

Alessandro P. Fantilli - Politecnico di Torino

Ing. Nicolas Burello

Verifica al fuoco delle volte di Palazzo del Capitano a Verona

Abstract

Nel presente articolo vengono analizzate le strutture ad arco (e/o voltate) in muratura soggette ad incendio. Ad oggi, questo genere di strutture è diffusamente presente nelle costruzioni esistenti, più comunemente adibite a uso civile o di carattere storico-culturale. Nonostante ciò, i metodi di verifica della resistenza al fuoco di archi e volte non sono ancora ben codificati. Questa carenza è dovuta, almeno in parte, alla mancanza di indagini sperimentali, che risultano di difficile esecuzione a causa delle dimensioni dei provini e dal costo della riproduzione in laboratorio di un incendio. Negli ultimi anni, diverse prove sperimentali sono state condotte su prototipi di volta a botte, soggetti all'incendio standard e sottoposti a carichi distribuiti o concentrati. I risultati delle prove sono stati confrontati con quelli ottenuti per via grafico-numerica, applicando l'analisi limite in combinazione con il metodo delle sezioni ridotte. L'obiettivo è di estendere tale metodo, generalmente utilizzato per l'analisi di elementi verticali (i.e., muri e pilastri), anche agli orizzontamenti ad asse curvilineo (i.e., archi e volte).

In accordo con le precedenti ricerche, si propone un nuovo modello di calcolo in grado di tracciare automaticamente le possibili curve delle pressioni, verificandone l'ammissibilità al variare dello spessore della sezione resistente. Il modello è stato quindi applicato per l'analisi delle volte a botte e di quelle a crociera di Palazzo del Capitano a Verona.

Introduzione

Gli archi e le volte in muratura sono elementi strutturali molto diffusi nelle costruzioni, in particolar modo in quelle esistenti e di carattere storico. Se in condizioni di carico ordinarie la misura della sicurezza è efficacemente calcolata in accordo con i codici normativi (vedi Eurocodice 6 Parte 1-1[1]), non si può dire la stessa cosa nel caso di archi e volte soggetti ad incendio. Infatti, gli approcci di calcolo proposti dall'Eurocodice 6 - Parte 1-2[2] possono essere applicati solo a pilastri e setti murari, portanti e non, soggetti ad elevate temperature.

Agli archi e alle volte occorre applicare il cosiddetto metodo di calcolo avanzato (descritto nell'annesso D dell'Eurocodice 6 - Parte 1-2[2]), che tuttavia è di difficile implementazione perché richiede la modellazione del comportamento non lineare dei materiali, soggetti ad azioni esplicite (carichi esterni) ed implicite (effetti termici). Pertanto, i modelli di calcolo presenti in letteratura tendono a semplificare il problema e, nel caso dei muri, fanno riferimento al metodo delle sezioni ridotte (annesso C dell'Eurocodice 6 - Parte 1-2[2]). Ad esempio, Andreini et al. [3] e Nadjai et al. [4] analizzano gli elementi in muratura in condizioni di incendio solo in singole sezioni, trascurando il contesto strutturale e l'effettiva distribuzione delle temperature.

In linea teorica, facendo riferimento all'analisi sezionale, tale metodo potrebbe essere applicato anche agli archi e alle volte. Ad oggi, questa estensione non è ancora supportata da un'ampia campagna di prove. Infatti, l'unica indagine sperimentale disponibile in letteratura era stata eseguita nel 2015 dal dipartimento DCPST del Corpo Nazionale dei Vigili del fuoco di Roma su una volta a botte [5], soggetta ad una coppia di carichi concentrati (in aggiunta al peso proprio) ed all'incendio standard [6]. Ferraiolo e Grandis [7], in accordo con la circolare DCPREV 4638 del 5/4/2013 [8], hanno così analizzato la suddetta volta, ponendo cautelativamente uguale zero la

resistenza dei materiali nei quali si raggiunge una temperatura maggiore di θ_1 (e.g., $\theta_1 = 100^\circ\text{C}$ nel caso del laterizio).

In seguito, agli inizi del 2020 nuovi test [9] sono stati condotti su due prototipi di volta a botte soggetti a carichi distribuiti, con il fine di simulare i più comuni scenari di carico in condizioni di incendio. Nello stesso lavoro, è stato proposto anche l'uso dell'analisi limite [10] per il calcolo della resistenza al fuoco delle volte, attraverso il tracciamento delle curve delle pressioni in presenza di sezioni ridotte.

La procedura di calcolo precedentemente menzionata è stata quindi automatizzata, costruendo un modello di calcolo in grado di tracciare ogni possibile curva delle pressioni di una struttura ad arco simmetrica rispetto al concio di mezzeria. Al variare del tempo di esposizione all'incendio [6], il modello calcola le curve delle pressioni ammissibili sia in termini geometrici che meccanici, entrambi condizionati dalla temperatura raggiunta in ciascun punto della struttura [2, 8].

Nei successivi paragrafi, viene proposta l'applicazione del modello per l'analisi delle volte degli orizzontamenti di Palazzo Capitanio a Verona. La verifica della volta a crociera è stata condotta sulle due arcate principali, successivamente denominate arco diagonale e arco di perimetro, e sulle volte di collegamento. Infine, i risultati ottenuti per mezzo dell'applicazione del modello vengono confrontati con quelli ottenuti con l'analisi agli elementi finiti [11].

Modello di calcolo

Il metodo semplificato, anche noto come metodo delle sezioni ridotte e descritto nell'annesso C dell'Eurocodice 6 Parte 1-2[2], è di solito applicato ai setti murari [3]. La sua estensione, per l'analisi di strutture voltate in muratura, è proposta con un nuovo modello numerico basato sull'analisi limite. Esso consiste nel tracciare le curve delle pressioni [10] tenendo conto della riduzione della sezione resistente per effetto del degrado del materiale esposto alle alte temperature.

L'algoritmo si articola in tre fasi: definizione delle azioni agenti nei conci dell'arco, computazione delle curve delle pressioni e verifica al fuoco.

Nella prima fase (Fig.1), la struttura viene discretizzata in un numero finito di conci, a partire dal piano di imposta fino al concio di mezzeria. Per ciascun concio, vengono calcolati i carichi agenti dovuti al peso proprio della struttura (G_1), al carico permanente non strutturale (G_2) e al carico variabile posto in sommità (Q_k). Note le componenti agenti in ciascun concio, l'algoritmo ne calcola l'azione risultante e la retta d'azione rispetto il sistema di riferimento.

Definite le risultanti parziali e quella totale, il modello procede con la computazione numerica delle curve delle pressioni. Si ipotizza l'assenza di distacco e quindi di perdita del materiale durante l'incendio, in accordo con quanto osservato nelle tre prove sperimentali [5, 9]. Pertanto, i carichi agenti risultano costanti per qualsiasi tempo di esposizione al fuoco e le possibili configurazioni delle curve delle pressioni sono funzione esclusivamente dei punti di passaggio nella sezione del piano di imposta ed in quella di mezzeria. Ciascuno di questi punti può avere una posizione compresa fra l'intradosso e l'estradosso della struttura, fissata la quale esiste una sola curva delle pressioni associata. Maggiori dettagli sul calcolo della curva delle pressioni sono presenti nei lavori [9] e [10].

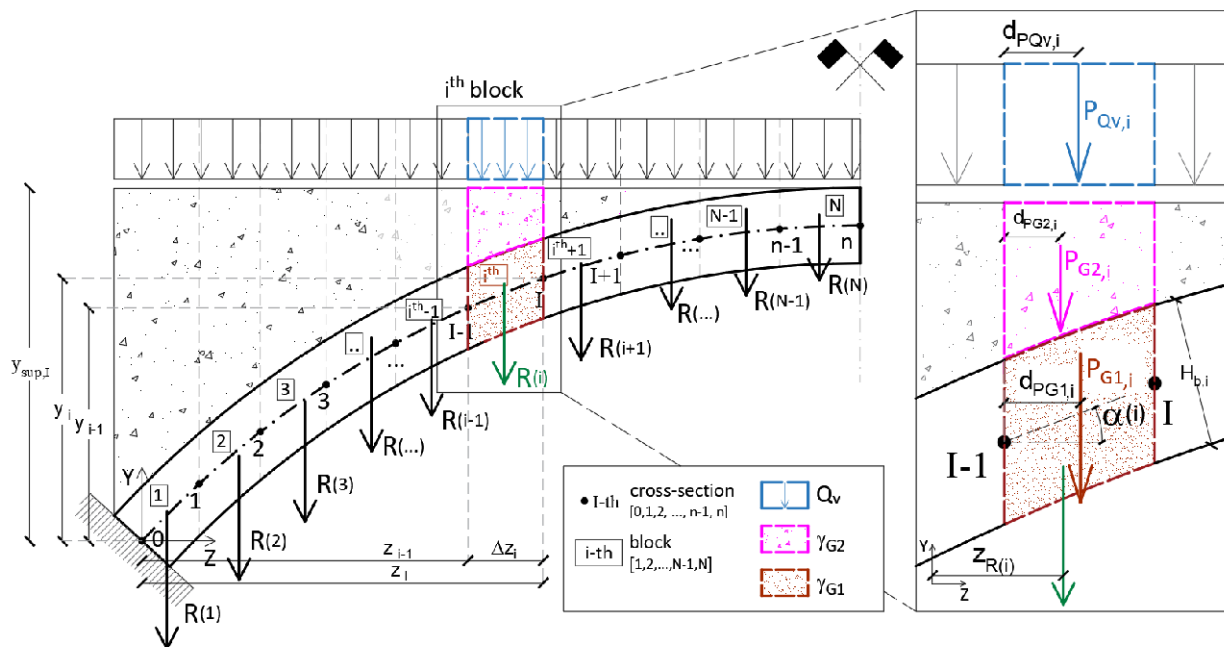


Fig. 1 - La suddivisione in conci dell'arco

Non tutte le curve delle pressioni sono accettabili, perché possono generare pressioni superiori a quelle ammissibili (resistenza a compressione della muratura), oppure giacciono al di fuori delle sezioni resistenti della volta. Ciò dipende anche dal tempo di esposizione all'incendio che, come per gli elementi verticali (vedi l'Annesso C dell'Eurocodice 6 Parte 1-2 [2]), riduce lo spessore della sezione resistente originaria.

In altre parole, all'aumentare del tempo di esposizione, il numero di curve delle pressioni ammissibili tende a diminuire perché sia lo spessore inefficace della volta che le tensioni agenti tendono ad aumentare per effetto delle elevate temperature. La resistenza al fuoco R della volta corrisponde al tempo per il quale il numero delle curve delle pressioni ammissibili è nullo.

Applicazione del modello

Il modello precedentemente descritto è applicato ad alcune strutture ad asse curvilineo presenti nel Palazzo del Capitano (Verona). Il progetto di controllo delle volte è stato curato nel 2016 dall'Ing. Katia Ferrari dello Studio M&P Ingegneria s.r.l. di Verona. Come evidenziato in Fig. 2, l'orizzontamento dell'edificio è caratterizzato da due tipologie di volta, a botte (Zona 1) e a crociera (Zona 2).

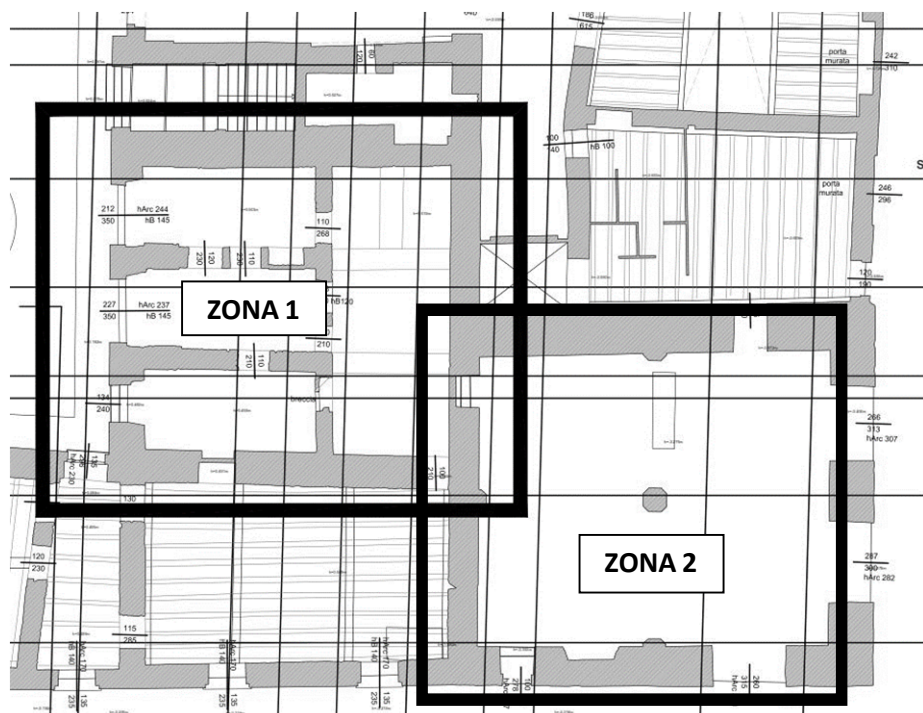


Fig. 2 - Classificazione delle volte di Palazzo di Capitano

Le volte a botte e a crociera hanno uno spessore di 15 e 18 cm, rispettivamente. Per entrambe si considera un peso proprio $\gamma_{G1} = 1800 \text{ daN/m}^3$.

Le volte a botte della Zona 1 sono soggette al solo peso proprio, perché il pavimento e il carico folla sovrastanti gravano sulla struttura composta di travi d'acciaio e lamiera grecata con cappa collaborante (vedi Fig. 3a). Invece, le volte a crociera contenute in Zona 2, sono caratterizzate da un materiale di riempimento dei fianchi di densità $\gamma_{G2,fill} = 1500 \text{ daN/m}^3$, sottofondo e pavimento di marmo del peso complessivo $G_2 = 110 \text{ daN/m}^2$ e da un carico folla $Q_k = 300 \text{ daN/m}^2$ (vedi Fig. 2b).

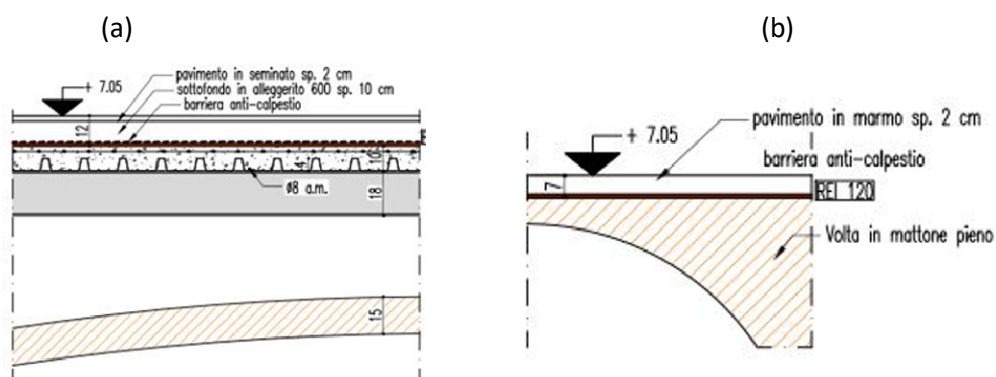


Fig. 3 - Sezione trasversale della (a) volta a botte e della (b) volta a crociera

La modellazione agli elementi finiti è riportata in Fig. 4a e Fig. 4b, mentre parametri geometrici e meccanici di ciascun elemento strutturale sono riassunti in Tabella 1.

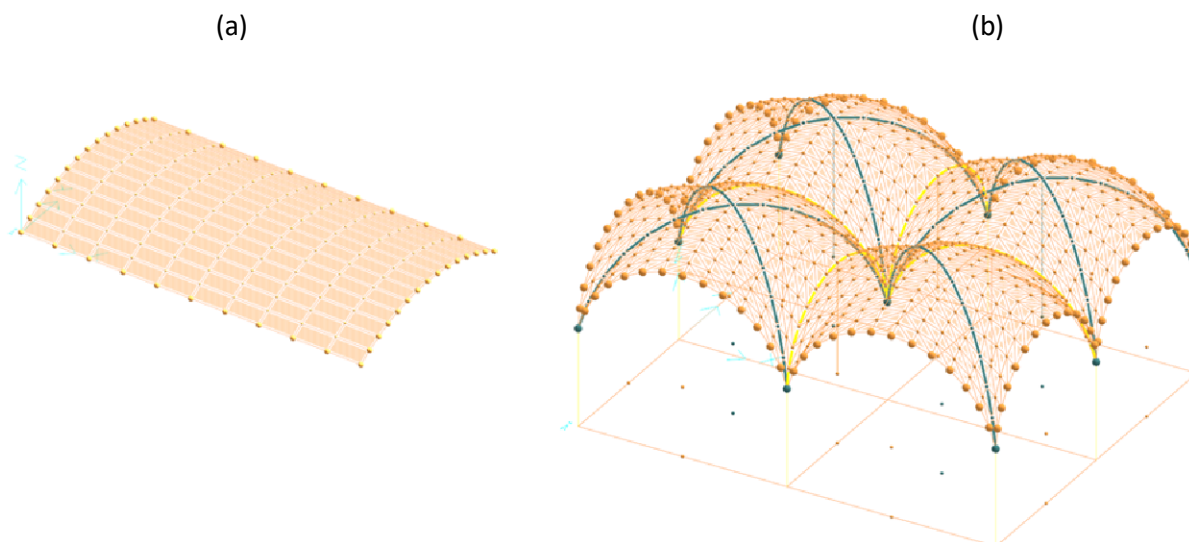


Fig. 4 - Modellazione FEM di (a) volte a botte in Zona 1 e (b) volte a crociera di Zona 2

Tabella 1 - Le caratteristiche principali delle volte

Parametri		Unità di misura	Volta a botte	Volta a crociera		
				A. diagonale	A. perimetro	Volta
Proprietà geometriche	Raggio di curvatura	mm	2828.1	4000	3079.5	3079.5
	Luce	mm	2900	7810.2	6000	6000
	Altezza in chiave	mm	400	3182.28	2382.8	2382.8
	Spessore	mm	150	300	300	180
	Profondità	mm	5000	250	450	500
Proprietà meccaniche	Resistenza a compressione di progetto	MPa	18	18	18	18
Carichi agenti	Peso proprio	daN/m ³	1800	1800	1800	1800
	Peso riempimento	daN/m ³	0	1500	1500	1500
	Peso permanente non strutturale	daN/m ²	0	110	110	110
	Carico folla	daN/m ²	0	300	300	300

Il modello basato sulle sezioni ridotte classifica come R=120 la volta a botte. Infatti, per $t=120$ min esistono ancora curve delle pressioni ammissibili (si veda la Tabella 2 e la Fig. 5a).

Tabella 2 - Esito delle analisi numeriche sulla volta a botte di Zona 1

Tempo di valutazione dell'incendio [min]	Spessore inefficace [mm]	N° di cdp favorevoli	N° di cdp verificate
0	0	30608	30552
10	20	23145	23105
20	37	17618	17605
30	50	13717	13660
40	61	10983	10949
50	69	9021	8993
60	75	7664	7654
70	80	6666	6520
80	83	5962	5887
90	85	5446	5440
100	87	5085	5080
110	88	4805	4801
120	90	4466	4462

Per l'analisi delle volte in Zona 2, si distinguono tre elementi strutturali da sottoporre a verifica: arco diagonale ($250 \times 300 \text{ mm}^2$), arco di perimetro ($450 \times 30 \text{ mm}^2$) e la volta. Di quest'ultima si analizza la striscia di perimetro di profondità 50 cm ($500 \times 180 \text{ mm}^2$). L'uso del modello descritto nel precedente paragrafo porta a considerare gli archi di resistenza $R = 120$, mentre la volta risulta caratterizzata da una resistenza $R = 70$ min. Infatti, come si osserva in Fig.5b e Tabella 3, per un tempo di esposizione $t = 70$ min risultano accettabili solo 12 curve delle pressioni, mentre per $t = 80$ min il numero di curve accettabili è 0. I risultati analitici risultano essere in accordo con quanto calcolato mediante l'uso degli elementi finiti [11].

Tabella 3 - Esito delle analisi numeriche sulla volta di Zona 2

Tempo di valutazione dell'incendio [min]	Spessore inefficace [mm]	N° di cdp favorevoli	N° di cdp verificate
0	0	12608	12250
10	20	8020	7690
20	37	4756	4474
30	50	2544	2332
40	61	1233	1077
50	69	518	415
60	75	174	114
70	80	36	12
80	83	1	0

(a)

(b)

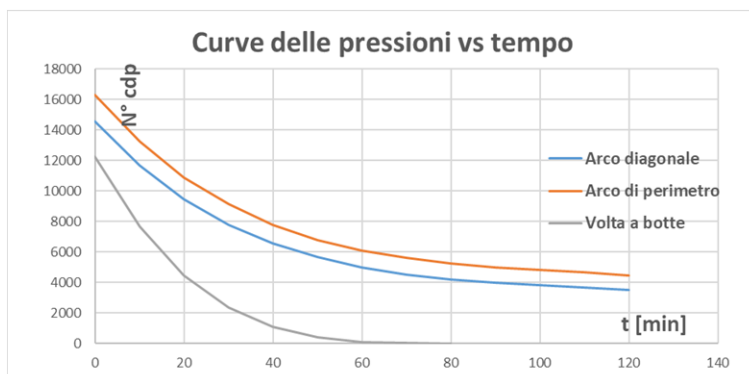
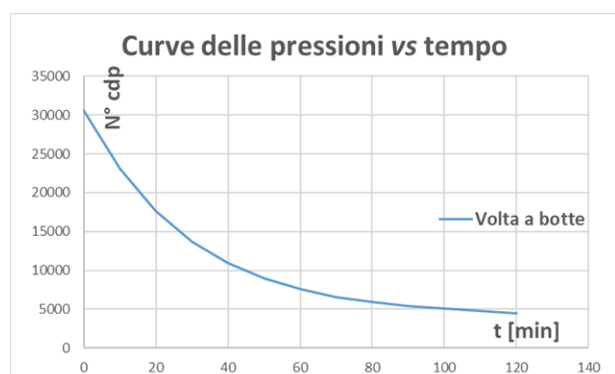


Fig. 5 - Output del modello di calcolo per l'analisi di (a) volta a botte e (b) volta a crociera di Palazzo Capitanio.

Conclusioni

Il metodo semplificato, anche noto come metodo delle sezioni ridotte, proposto nell'appendice C dell'Eurocodice EN 1996 1-2 [2] e nella Circolare DPREV 4638 [8], è stato implementato in un nuovo modello di calcolo che ne consente l'automatizzazione anche nel caso di strutture ad asse curvilineo.

Bibliografia

- [1] EN1996-1-1, Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures
- [2] EN1996-1-2, Eurocode 6 : Design of Masonry Structures—Part 1-2: General— Structural Fire Design, 2005.
- [3] M. Andreini, M. Sassu, “Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action”, Department of Civil Engineering—Structural Division, University of Pisa Largo Lucio Lazzarino, 1–56126 Pisa, Italy
- [4] A.Nadjai, D.Laverty, M.O’Garra, “Behaviour of compartment masonry walls in fire situation”, in: B.H.V.Topping (Ed.), Civil and Structural Engineering Computing, 2001.
- [5] Vigili del Fuoco - Direzione Centrale per la Prevenzione e la Sicurezza Tecnica Area Protezione Passiva – Settore, “Resistenza al fuoco Prova di resistenza al fuoco su una volta a botte”
- [6] ISO 834-1:1999: Fire-resistance tests - Elements of building construction — Part 1: General requirements
- [7] L. Ferraiuolo, D. Grandis, Performance fire design for historical structures, Antincendio (settembre 2020) 30-49
- [8] Circolare del DCPREV n. 4638 del 5/4/2013
- [9] A. Fantilli, N. Burello, M. Lombardini, A. Gattuso, F. Baglioni, F. Mazzarella, C. Castaldo, Verifica di archi e volte in muratura soggetti ad incendio, Antincendio (ottobre 2021) 42-55
- [10]] J. Heyman, “The stone skeleton”, Department of Engineering, University of Cambridge
- [11] Cdm Dolmen – Manuale di calcolo v2021 (Tutorial IS Fuoco). <https://www.cdmdolmen.it/index.htm>