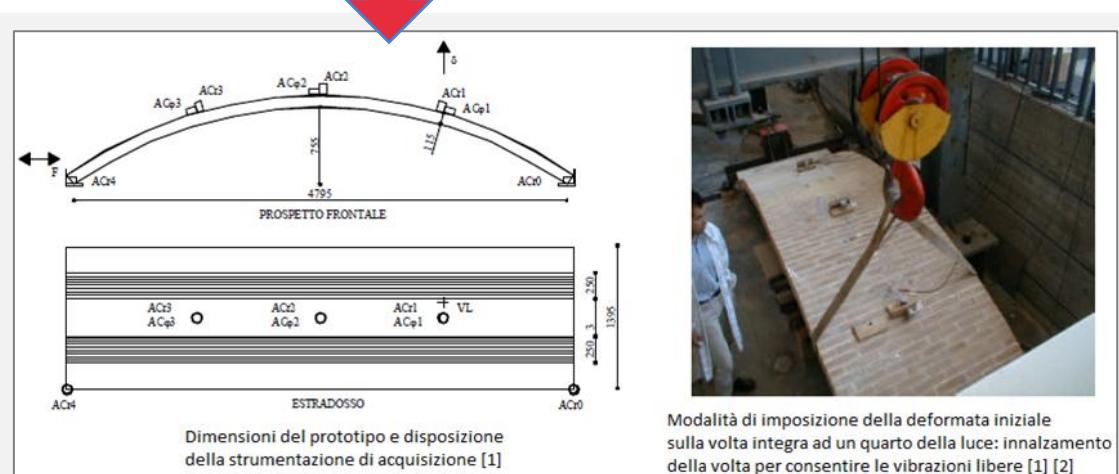
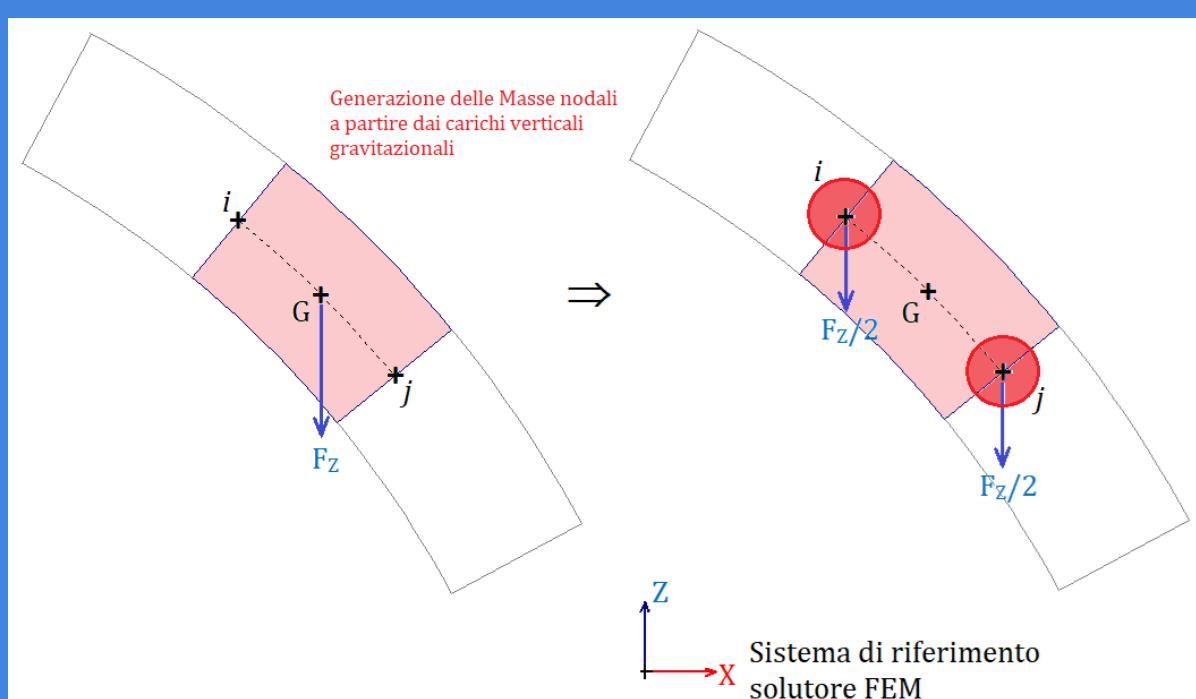
Aedes.SAV 2026

Analisi modale per archi e volte in muratura

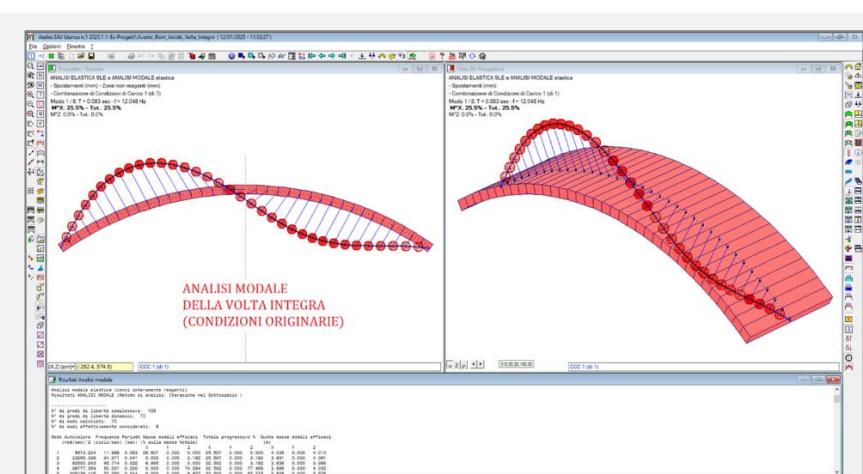
Le strutture voltate sono sistemi di antica concezione e realizzazione, frequentemente danneggiati dagli eventi subiti nel corso della loro vita, in particolare per effetto delle azioni sismiche.

Aedes.SAV, dedicato all'analisi delle strutture murarie voltate, consente lo studio delle proprietà dinamiche delle volte attraverso l'**analisi modale**. La movimentazione delle masse genera i modi di vibrare (periodi, frequenze, forme modali), ed è possibile studiare:

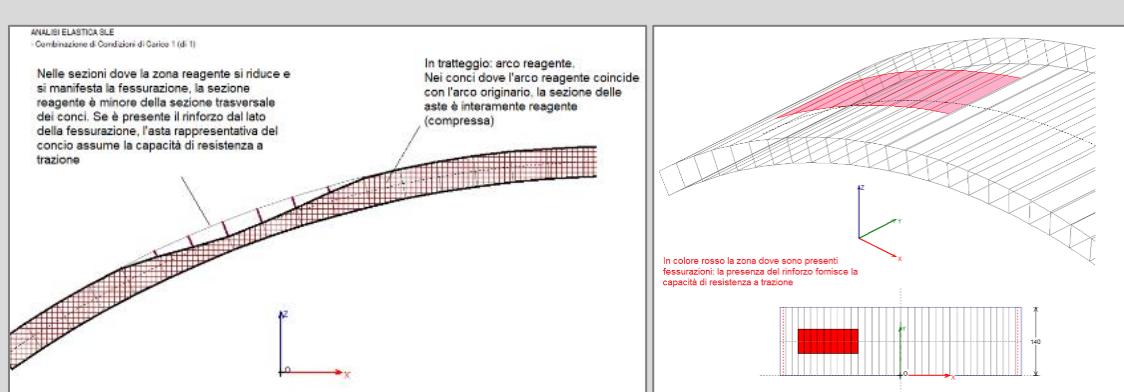
- **volta integra**: caratteristiche originarie del sistema voltato;
- **volta fessurata**: proprietà dinamiche modificate a seguito di uno stato di danneggiamento, indotto da cause statiche o sismiche;
- **volta rinforzata**: proprietà implementate attraverso l'applicazione di un rinforzo, ad esempio in composito, volto a ripristinare la rigidezza originaria.



Studio delle oscillazioni libere: test sperimentale di riferimento*



Analisi modale della volta integra



Studio della volta fessurata e consolidata con materiali compositi

Indagini sperimentali e analitiche condotte con Aedes.SAV mostrano che il rinforzo con materiale composito è in grado di ristabilire il comportamento dinamico originario di volte danneggiate.

Il ripristino con composti si consegna senza la modifica delle condizioni di vincolo e senza l'incremento dei carichi permanenti, a differenza di tecniche tradizionali quali la realizzazione di una cappa in calcestruzzo.

Con Aedes.SAV è comunque possibile controllare la variazione delle proprietà dinamiche a seguito della realizzazione di una cappa in calcestruzzo o di altri tipi di interventi.

Le funzionalità di Aedes.SAV sono state studiate con puntuale riferimento ai contenuti di articoli scientifici sul comportamento dinamico delle volte in muratura: il confronto fra i risultati sperimentali e quelli analitici costituisce validazione della procedura software utilizzata.



Test sperimentale: applicazione di nastri di rinforzo*

* Fonte: Corradi M., Borri. A., Castori G. et al. (rif. bibliografici su www.aedes.it)

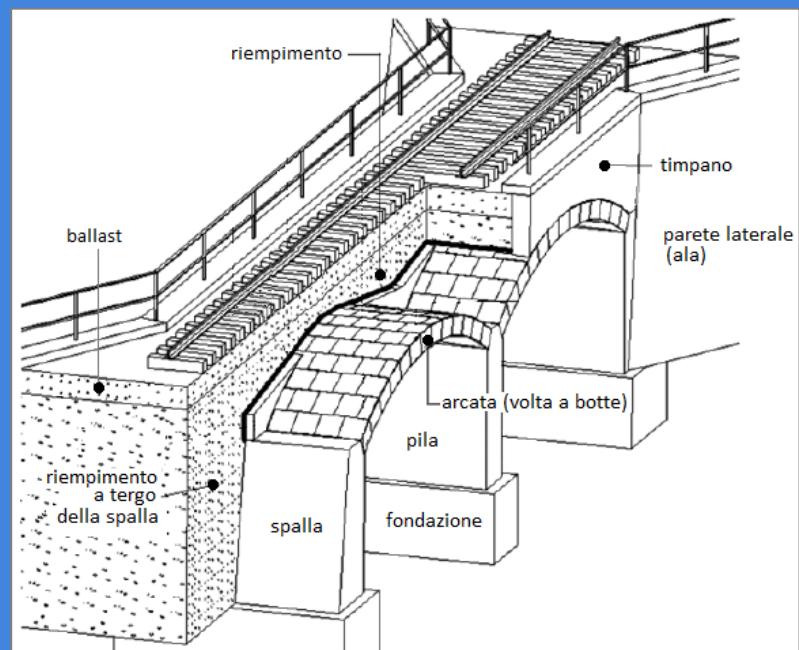
Aedes versioni 2026

Aedes.SAV 2026

Analisi statica e sismica di ponti in muratura e calcestruzzo

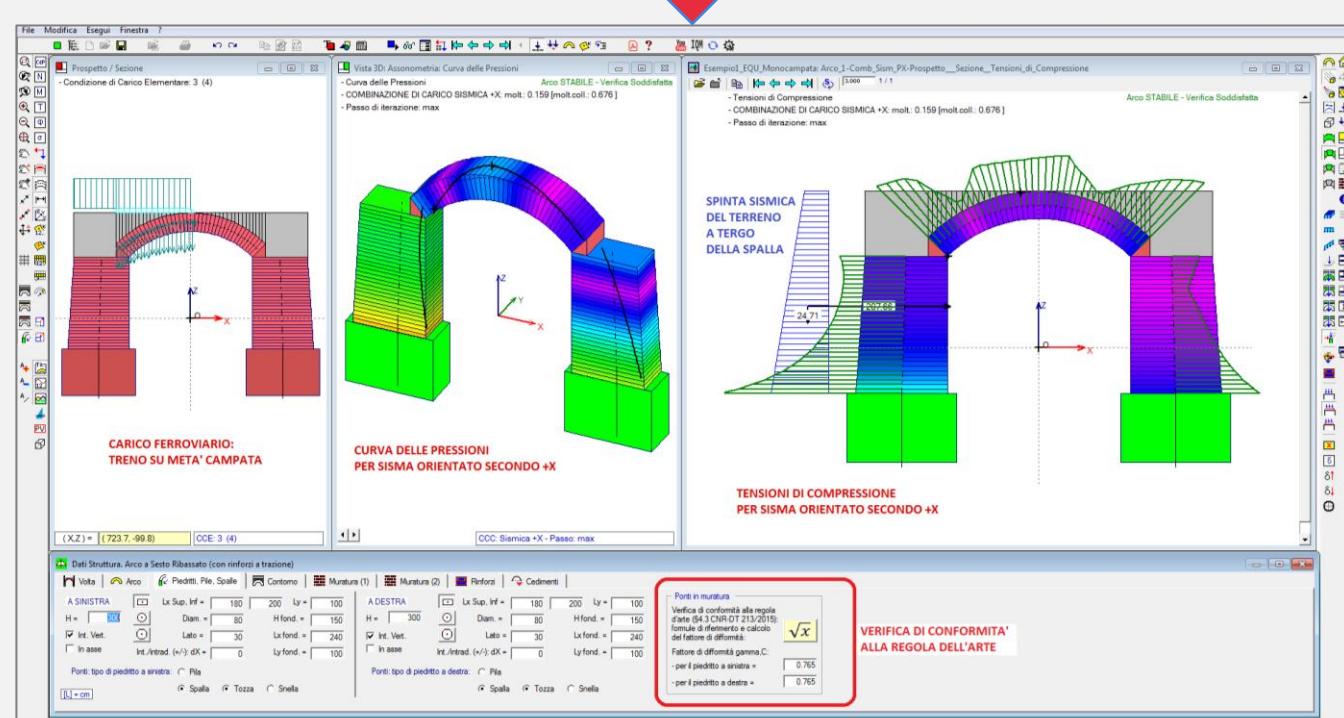
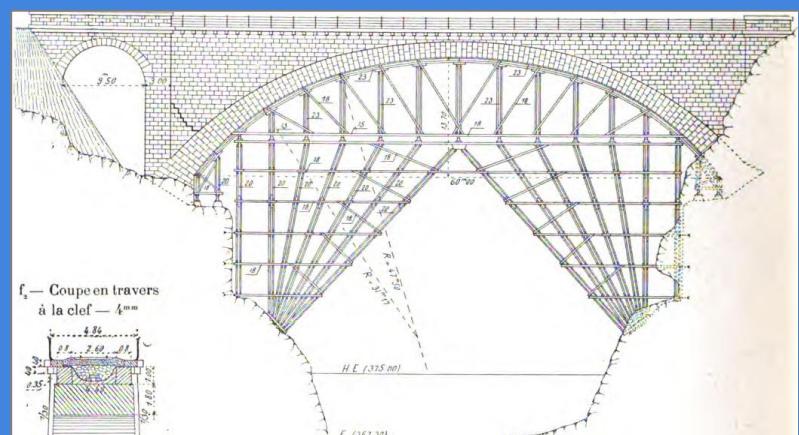
Aedes.SAV gestisce l'**analisi di ponti esistenti in muratura, di tipo stradale o ferroviario**, conformemente alla Normativa vigente: D.M. 17.1.2018 e Circolare 7 del 21.1.2019, linee guida CNR-DT 213/2015: "Istruzioni per la Valutazione della Sicurezza Strutturale di Ponti Stradali in Muratura", normative specifiche per i ponti ferroviari.

I ponti possono essere monocampata o multicampata, in muratura o in calcestruzzo. Sono gestiti ponti obliqui.



Nelle immagini a lato, in senso orario:

1. Elementi strutturali tipici di un ponte ferroviario in muratura. Rielaborazione da Orban e Gutermann, 2009
2. Ponte ferroviario in muratura ad un'unica arcata costruito agli inizi del '900. e Tratto da: Grandes Voûtes, di Paul Séjourné, Ingegnere capo di ponti e strade, 1916
3. Esempio di ponte monocampata

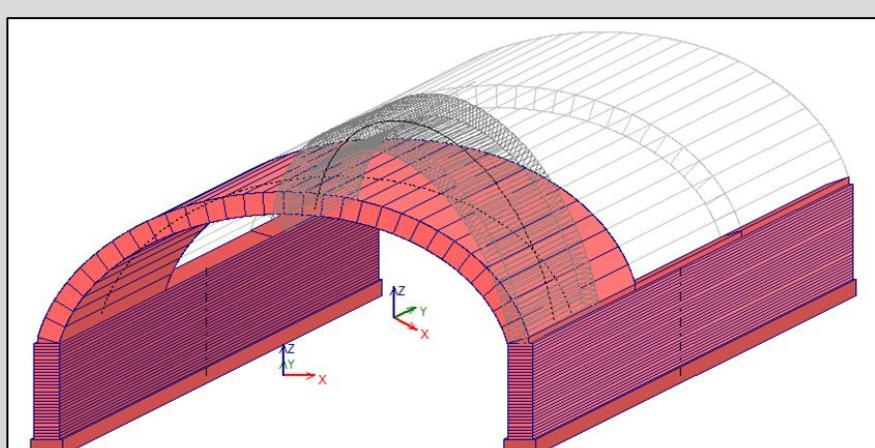


Nei **ponti monocampata** entrambi i piedritti sono costituiti dalle spalle, soggette alle **spinte del terreno**, calcolate automaticamente dal software ed assegnate come azioni lungo lo sviluppo in elevazione dei piedritti. Aedes.SAV distingue i casi di **spalle tozze o snelle**, trattate diversamente dal punto di vista delle spinte. La spinta statica si distingue fra **spinta a riposo** e **spinta attiva**, mentre la **spinta passiva** può essere considerata in percentuale selezionabile in input: ciò permette di inquadrare l'effettiva quota-parte di spinta passiva che può essere mobilitata per l'equilibrio della struttura.

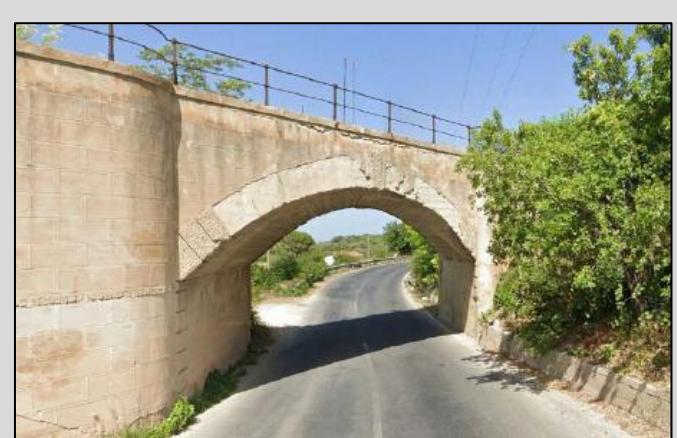
L'**incremento di spinta del terreno dovuto all'azione sismica** viene distinto fra i casi di spalla snella (metodo di Mononobe-Okabe) o tozza (metodo di Wood).

Ponti obliqui

I **ponti obliqui** sono caratterizzati dall'**obliquità tra pile e arcate**. Nella costruzione, per semplicità di apparecchio, si assegnava alla sezione retta un profilo ad arco di cerchio, cui conseguiva un profilo ellittico sulla sezione obliqua.



SAV modella esattamente la geometria del sistema voltato obliquo: gestisce il piano di testata contenente l'arco ellittico e le azioni che la volta trasmette ai piedritti, nel piano e fuori piano rispetto alla profondità dei piedritti. Come per i ponti a volta retta, l'**analisi per carichi mobili** studia gli effetti del transito per l'adeguamento, l'operatività e la transitabilità anche a mezzi pesanti o carichi eccezionali.



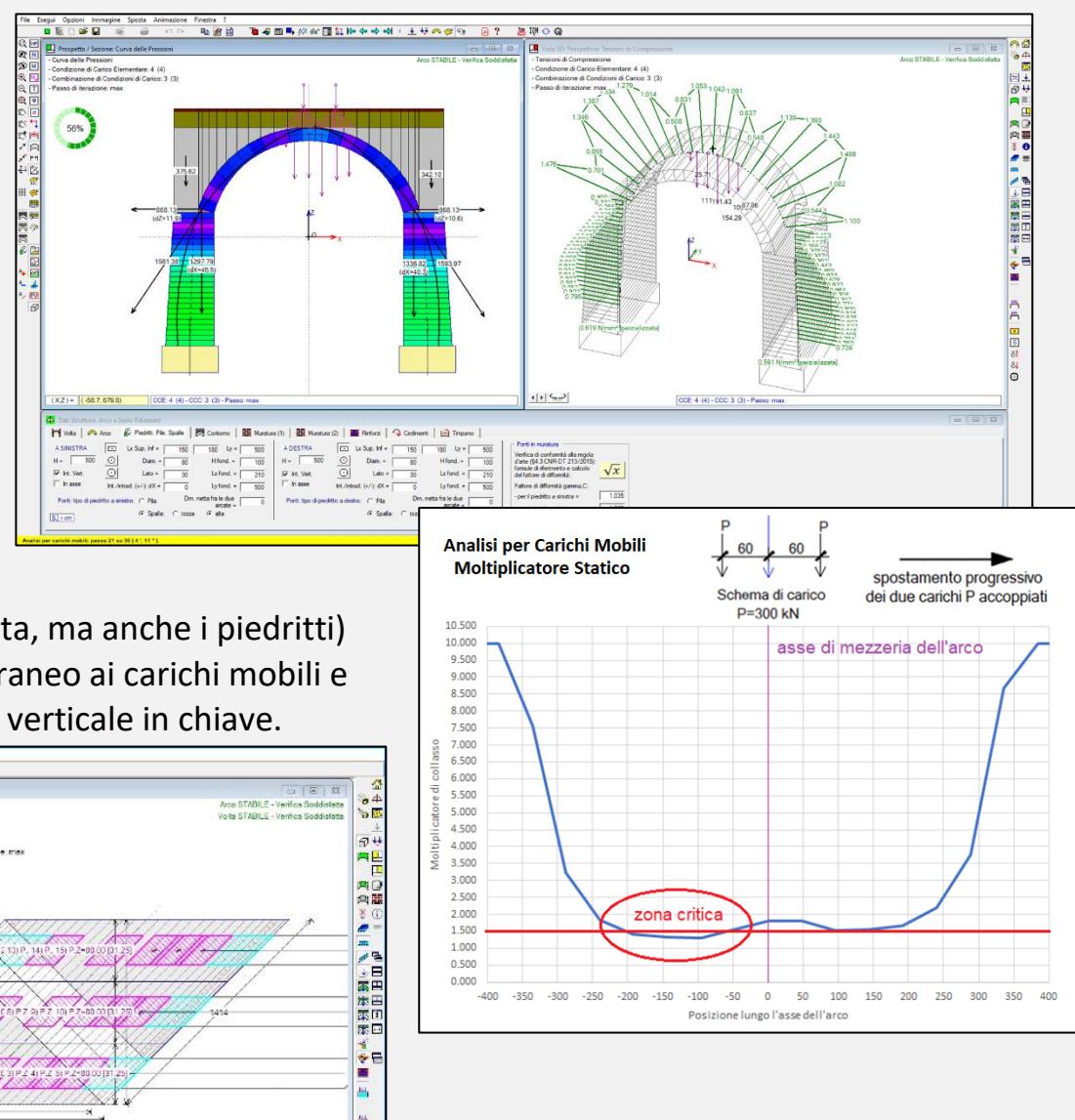
Aedes versioni 2026

Analisi per carichi mobili

Aedes.SAV studia le capacità statiche e sismiche dei sistemi voltati in muratura sottoposti a carichi concentrati mobili, valutandone gli effetti attraverso parametri tipicamente rappresentativi, quali i **moltiplicatori di collasso statico e sismico** e l'**indicatore di rischio sismico**, coerentemente con le indicazioni normative CNR-DT 213/2015.

L'analisi per carichi mobili individua la posizione più sfavorevole dei carichi attraverso una serie di elaborazioni di calcolo che risolvono il sistema voltato, tenendo conto:

- del comportamento statico e sismico
- di tutte le possibili cause di crisi (stabilità, resistenza per compressione, scorrimento nei conci)
- degli effetti sul sistema voltato completo (non solo l'arcata, ma anche i piedritti)
- di disposizioni generiche del carico distribuito contemporaneo ai carichi mobili e più in generale di **carichi non simmetrici** rispetto all'asse verticale in chiave.

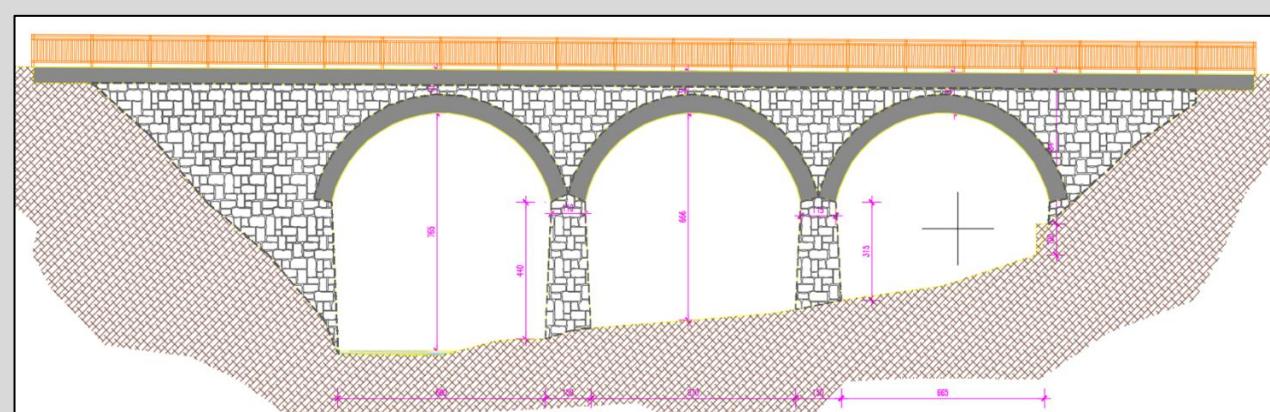
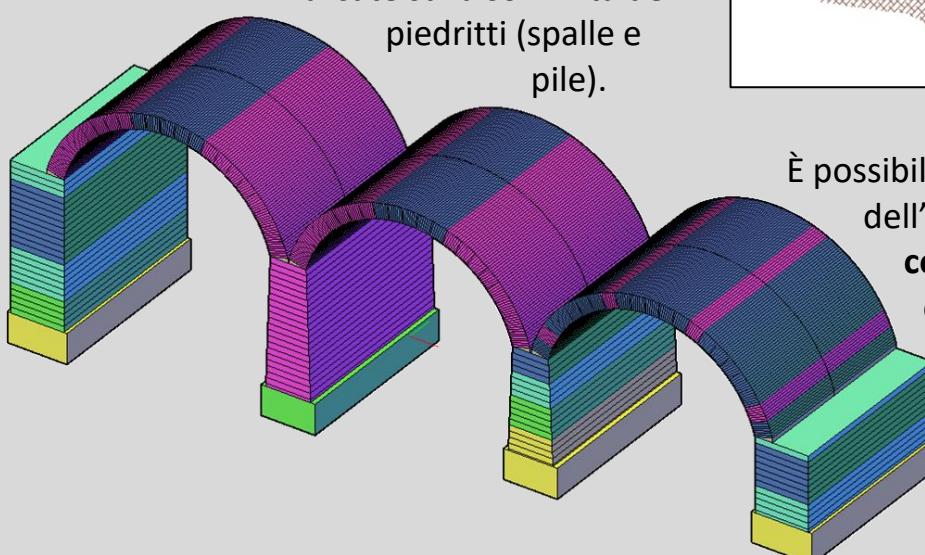


[Scopri di più sull'analisi per carichi mobili in Aedes.SAV, attraverso questo video esplicativo](#)

Aedes.SAV 2026 Funzionalità avanzate per ponti stradali e ferroviari

Ponti multicampata

L'analisi dei ponti multicampata viene condotta con Aedes.SAV con un **modello unitario organizzato per sottostrutture connesse fra loro da azioni di interscambio**. Le sottostrutture sono le singole campate e le azioni di interscambio sono trasmesse dalle arcate sulla sommità dei piedritti (spalle e pile).



È possibile considerare l'**azione sismica trasversale** (ortogonale al piano dell'arcata), molto importante per le pile; più in generale, SAV gestisce la **combinazione sismica direzionale**, con le due direzioni orizzontali X e Y e la verticale Z.

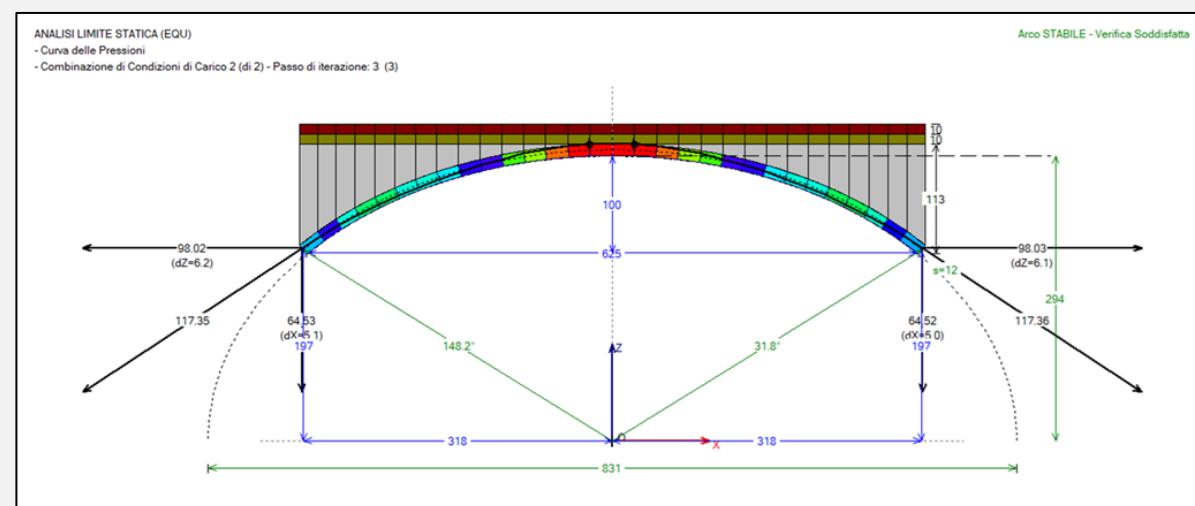
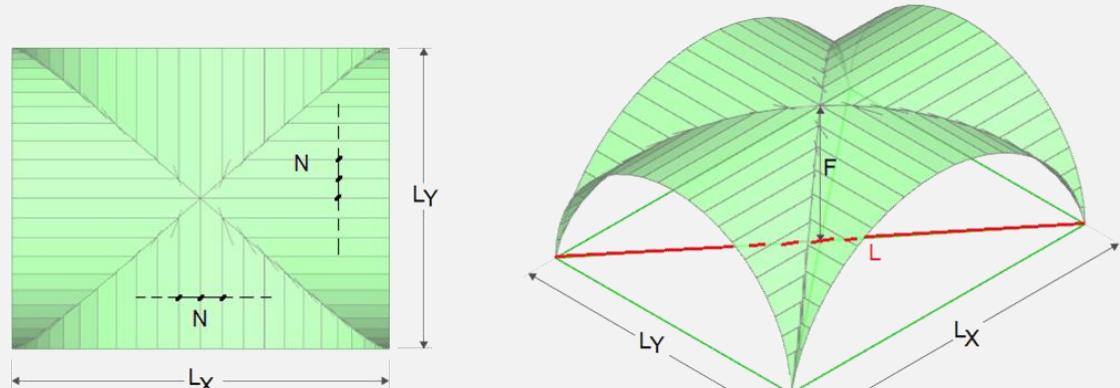
Si possono modellare configurazioni eccezionali a seguito della **crisi di una singola campata**, con l'obiettivo di evitare il crollo delle campate adiacenti.

Aedes versioni 2026

Aedes.SAV 2026 Funzionalità avanzate

Volte a Crociera

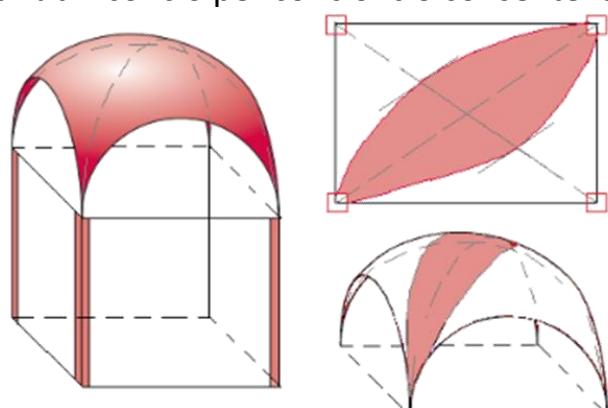
Per le volte a crociera, appositi comandi permettono la **definizione automatica dell'arco diagonale sia dal punto di vista geometrico che da quello dei carichi**, consistenti nelle azioni verticali e nelle spinte applicate dalle lunette ai conci dell'arco diagonale stesso.



Viene gestita la forma ellittica dell'arco diagonale, generata dall'intersezione di due volte a botte (cilindriche) con generatrice circolare.

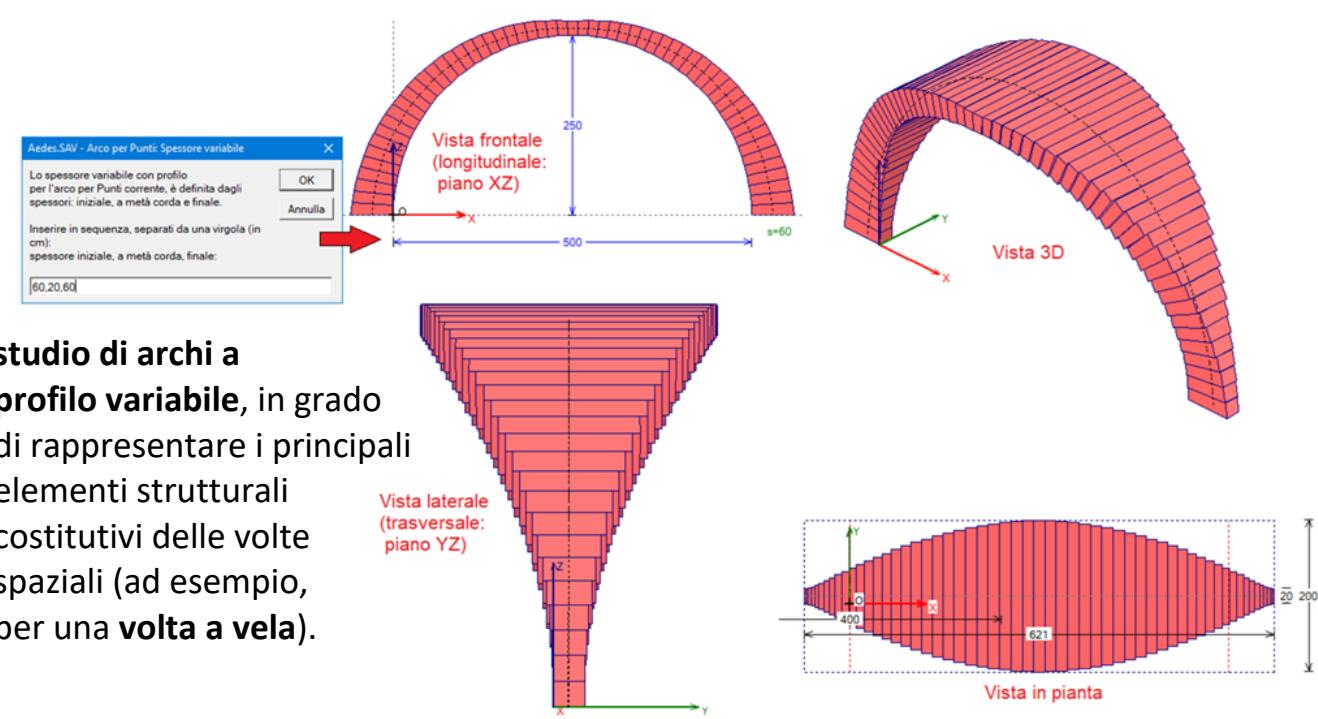
Archi a profilo variabile

SAV opera su un modello piano di arco, dove profondità e spessore possono essere variabili concio per concio: ciò consente lo

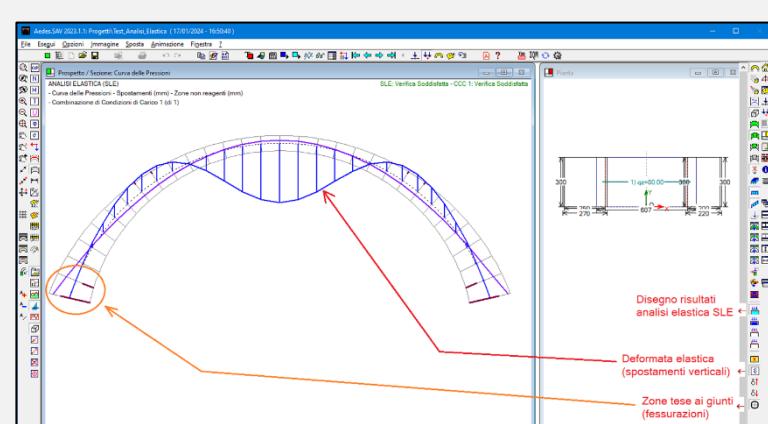


studio di archi a profilo variabile, in grado di rappresentare i principali elementi strutturali costitutivi delle volte spaziali (ad esempio, per una volta a vela).

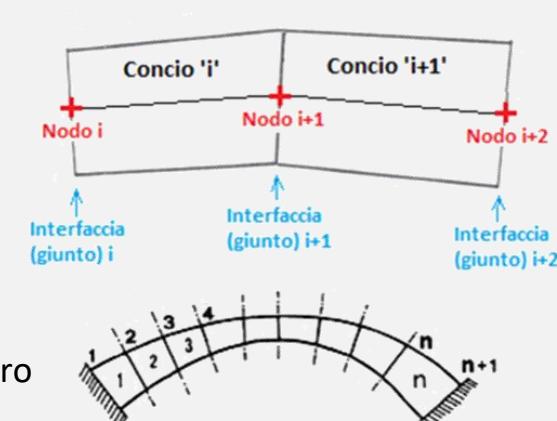
Mediante comandi dedicati, il profilo variabile può essere elaborato agevolmente internamente a SAV a partire da una tipologia notevole, ad esempio un arco a tutto sesto.



Analisi Elastica (SLE)



L'analisi elastica in SAV, di tipo **non lineare con muratura non reagente a trazione** (secondo §8.4.2 CNR-DT 213/2015), è finalizzata alle verifiche per **Stato Limite di Esercizio**, ed è condotta secondo un modello ad elementi finiti (FEM) **non resistenti a trazione** e applicando un **procedimento iterativo** che corregge le proprietà statiche delle **sezioni trasversali** in base alla sola parte reagente a compressione. La visualizzazione dell'arco reagente a compressione, innovazione introdotta da SAV, sia per SLE che per SLU, evidenzia lo scheletro portante della struttura sotto i carichi agenti.



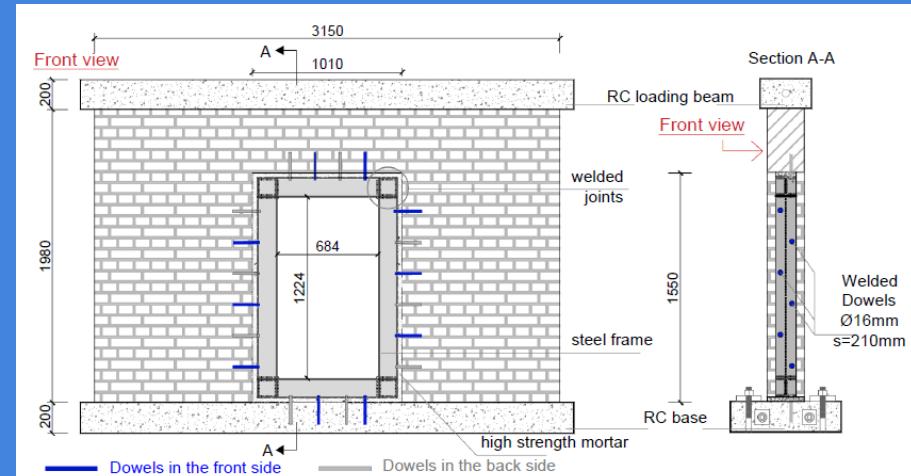
Aedes.ACМ 2026

Aperture e telai di cerchiatura con effetti degli ancoraggi telaio-muratura

Gli interventi di consolidamento su costruzioni esistenti in muratura implicano la necessità di garantire **collegamenti efficaci fra i vari elementi strutturali**. I progetti riguardanti aperture con telai di cerchiatura prevedono in generale **un sistema di ancoraggio per il collegamento fra telaio e muratura adiacente**.

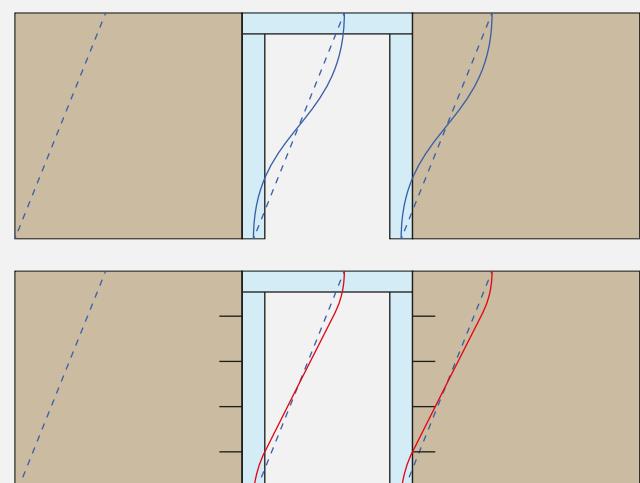
Gli effetti strutturali degli ancoraggi che in una parete con apertura collegano telaio e muratura sono stati **finora frequentemente trascurati in ambito professionale**; tuttavia, studi accademici condotti con metodi FEM e test sperimentali hanno mostrato la **rilevanza di tali effetti**.

Per analizzare correttamente il sistema muratura-telaio con ancoraggi nelle applicazioni professionali, **Aedes.ACМ propone una metodologia innovativa** inquadrata nella consueta procedura di composizione in parallelo delle capacità degli elementi costitutivi. È così possibile includere agevolmente nelle valutazioni di sicurezza il contributo offerto dal sistema di ancoraggio.



*Tipico sistema di collegamento telaio-muratura con disposizione degli ancoraggi alternata lungo l'elevazione**

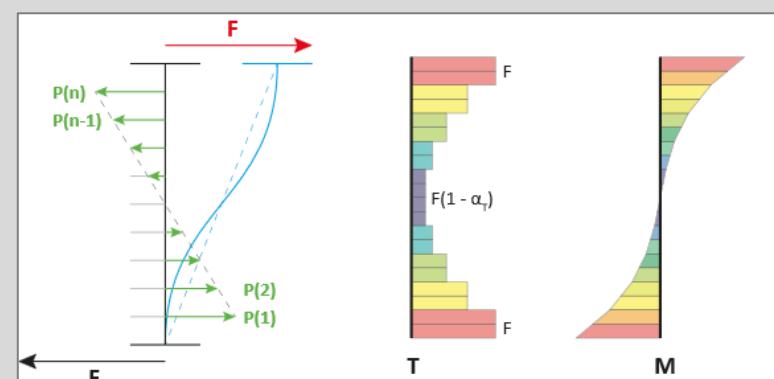
In una parete in muratura rinforzata con un telaio di cerchiatura il **comportamento strutturale sotto azione sismica longitudinale** è caratterizzato da una differente modalità deformativa tra il telaio e i maschi murari adiacenti.



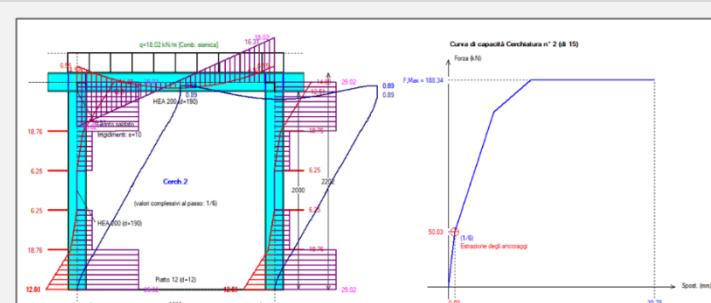
Il telaio di cerchiatura, per sua natura snella e flessibile, tende a deformarsi prevalentemente per flessione: la deformata assume quindi un andamento curvilineo, con rotazioni nulle in corrispondenza degli estremi incastriati. I maschi murari, invece, soprattutto se caratterizzati da bassa snellezza (maschi tozzi), manifestano un comportamento dominato dalla deformazione tagliente, che si traduce in una deformata pressoché lineare.

Quando i montanti del telaio sono opportunamente collegati ai maschi murari tramite sistemi di ancoraggio efficaci, il loro comportamento non è indipendente: nella zona di vincolo essi sono costretti a adattarsi al campo di spostamenti dei maschi tozzi, assumendo quindi una deformata localmente più vicina a quella lineare che caratterizza gli elementi murari.

Aedes.ACМ propone una metodologia innovativa per considerare l'effetto degli ancoraggi in un modello in cui il telaio di cerchiatura viene analizzato separatamente dal resto della parete. Gli ancoraggi sono tenuti in conto attraverso una **serie di carichi concentrati applicati lungo l'asta**, la cui entità dipende dalla rigidezza del sistema di ancoraggio. Si definisce un coefficiente denominato α_T , compreso fra 0 e 1, pari alla frazione dell'azione tagliente (F) all'estremo del montante che si assume venga trasferita agli ancoraggi presenti sul cosiddetto *braccio del taglio*. La formulazione con cui vengono determinate le forze agenti sul montante in corrispondenza degli ancoraggi dipende dalle **condizioni di vincolo ipotizzate**.



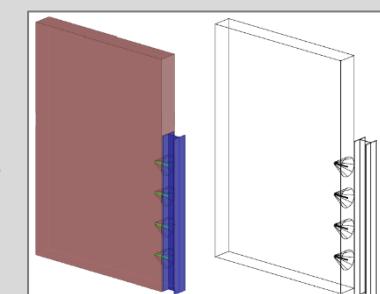
Schema shear-type: forze equivalenti negli ancoraggi, diagramma di taglio (T) e momento (M)



La **curva di capacità** del telaio di cerchiatura descrive la risposta del telaio sotto l'azione di una forza orizzontale F applicata in sommità con valori progressivamente crescenti. Qualora i maschi murari adiacenti al telaio presentino una rigidezza elevata e una snellezza ridotta, con una deformata determinata prevalentemente dal taglio e quindi di tipo lineare, e i montanti del telaio risultino collegati a tali maschi tramite opportuni sistemi di ancoraggio, oltre alla forza F si considerano anche le **forze equivalenti degli ancoraggi**.

Ad ogni passo dell'analisi incrementale vengono verificate le condizioni di sicurezza sia per le sezioni di estremità degli elementi del telaio (montanti, architrave, traverso inferiore, incluso i giunti) sia per il sistema di ancoraggio.

La **verifica di resistenza del sistema di ancoraggio** consiste nel controllare che la massima forza di trazione in ciascun ancoraggio sia inferiore alla sua capacità in termini di resistenza. Questa si considera governata dal **meccanismo di estrazione** che chiama in causa la resistenza a taglio della muratura: si assume che la porzione di muratura coinvolta sia assimilabile a una superficie tronco-conica sulla quale agisce la tensione tangenziale massima di progetto τ_d sviluppabile dal materiale.



* Vera M.Y.O., Metelli G., Barros J.A.O. Barros, Plizzari G.A.: Effectiveness of a steel ring-frame for the seismic strengthening of masonry walls with new openings, Engineering Structures 226, 2021

Aedes versioni 2026

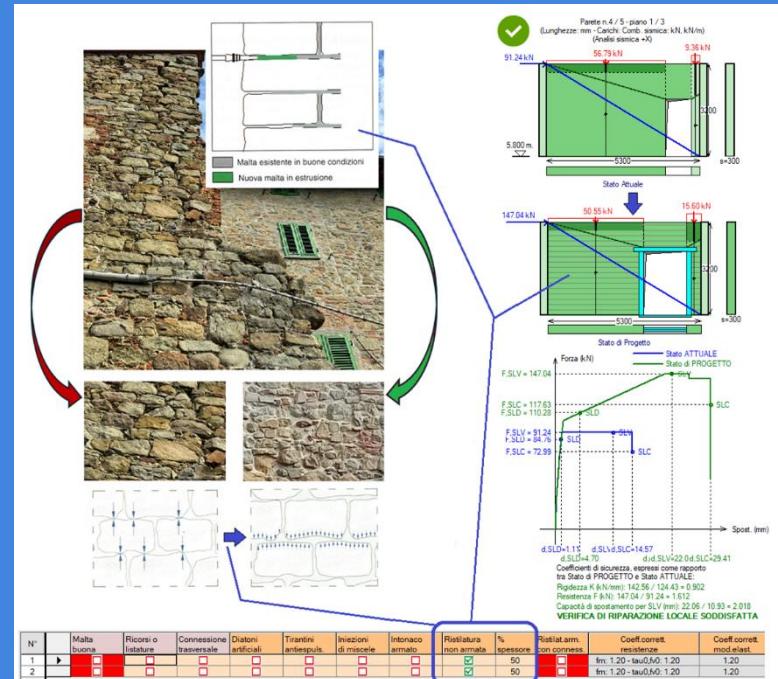
Aedes.ACМ 2026

Interventi locali su murature scadenti: disgregazione, ristilatura dei giunti

Il fenomeno della **disgregazione** è evidenziato esplicitamente nei contenuti della Normativa Tecnica. In §C8.7.1.2.1, dedicato all'analisi dei meccanismi locali, si specifica che "la rappresentazione della struttura come catena cinematica di corpi rigidi è attendibile solo se la parete non è vulnerabile nei riguardi di fenomeni di disgregazione".

Aedes.ACМ consente di tenere conto di tale aspetto nella verifica di sicurezza condotta nell'ambito di un intervento locale.

La corretta progettazione di un intervento, condotta confrontando il comportamento della parete prima e dopo l'intervento, richiede la valutazione della possibilità di disgregazione, fenomeno particolarmente temibile quando si inseriscono telai di cerchiatura per nuove aperture in murature di scarsa qualità.



Una parete soggetta a possibile disgregazione deve essere modellata tenendo conto del comportamento fragile corrispondente a tale meccanismo.

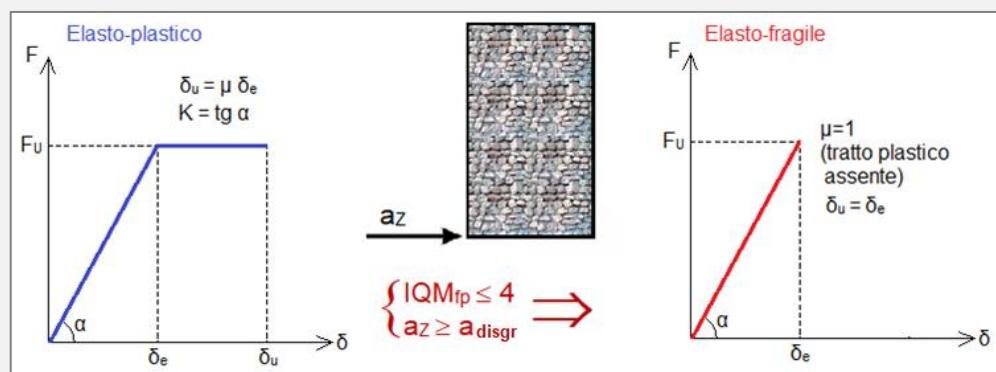


Fig. 1 - Muratura in pietrame fortemente degradata per erosione e decoesione dei giunti di malta. Il degrado avanzato delle malte può provocare il distacco dei blocchi lapidei con instabilità e caduta degli stessi.

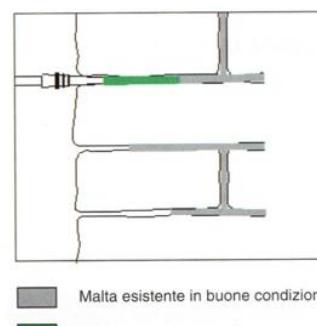
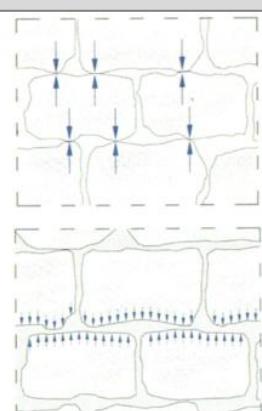


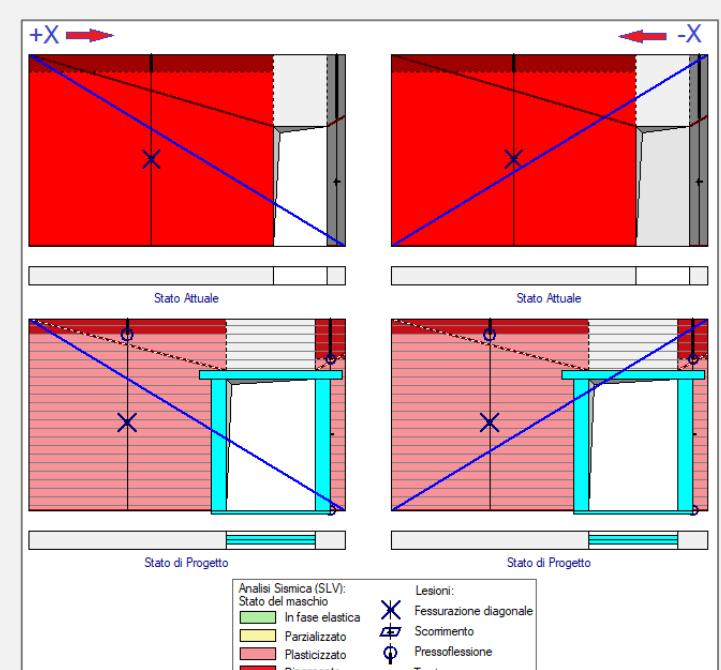
Fig. 4 - Schema di intervento

In tali casi, la rigenerazione della muratura, ad esempio tramite ristilatura profonda dei giunti di malta, è da considerarsi indispensabile.

La Normativa vigente, pur considerando esplicitamente il meccanismo di disgregazione e l'intervento di ristilatura dei giunti non armata, non fornisce per tali aspetti modalità di calcolo specifiche.

La Ricerca condotta da Aedes ha reso disponibile per il software ACM criteri di calcolo coerenti con le indicazioni normative, attraverso i seguenti punti:

- definizione del comportamento elasto-fragile di pareti soggette a possibile disgregazione
- calibrazione dei coefficienti correttivi per la ristilatura non armata dei giunti



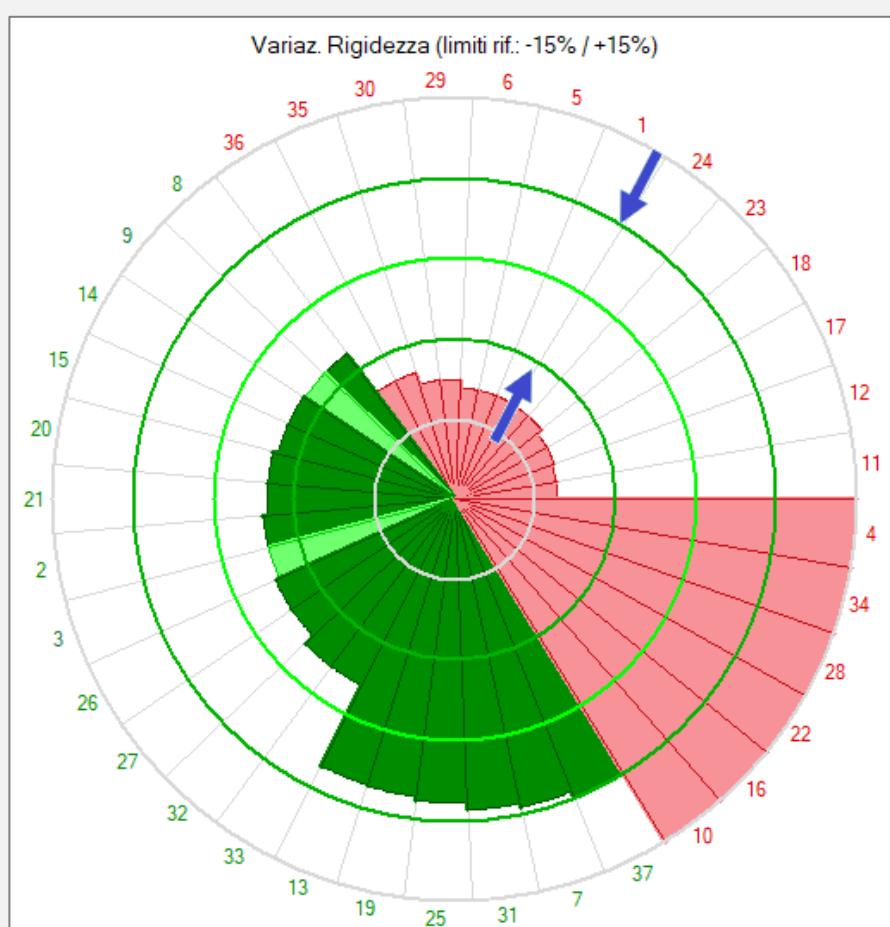
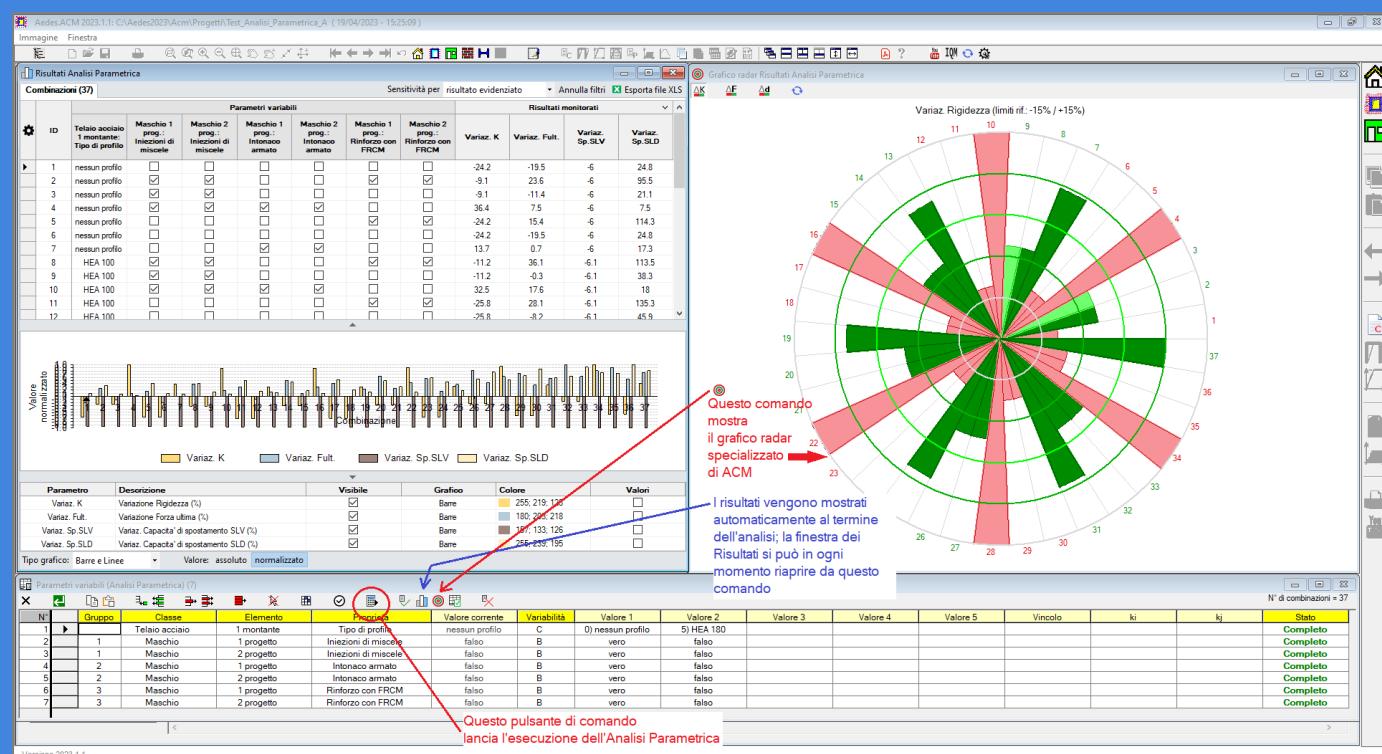
Verifica di una parete: disgregazione allo stato attuale, rigenerazione della malta allo stato di progetto

Aedes versioni 2026

Aedes.ACm 2026

Analisi Parametrica: ottimizzazione dell'intervento locale

Aedes.ACm propone l'Analisi Parametrica, cioè l'elaborazione automatica di una serie di verifiche di sicurezza, in termini di rigidezza, resistenza e capacità di spostamento, considerando la variazione di alcuni parametri definiti dall'utente. Attraverso l'Analisi Parametrica è possibile **ottimizzare il progetto di consolidamento a seguito delle modifiche su pareti in muratura, e inquadrare correttamente i tipi di intervento che rispettano i criteri per la Riparazione Locale.**

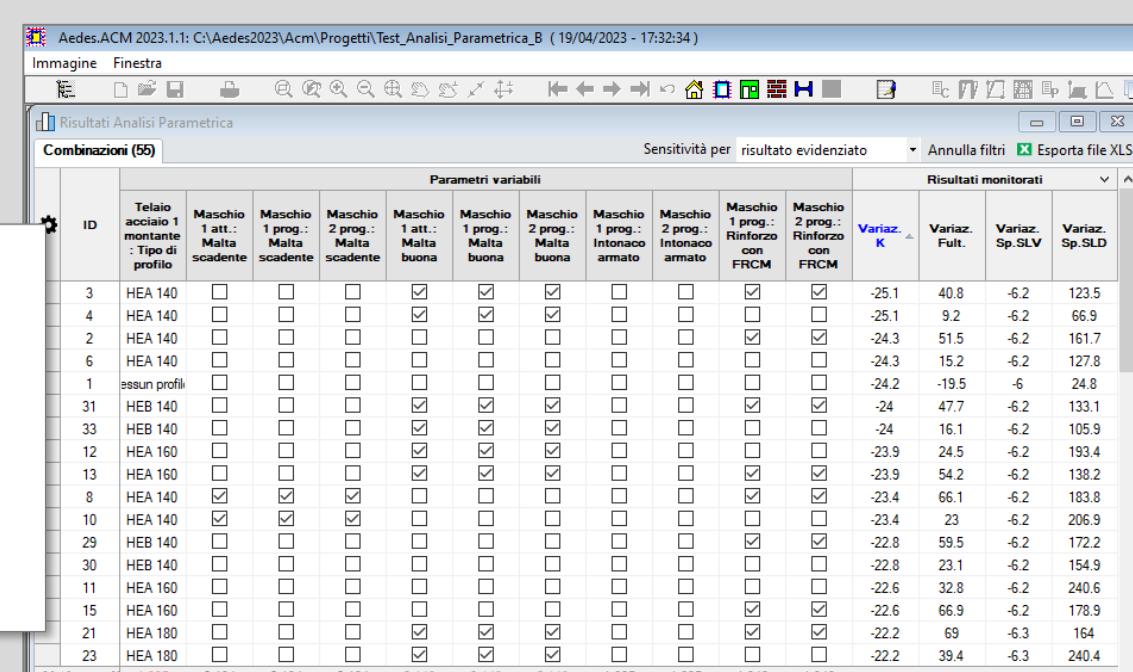
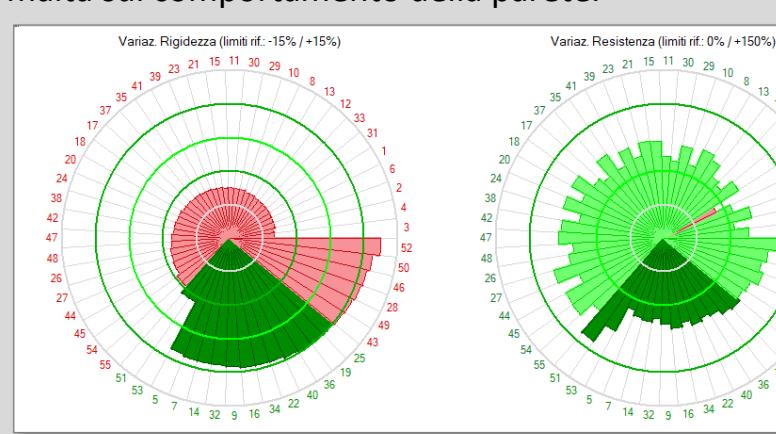


Scelto un insieme di parametri variabili di progetto, si generano N combinazioni, ciascuna analizzata dall'Analisi Parametrica: in un **grafico radar specializzato**, consistente in un istogramma circolare, gli spicchi corrispondenti alle singole combinazioni vengono colorati con riferimento a due cerchi interni che determinano la zona di verifica di sicurezza soddisfatta.

I principali risultati del software ACM consistono nelle **variazioni tra Stato Attuale e Stato di Progetto di rigidezza, forza ultima e capacità di spostamento**: queste vengono confrontate con i limiti accettabili per un intervento di riparazione locale, corrispondenti ai limiti definiti in input nella finestra Pareti (scheda Calcolo(1)). Ad esempio, per la rigidezza si adottano frequentemente i limiti inferiore -15% e superiore +15%.

Le applicazioni dell'Analisi Parametrica non riguardano solo la definizione degli interventi per lo Stato di Progetto. Ad esempio, l'**analisi può essere utilizzata per conoscere gli effetti di parametri incerti sui materiali**.

Un esempio è la malta della muratura esistente, che potrebbe essere qualificata standard, oppure peggiore (malta scadente) o migliore (malta buona). I risultati dell'analisi mostrano l'influenza della qualità della malta sul comportamento della parete.

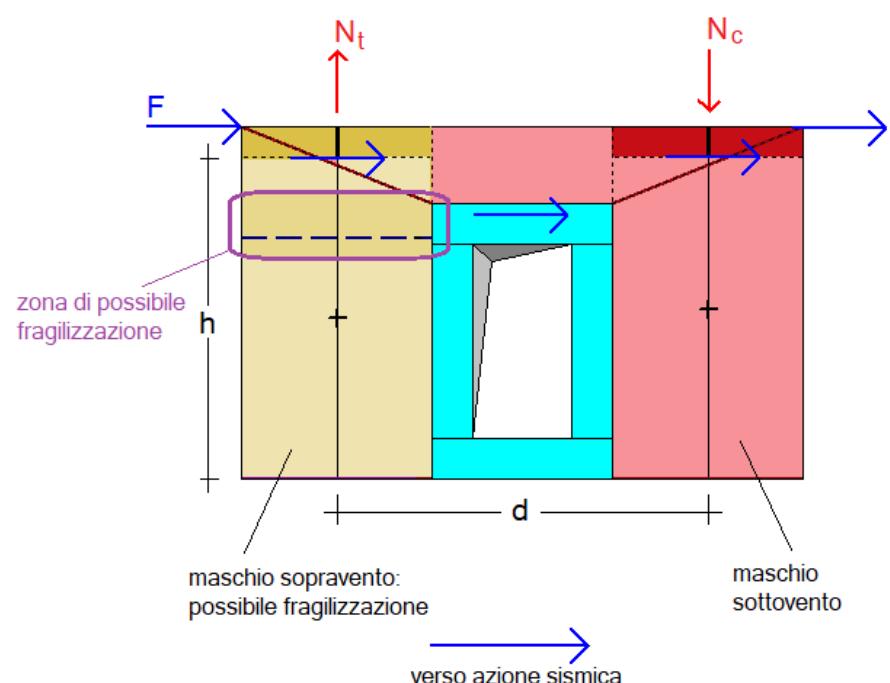


Aedes versioni 2026

Aedes.ACМ 2026 Funzionalità avanzate e procedure di validazione

Controllo di fragilizzazione dei maschi sopravento

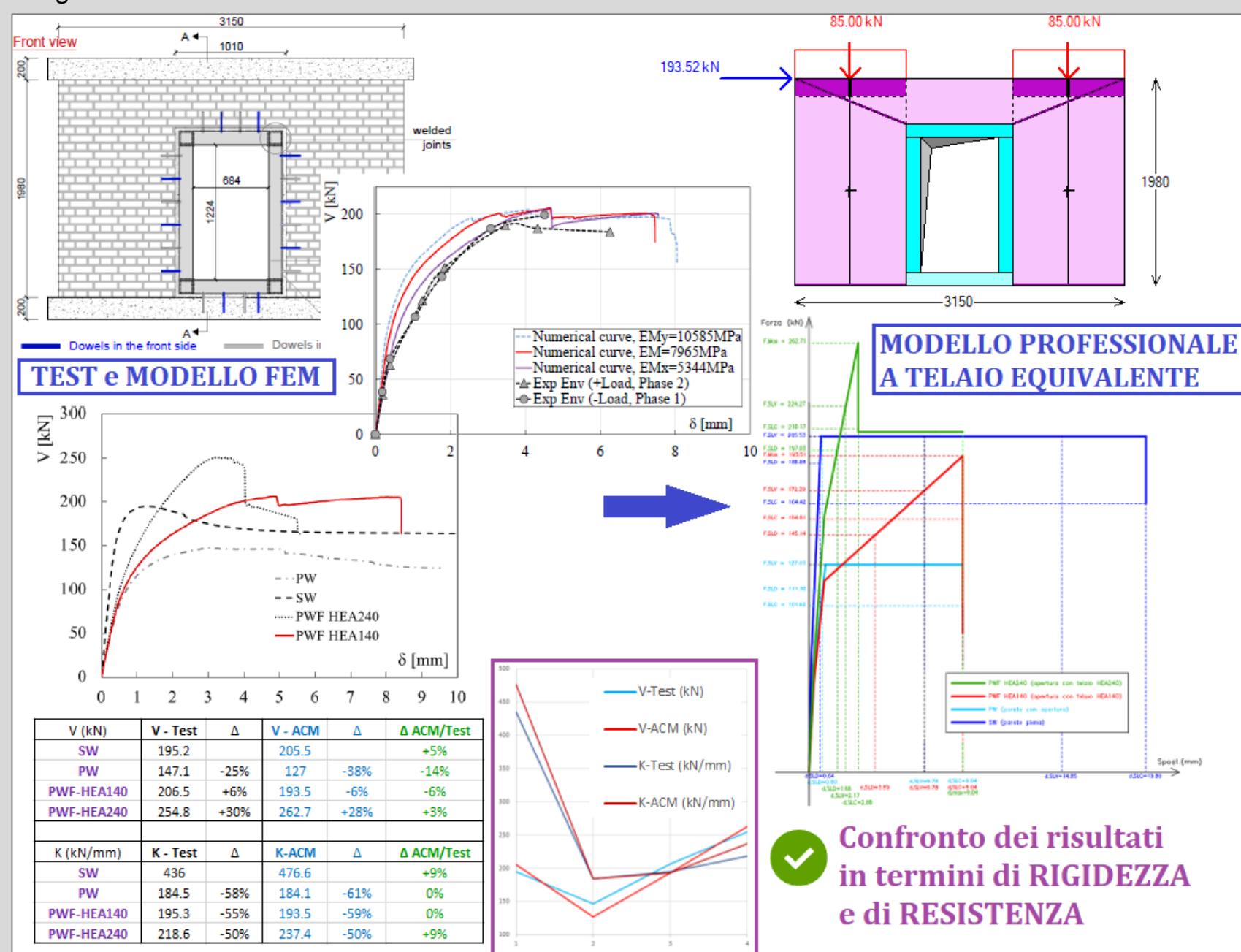
Aedes.ACМ propone la **gestione della crisi per trazione** che può insorgere in un maschio murario adiacente ad un telaio di cerchiatura qualora il **telaio abbia resistenza eccessiva** e tenda ad assorbire tutta la forza sismica orizzontale. Grazie a questo controllo, profili del telaio troppo resistenti rispetto alle murature adiacenti non soddisfano la verifica di riparazione locale. La **forza di fragilizzazione del maschio sopravento** limita la forza orizzontale massima esplicabile dal telaio di cerchiatura, con conseguente caduta di taglio nella curva di capacità complessiva della parete. Ne deriva così la **necessità di un nuovo dimensionamento del telaio**, in grado di garantire un miglior comportamento complessivo della parete.



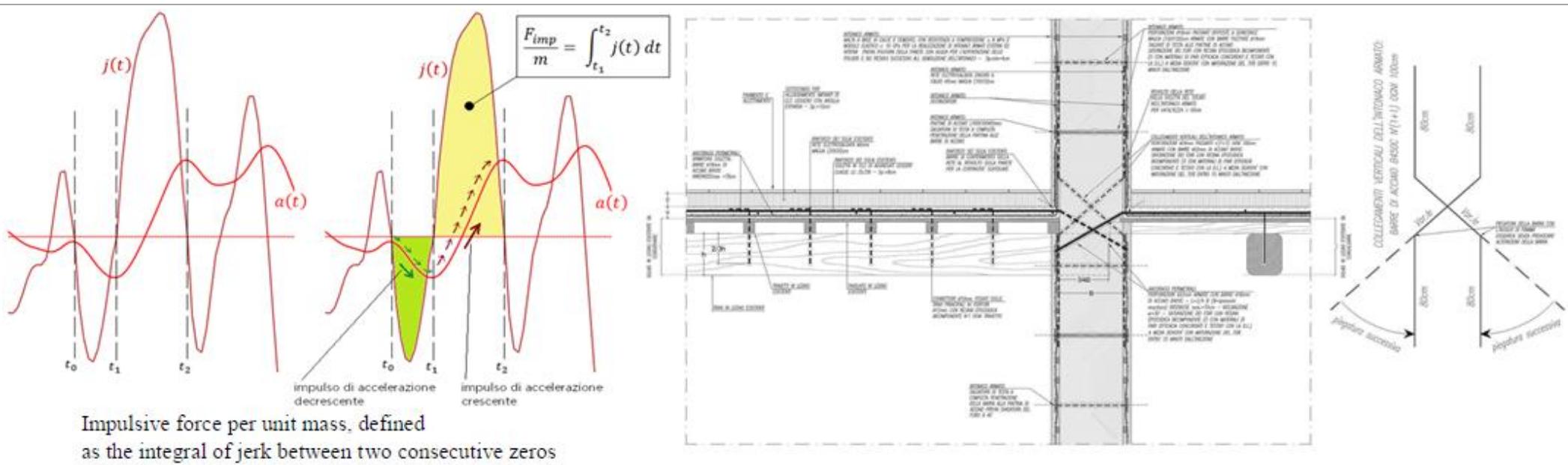
Validazione: confronto con test sperimentali e teorici

Con riferimento ad un test sperimentale condotto presso l'Università di Brescia, supportato da un modello teorico avanzato, le **funzionalità del metodo a telaio equivalente** implementate nel software Aedes.ACМ dimostrano:

- la corretta rappresentazione dei risultati sperimentali e numerici ottenuti dal test
- la possibilità di individuare una **soluzione progettuale efficace** e rispondente ai requisiti di sicurezza richiesti dalla Normativa vigente.



Aedes versioni 2026



Impulsive force per unit mass, defined as the integral of jerk between two consecutive zeros

Immagine tratta dall'articolo scientifico: Mariani M., Pugi F.: Effects of impulsive actions due to seismic jerk and local failures in masonry structures, EuroDyn 2020, Athens, Greece, 23-26 November 2020

Aedes.SLC 2026

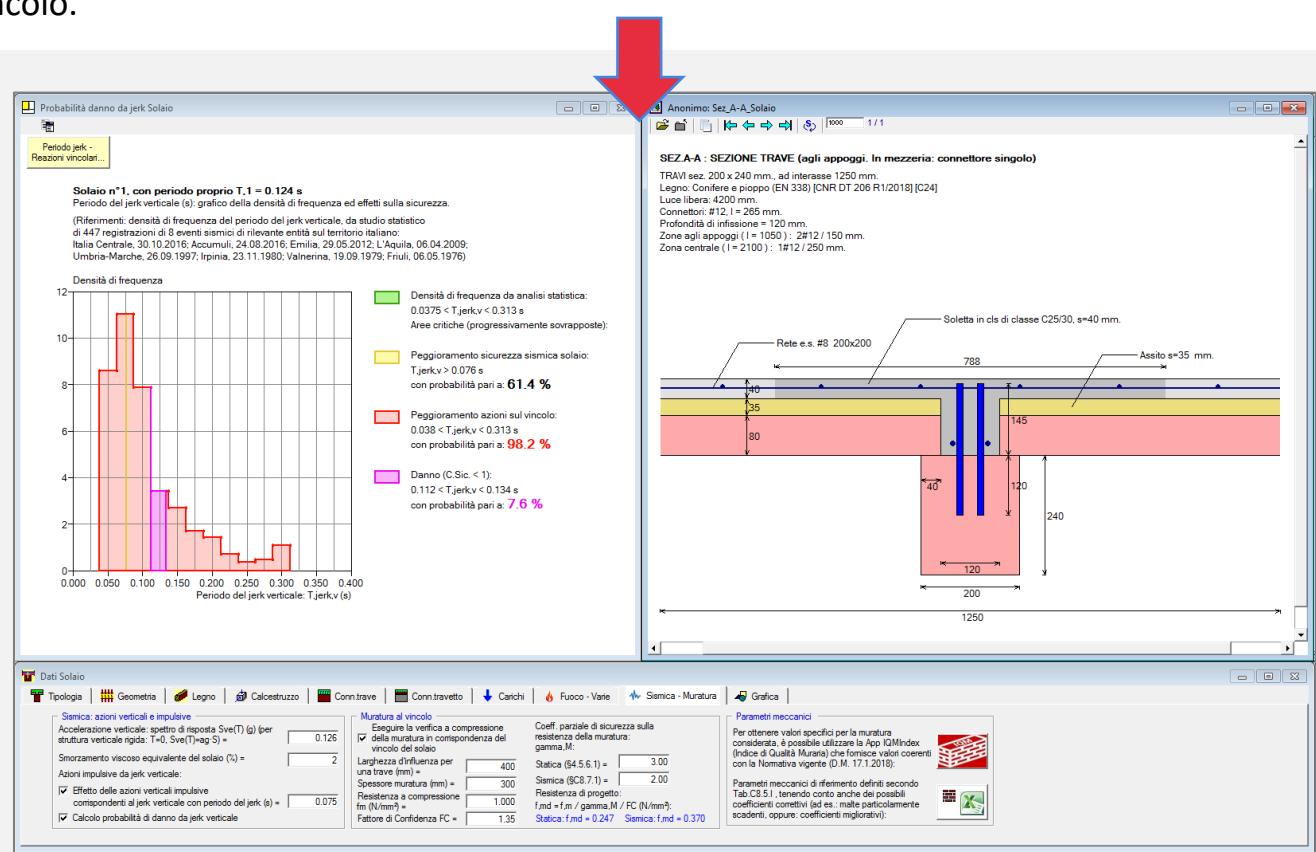
Azioni sismiche impulsive ed effetti sui nodi di collegamento

Il jerk, derivata prima dell'accelerazione, è la componente fondamentale delle azioni impulsive corrispondenti al contenuto in alta frequenza del moto sismico. Il susseguirsi continuo delle variazioni di accelerazione per intensità e per direzione nel corso dell'evento sismico, determina **impulsi** (martellamento, scrollamento, scuotimento, ecc.) che, nelle strutture in muratura, **generano crisi locali delle connessioni**, fenomeni disgregativi e accumulo del danno con riduzione progressiva della duttilità.

Nei solai, la struttura può essere interessata da un'amplificazione delle sollecitazioni, con repentine ed istantanee variazioni, qualora la sua frequenza principale sia 'vicina' a quella del jerk. Gli **effetti di risonanza** possono impegnare notevolmente la struttura orizzontale, che a sua volta trasmette azioni al vincolo incrementate in modo significativo rispetto ai valori statici e continuamente soggette, durante l'evento sismico, a sbalzi in aumento e in diminuzione. Le **strutture resistenti del vincolo** (muratura, connessioni) risultano così soggette ad uno 'stress' legato a questo fenomeno di martellamento e così anche se il solaio di per sé è in grado di sostenere le sollecitazioni, può invece generarsi una crisi nel dispositivo di vincolo.

In particolare, per un solaio in legno-calcestruzzo nato come operazione di consolidamento, queste considerazioni suggeriscono l'opportunità di **intervenire non solo dal lato solaio ma anche su tutto il nodo strutturale**, coinvolgendo la capacità della muratura almeno per tratti significativi inferiore e superiore rispetto alla quota dell'orizzontamento, in modo da garantire una diffusione senza danni delle tensioni generate dalle azioni locali di martellamento.

In sintesi, il progetto di consolidamento deve prendere in considerazione la probabilità che il contenuto impulsivo dell'azione sismica possa danneggiare il solaio o ancor più il vincolo: è pertanto opportuna una quantificazione del fenomeno. Per i solai misti in legno e calcestruzzo, Aedes.SLC consente l'**analisi delle probabilità di danno per azioni sismiche impulsive**, calcolata in base al comportamento dinamico del solaio.



Aedes.SLC: Analisi degli effetti delle azioni sismiche impulsive sul nodo solaio - parete muraria

App IQMIndex

Indice di Qualità Muraria

I software AEDES propongono il collegamento alla **App IQMIndex**, dedicata all'**Indice di Qualità Muraria**: un parametro molto, molto importante ai fini della corretta valutazione delle capacità meccaniche delle murature esistenti: www.iqmindex.com

La App, creata da **AEDES Software**, con il contributo teorico degli Autori del metodo (Prof. Ing. Antonio Borri e Ing. Alessandro De Maria, con la collaborazione dell'Ing. Giulio Castori) è destinata a tutti gli strutturisti italiani che si occupano di analisi di **edifici esistenti in muratura**, e può essere utilizzata **sia su desktop sia nello smartphone**.

L'utilizzo della App è **TOTALMENTE GRATUITO**: in tal modo AEDES desidera contribuire alla diffusione generale delle corrette metodologie di valutazione di capacità delle murature esistenti, nell'ottica di una crescita culturale condivisa.



Studiando gli eventi sismici che periodicamente hanno interessato il nostro territorio, **quante volte abbiamo visto immagini di murature crollate, a volte con meccanismi di collasso geometricamente riconoscibili, molto spesso con disaggregazioni che hanno originato crolli caotici** quasi che gli elementi costitutivi della muratura, abbandonato il legame dato da malte ormai incapaci di coesione, tornino alla loro condizione originaria di ammassi di pietrame, talvolta con immagini che assomigliano a detriti di frane rocciose. Più raramente si sono osservati comportamenti globali con lesioni a taglio e pressoflessione.

Tuttavia, proprio le analisi cinematiche e soprattutto il comportamento globale sono oggetto della maggior attenzione: ad esse corrispondono le elaborazioni più complesse, quali la pushover, oggi molto evoluta ma tale da richiedere capacità modellative e interpretative avanzate e comunque tale da rivestire significato solo quando l'edificio è in sicurezza nei confronti dei meccanismi disaggregativi e di quelli cinematici.

Il grado di attendibilità delle modellazioni è fortemente **condizionato dalla conoscenza dei valori reali dei dati in input**, in primis le caratteristiche meccaniche delle murature.

SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA QUALITA' MURARIA								NUM. 06			
		FOTO									
		SCHEMI									
		Assonometria	Prospetto	Sezione							
Muratura di blocchi di pietra squadrata a doppio paramento.		DESCRIZ.									
Muratura interna ed esterna realizzata con blocchi di pietra squadrata con buona tessitura muraria, rispetto dei filari orizzontali e sfalsamento dei giunti verticali approssimativo, presenza di diatoni mai completamente passanti e in percentuale ridotta rispetto alla superficie muraria.		MATERIALI									
Pietre calcaree di vario tipo: calcare bianco e rosato.		GEOMETRIA									
Macigno di Scheggia e Gubbio: grigio, simile alla pietra serena toscana, risulta poco compatta.											
Pietra serena del Trasimeno: colore grigastro con infiltrazioni marronastre.											
Malta di calce e sabbia, scadente. Presenza di zeppe.											
	Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi: s = 12 - 25 cm h = 8 - 18 cm l = 15 - 30 cm										
P.D.	MA.	F. EL.	S. G.	R. EL.	OR. EL.	D. EL.	Categoria	Verticali	Fuori piano	Nel piano	ANALISI IOM
PR	PR	R	NR	R	R	PR	Metodo punteggi	A	B	A	
							LMT (sezione)		126	138	
							IQM	7	6,5	5,5	
							Parametri meccanici: valori MIN-MAX	f _m (N/cmq)	E (N/mmq)	τ_0 (N/cmq)	
							476-715	1949- 2700	6,4-9,2		
Il paramento interno è di qualità inferiore con pietre più piccole e giunti verticali spesso non allineati. Si tiene conto di ciò medianti i giudizi sui parametri della regola dell'arte.											

Quali sono i valori corretti da specificare per le proprietà meccaniche? Siamo costretti a forzare i parametri in input con i valori di riferimento proposti dalla tabella normativa? La muratura oggetto di analisi sarà effettivamente in grado di sostenere azioni statiche e sismiche con comportamenti organici fra i diversi elementi strutturali? **Potrà disaggregarsi**, annullando ogni capacità di resistenza geometrica (tipo meccanismi) o di comportamento d'insieme (tipo collaborazione fra pareti portanti)?

L'Indice di Qualità Muraria offre una risposta di grande rilievo a queste domande, e ci conduce verso una valutazione che, partendo dal rispetto delle regole dell'arte muraria, costituisce una fotografia attendibile delle reali particolari proprietà della muratura esaminata. Tutto ciò in piena coerenza con la Normativa vigente.

La scelta dei parametri meccanici (resistenze, moduli di elasticità) non sarà più quindi di fatto limitata alle tipologie di riferimento della tabella normativa: si potranno ottenere informazioni specifiche sulla muratura dell'edificio in esame.