

DOCUMENTO redatto da AEDES Software (04.02.2015)

a cura di: Ing. Francesco Pugi

Considerazioni sulla modellazione degli Archi con i software Aedes: SAV, e PCM con ECS

In questo documento proponiamo alcune considerazioni riguardanti l'applicazione dei software Aedes all'analisi di archi e sistemi voltati. In particolare, vengono confrontati i principi fondamentali secondo cui operano SAV, e la nuova estensione di ECS per PCM.

I modelli di **SAV, a conci collegati da bielle**, e di **ECS, con blocchi-giunti o soli blocchi**, sono equivalenti nel senso che hanno il comune scopo di studiare la stabilità dell'arco, identificando la formazione di una cerniera in intradosso o estradosso quando la curva delle pressioni fuoriesce dalla sagoma dell'arco superando la resistenza a trazione. Quest'ultima è sempre nulla in SAV (e quindi la cerniera si forma quando la curva è tangente al bordo), mentre può assumere valori maggiori di zero in ECS (e quindi la curva può fuoriuscire fino al raggiungimento della resistenza a trazione).

In **SAV**, la cerniera corrisponde all'eliminazione della biella di interfaccia (in intradosso o in estradosso) non più compressa.

In **ECS**:

- nel modello **blocchi-giunti**: il giunto ha comportamento analogo alla biella di SAV, ma in questo caso la non reagenza è descritta da uno svincolamento interno;
- nel modello a **soli blocchi**: viene sconnesso il nodo di interfaccia del concio interessato dalla cerniera, inserendo nel nodo una cerniera, e corrispondentemente si definiscono due coppie concentrate agenti sulle due aste di concio che convergono nel nodo dove la verifica di sicurezza è risultata non soddisfatta. La coppia concentrata è pari al momento resistente della sezione, che nel caso di resistenza a trazione nulla del materiale (di tipo 'blocchi e giunti') è pari allo sforzo normale per metà altezza della sezione, altrimenti è maggiore in quanto ad esso contribuisce anche la resistenza a trazione del materiale murario.

Le **teorie** di SAV e di ECS sono distinte:

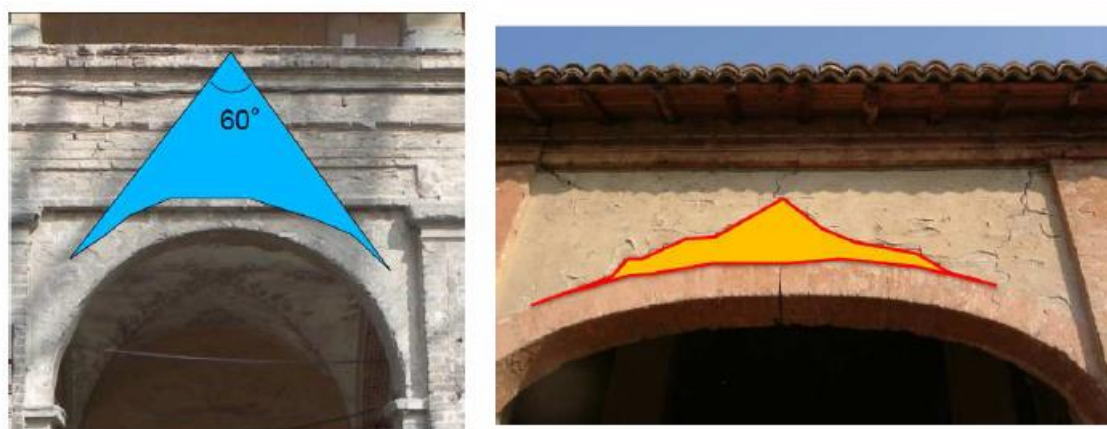
- l'approccio **rigido-fragile in SAV** non consente analisi modali e analisi elastiche. Nel modello infatti le equazioni di equilibrio vengono risolte non attraverso le condizioni di congruenza, secondo la teoria dell'elasticità, ma utilizzando condizioni al contorno: pertanto, il problema statico resta confinato nel campo geometrico;
- **ECS usa invece un approccio FEM** generico, con elementi inizialmente in fase elastica e con limite di resistenza a compressione e a trazione, limite utilizzato per le verifiche di sicurezza in analisi lineare e per le fessurazioni progressive in analisi non lineare. Nel modello di ECS vengono utilizzate aste (elementi beam) ad asse curvo per i blocchi (conci), e aste rettilinee per i giunti di malta, oltre a link rigidi di collegamento ai nodi di interfaccia. Con ECS sono possibili tutte le analisi previste dalla Normativa vigente, incluse l'analisi modale e la pushover.
- Entrambi gli approcci puntano a cogliere la stabilità dell'arco. La procedura di SAV è di uso consolidato nel tempo (oltre 15 anni di applicazione); le procedure di ECS, recentemente studiate dal gruppo di Ricerca di Aedes, adottando condizioni idonee al confronto con SAV (resistenza a trazione nulla), mostrano ottima compatibilità con i modelli di SAV.

In SAV vi è maggior speditezza (un arco viene definito rapidamente), ed è molto utile per problemi locali.

ECS consente sia analisi locali, sia lo studio del comportamento della struttura voltata inserita in un organismo murario, eventualmente per macroelementi (un edificio, oppure anche una singola cella muraria su cui la volta si imposta).

Aedes propone entrambi i software perché le due distinte analisi corrispondono a due punti di vista 'complementari' e quindi insieme possono convalidare a maggior ragione una soluzione statica.

Un'osservazione importante riguarda la porzione di carico che va a gravare sull'arco, dal momento che al di sopra dell'arco può ipotizzarsi la formazione di una zona dove il carico si diffonde per cui solo in parte insiste sull'arco mentre il resto migra verso i montanti su cui l'arco si imposta (muri, piedritti). Uno schema tipicamente adottato allo scopo riguarda la diffusione a 60° ; alcuni esempi sono presentati in figura seguente:



In SAV attualmente non è prevista la diffusione del carico del riempimento: esso, attraverso porzioni corrispondenti ai conci sottostanti, grava completamente sull'arco. Si osservi che è invece disponibile la diffusione dei carichi applicati superiormente, al livello della pavimentazione (diffusione a 45° nei carichi di superficie, lineari e concentrati), diffusione che riguarda lo spessore di (sottofondo + pavimentazione).

In ECS, alla cui documentazione si rinvia per maggiori approfondimenti, link rigidi (montanti verticali) collegano la 'travata' sovrastante l'arco ai conci dell'arco stesso, con opportuni vincolamenti finalizzati a trasmettere all'arco i carichi verticali, sia dovuti ai pesi propri, sia provenienti da strutture sovrastanti. La tecnica di modellazione consente una buona aderenza al comportamento reale, mantenendo semplicità operativa e coerenza con la modellazione dell'edificio in cui l'arco è inserito (telaio equivalente, formato da elementi beam).

Più in dettaglio: i link rigidi fra livello di impalcato e arco presentano importanti proprietà:

- collegano l'impalcato all'arco;
- trasferiscono i carichi del peso proprio del riempimento sull'arco;
- trasferiscono carichi provenienti dai piani superiori (p.es. travi o pilastri o aste di maschio, che si impostano sulla travata corrispondente all'arco): questa è una caratteristica molto importante per i modelli a telaio di tipo globale, dove cioè oltre all'arco sono modellate le strutture adiacenti e sovrastanti.

I link di travata sono normalmente incernierati: in tal modo, trasferiscono le azioni verticali del peso proprio (e dei carichi verticali agenti al livello della travata) ai link verticali sottostanti, i quali essendo incernierati alla base sono sollecitati dal solo sforzo normale. In questo modo il

comportamento è tale da trasferire sui conci dell'arco i carichi competenti alle varie 'fette' di riempimento, carichi che corrispondono agli sforzi normali nei link verticali stessi.

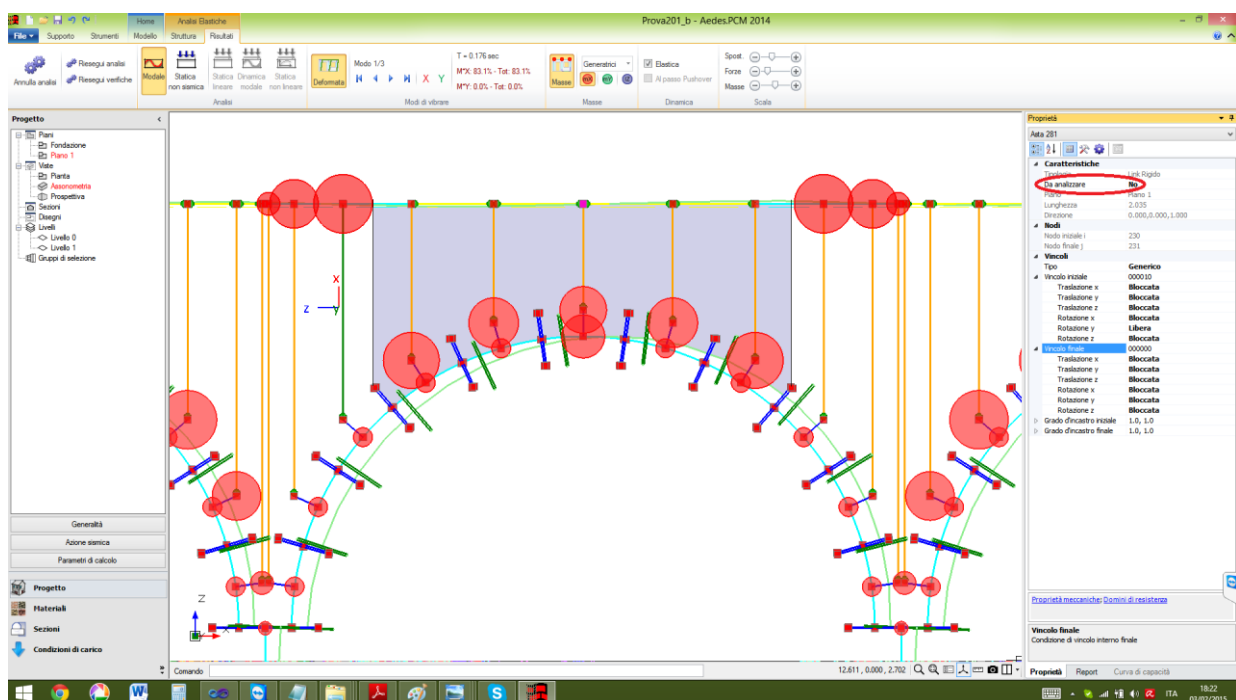
Questo vincolamento interno porta effettivamente sull'arco tutto il carico del riempimento.

La gestione dei vincolamenti interni delle aste permette però altre schematizzazioni.

Ad esempio, è possibile ottenere un **trasferimento parziale** sull'arco **del carico sovrastante** (riempimento + carichi sovrastanti) semplicemente agendo nel seguente modo:

- si escludono dall'analisi i montanti corrispondenti alle zone del riempimento che non devono trasmettere il carico sull'arco (proprietà 'Da analizzare' = No);
- si incastrano le corrispondenti aste di travata sovrastanti (inizialmente incernierate).

Un esempio è illustrato in figura seguente, dove la posizione delle masse nodali indica gli effetti della diversa distribuzione del carico.



In questo modo sarà possibile considerare solo una 'porzione' del riempimento sull'arco; non è una forma triangolare, bensì rettangolare, comunque ridotta rispetto al carico completo, e l'approssimazione risulta accettabile nell'ambito delle ipotesi adottate.

In definitiva, **in ECS variando il vincolamento interno si possono studiare varie configurazioni.**

Se poi si ha l'esigenza di un controllo completo dei carichi sull'arco, ai fini di una verifica locale, è possibile modellare il solo arco attribuendo i carichi desiderati ai nodi di interfaccia dei blocchi.