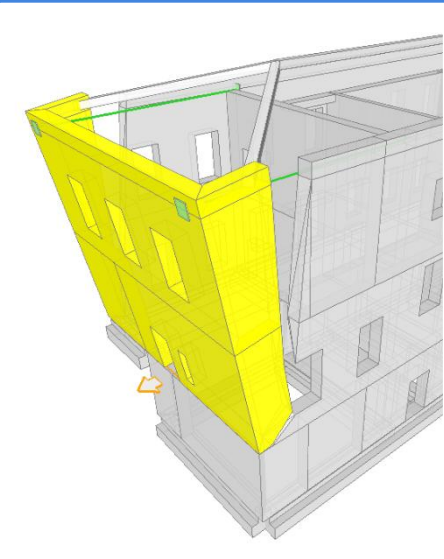


Aedes.PCM 2026

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.

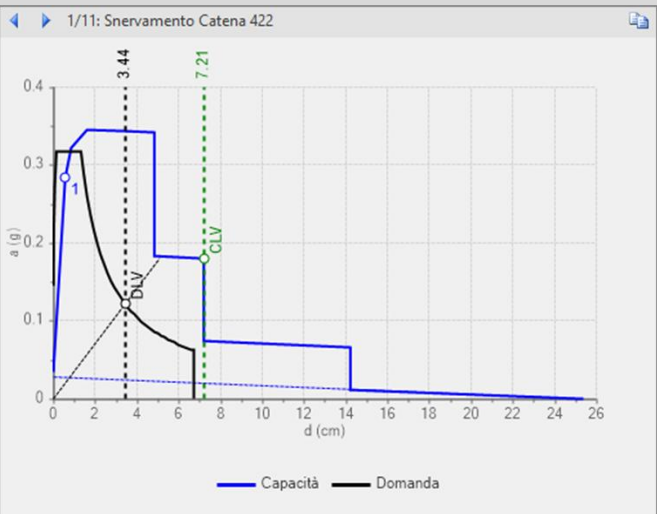


Effetti non lineari considerati

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.

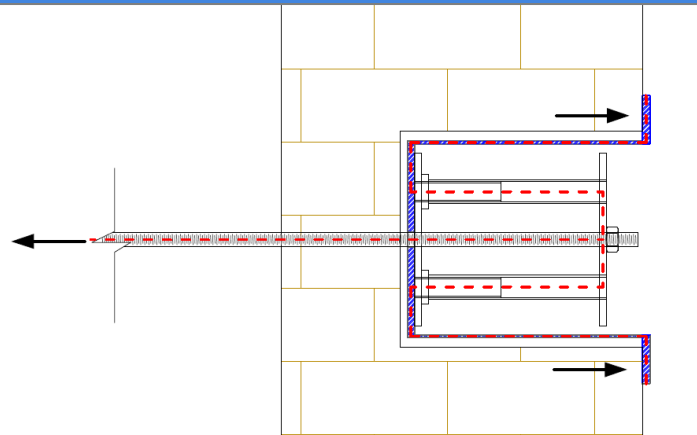
A differenza dei tiranti tradizionali, che entrano in trazione non appena si genera uno spostamento relativo tra le estremità, i **dispositivi dissipativi** introducono un comportamento più evoluto e controllato. Il loro **scopo principale** è duplice:

- **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.

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.



Schema di un dispositivo dissipativo tratto dalle linee guida LICORD

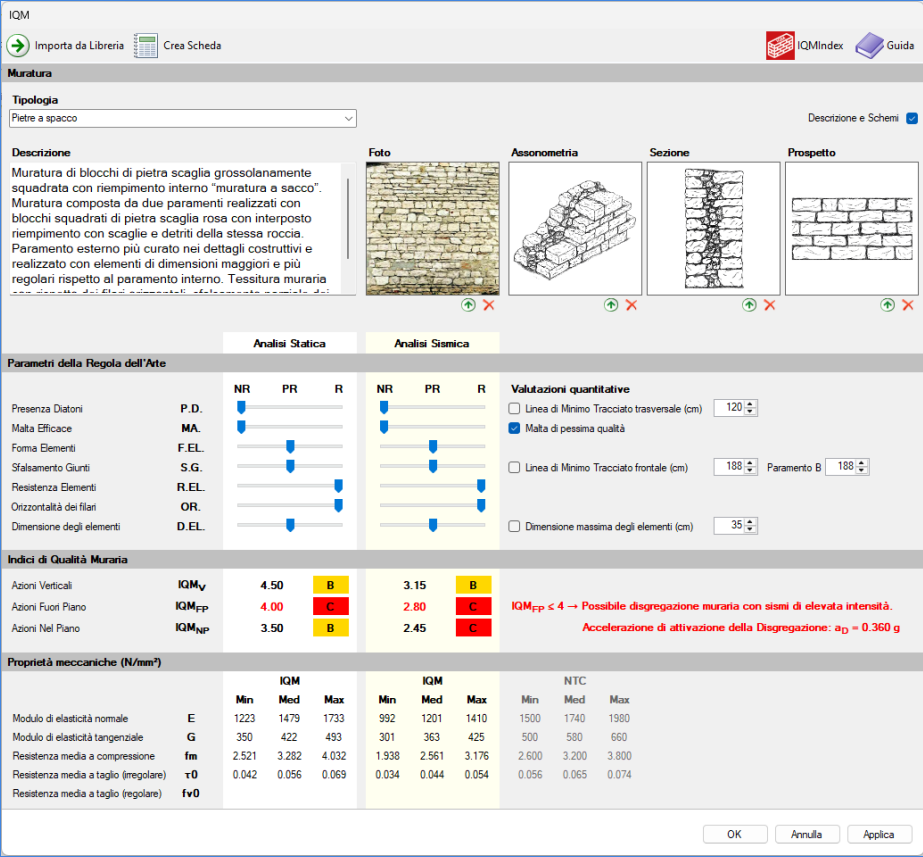
Aedes.PCM 2026

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

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

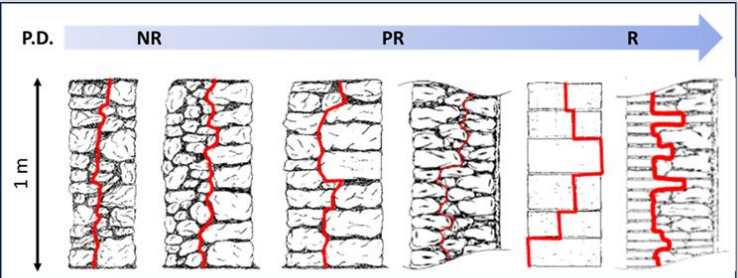
IQM_{FP} Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano

IQM_{NP} Indice di Qualità Muraria per azioni Ne Piano

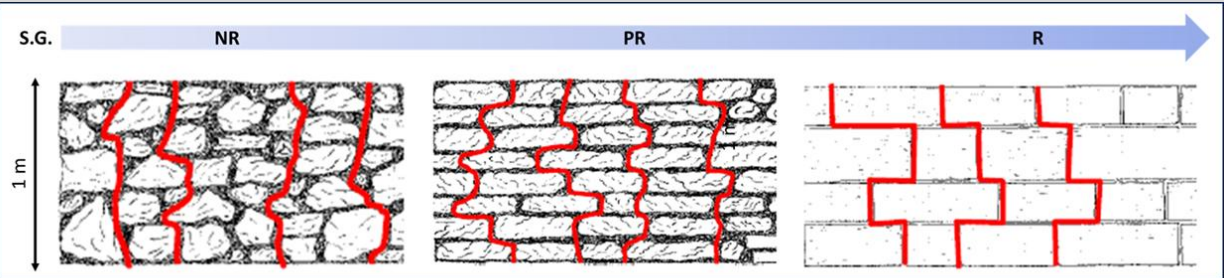
Qualora l’Indice di Qualità Muraria per azioni Fuori Piano sia **IQM_{FP} ≤ 4**, un messaggio indica la **possibile disgregazione muraria con sismi di elevata intensità** e la corrispondente **accelerazione sismica di attivazione**.

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)

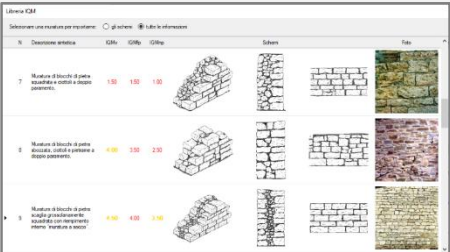


LMT trasversale e sua influenza sul parametro P.D.



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.PCM 2026

Verifica di Disgregazione muraria

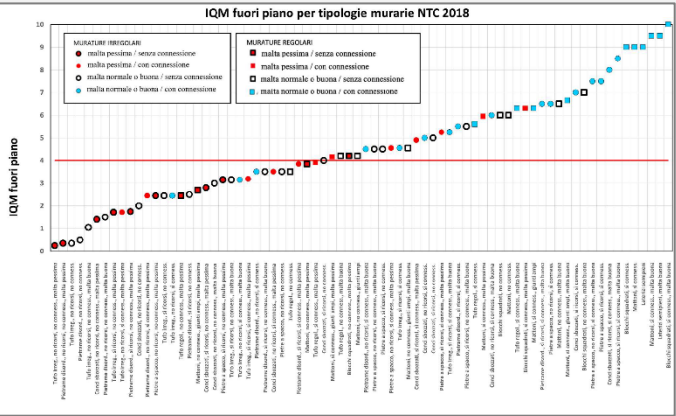
Aedes.PCM consente di effettuare la **verifica di disgregazione muraria** per gli edifici esistenti, un aspetto determinante nel caso di murature storiche dove si rileva una qualità muraria mediocre con scarsa consistenza della malta.

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**”.



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.**

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 cinematismi)	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	Completivo (risposta d’insieme e carichi per zone d’influenza) Assenza di effetti torcenti globali	Migliorare resistenza e capacità deformativa degli elementi resistenti
		Impalcati rigidi	Globale (risposta d’insieme e carichi proporzionali alle rigidezze) Presenza di effetti torcenti globali	Migliorare resistenza e capacità deformativa degli elementi resistenti

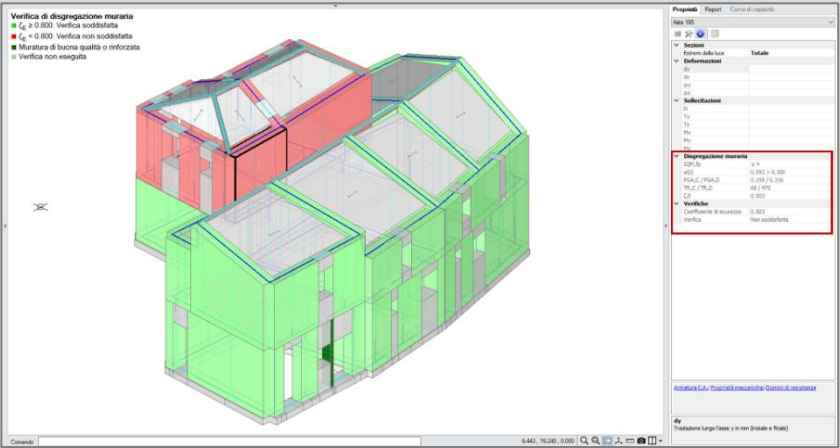


La scarsa qualità identificata con $IQM_{FP} \leq 4$ è una condizione necessaria per la disgregazione, ma affinché il fenomeno si manifesti occorre un’accelerazione sismica di intensità sufficientemente elevata. La **soglia di accelerazione sismica oltre la quale si può innescare il fenomeno disgregativo** 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 qual 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		
Interventi		
Iniezioni	No	
Intonaco armato	No	
Diatoni o tirantini	No	
Ristilatura	Non armata	
- spessore consolidato (%)	50	
Altri interventi	Nessuno	

Aedes.PCM 2026

Volte: varie tipologie e calcolo del peso proprio

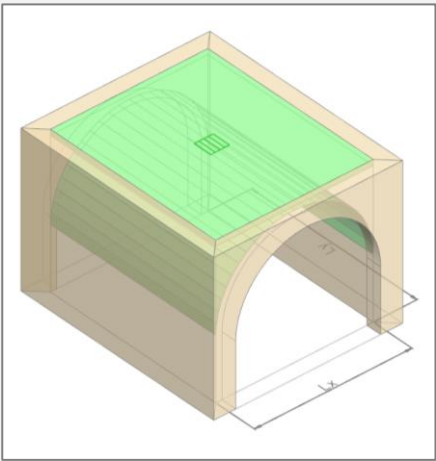
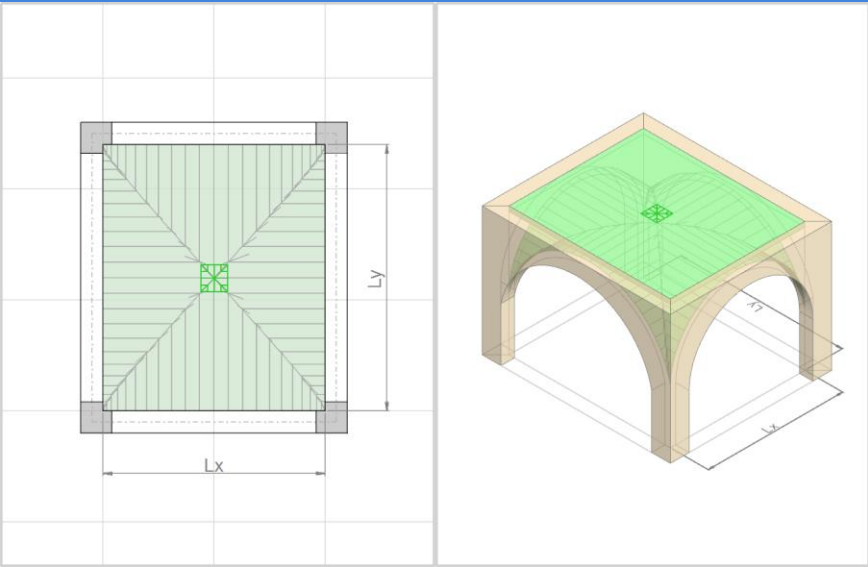
In Aedes.PCM le **volte in muratura** possono essere considerate nel modello per mezzo di solai con tipologia “volta”. Questi elementi, al pari di tutti i solai, hanno la funzione di “raccolgere” carico (peso proprio e carichi superficiali) e distribuirlo agli elementi di contorno sottoforma di carichi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

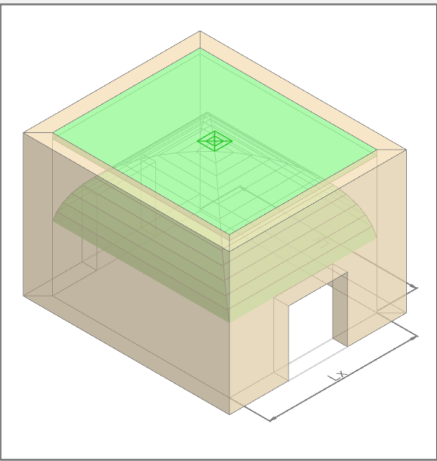
La rappresentazione 3D di solai con tipologia volta o cupola include ora la **superficie di intradosso** che permette all’utente di avere il pieno controllo sulla modellazione e sui parametri in input.

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

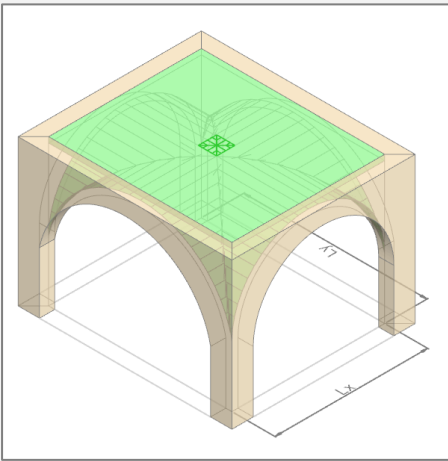
- nel caso di **solai piani e falde**, il peso proprio deve essere **specificato manualmente** dall’utente sotto forma di carico superficiale;
- nel caso di **volte e cupole**, il peso proprio è **considerato automaticamente** dal software sulla base delle proprietà in input.



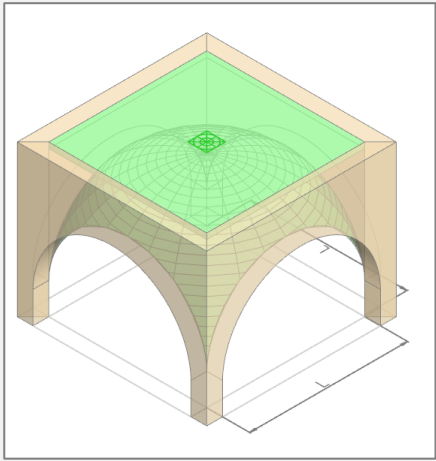
Volta a botte



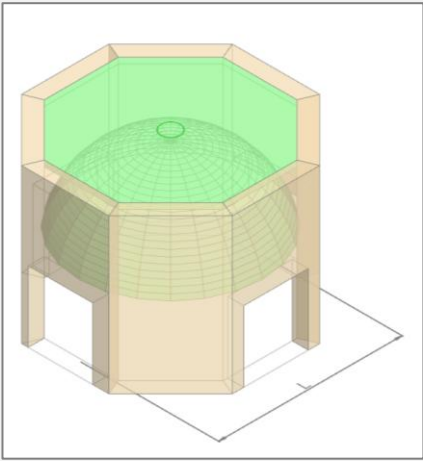
Volta a padiglione



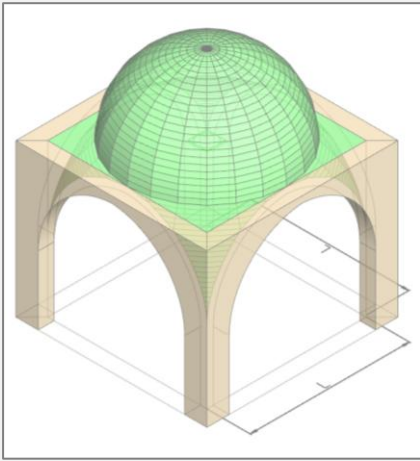
Volta a crociera



Volta a vela



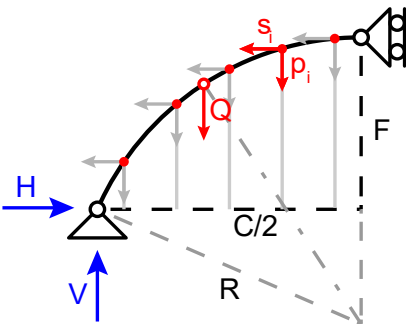
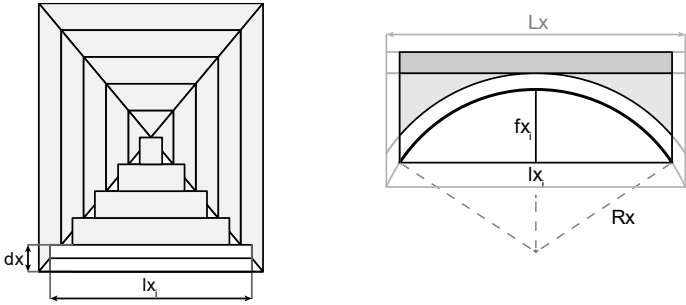
Cupola



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.