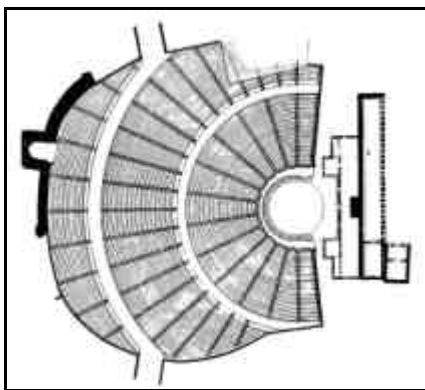


Sintesi di Tesi di Laurea in Ingegneria Civile discussa il 6 Febbraio 2004  
presso la Facoltà di Ingegneria di Firenze

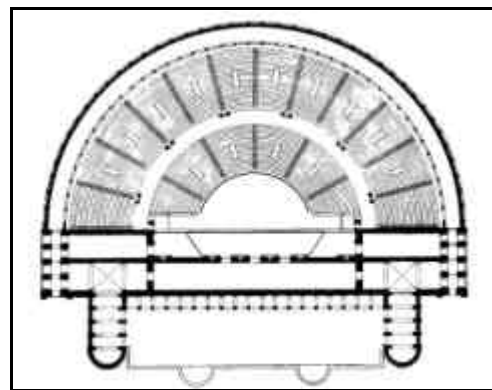
## La prevenzione incendi nei teatri storici: il caso del Teatro della Pergola

L'idea della tesi è nata dalla curiosità di capire quanto un edificio monumentale, quale il Teatro della Pergola di Firenze, sorto verso la metà del XVII secolo, fosse conciliabile con le schematiche regole antincendio dell'era moderna, talvolta troppo esuberanti davanti a tanta storicità. Il lavoro di tesi si è infatti posto l'obiettivo di verificare ed ottimizzare le condizioni di prevenzione incendi, sia attiva che passiva, di un teatro di notevole pregio storico-artistico alla luce delle attuali norme antincendio.

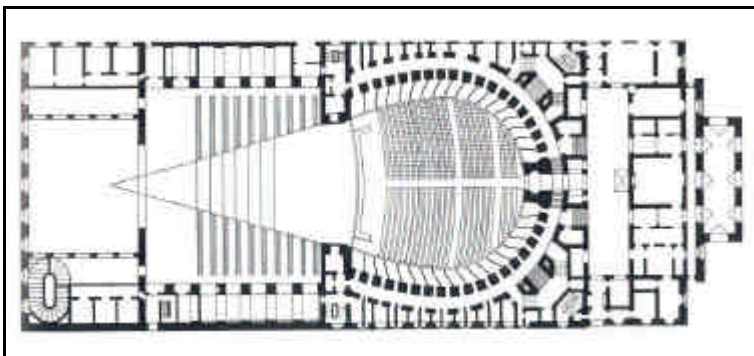
Come strumento di lettura della natura dell'edificio, si è innanzitutto indagato sul significato architettonico della tipologia edilizia, ripercorrendo a grandi linee l'evoluzione dell'architettura teatrale, e sul ruolo delle singole parti necessarie ad un luogo di spettacolo, distinguendo tra *luoghi degli spettatori* e *luoghi degli attori*.



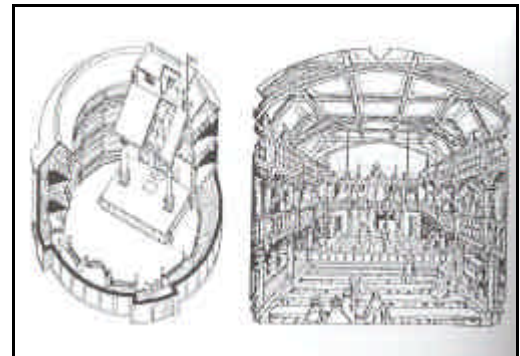
Teatro greco: Teatro di Dioniso ad Atene



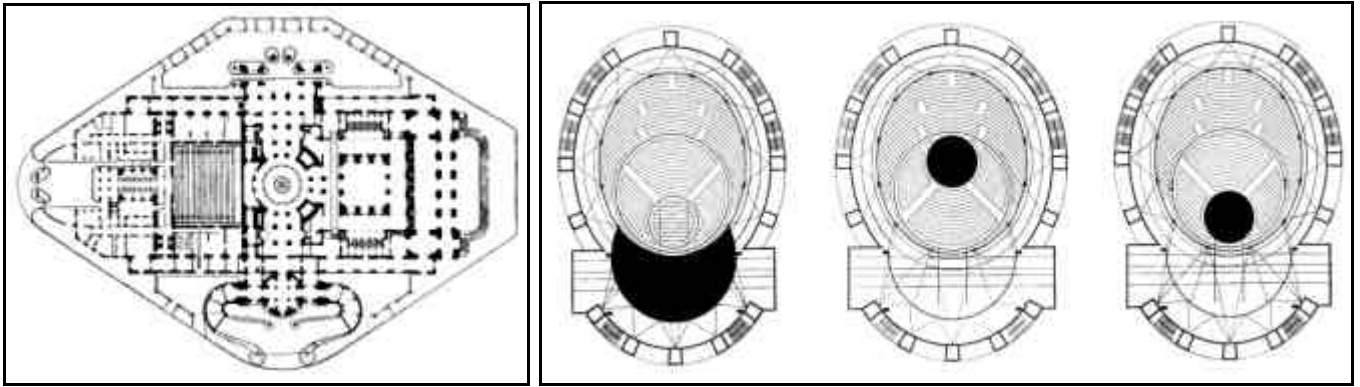
Teatro romano: Teatro di Marcello a Roma



Teatro all'italiana: Teatro alla Scala a Milano



Teatro elisabettiano: Swan Theatre



Teatro alla francese: Opéra di Parigi

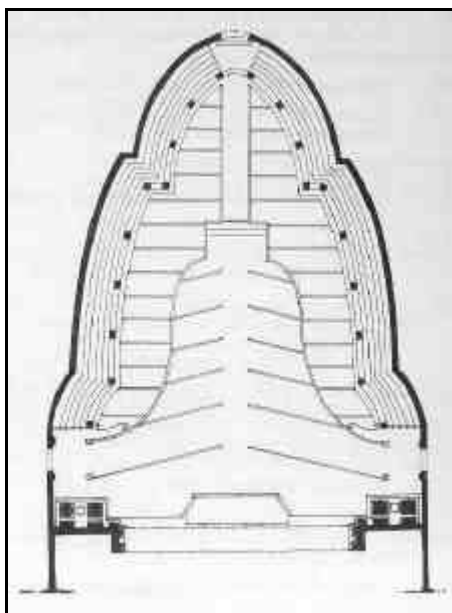
Teatro di Gropius: Totaltheater

Si è poi cercato di capire quel lungo processo di formazione dell'attuale stato del teatro, non scevro di innumerevoli e forti interventi, firmati da illustri architetti ed ingegneri, senza parlare degli splendidi affreschi ottimamente conservati che rendono il teatro un gioiello d'arte.

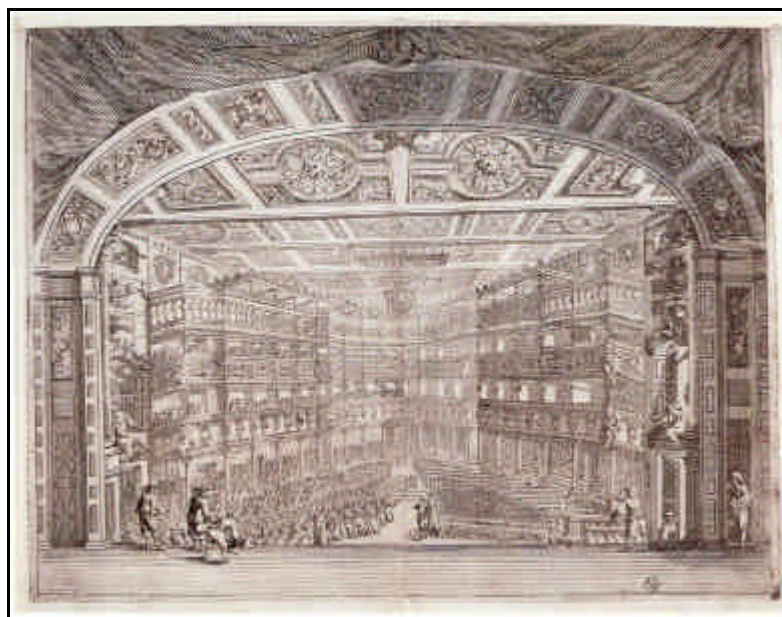


La nascita del Teatro della Pergola si lega alla fondazione nel 1644 dell'Accademia dei Concordi; successivamente tale gruppo di artisti e letterati si scisse in Accademici Infuocati, con sede nell'attuale Teatro Niccolini, ed Accademici Immobili, i quali videro sorgere nel 1657 il Teatro della Pergola, nell'omonima via, ad opera dell'architetto Ferdinando Tacca, il quale trasformò un tiratoio della lana in un vero e proprio teatro.

L'impianto originario del Teatro della Pergola era del tipo all'italiana, con struttura lignea e profilo mistilineo, pianta ovoidale e loggia inferiore aperta intorno alla platea, con un totale di 54 palchi dislocati su 3 ordini ed una graticciata già allora di 500mq.



Pianta del Teatro del Tacca



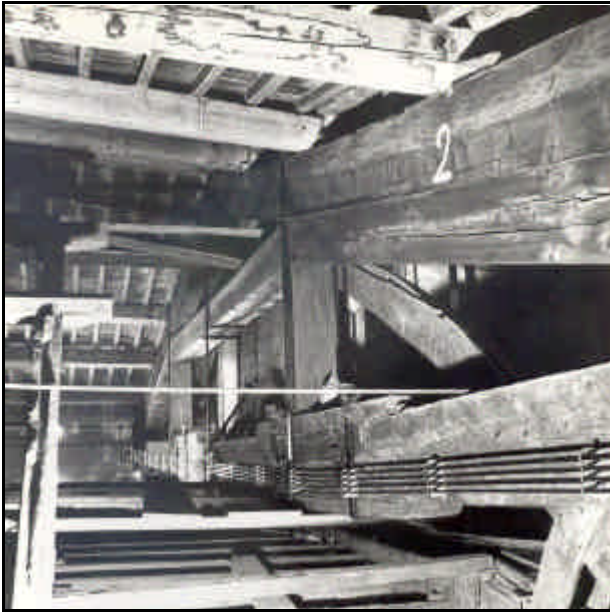
Prospettiva della sala del Teatro del Tacca

Le principali modifiche strutturali avvenute nell'arco di più di 3 secoli possono riassumersi nella seguente tabella:

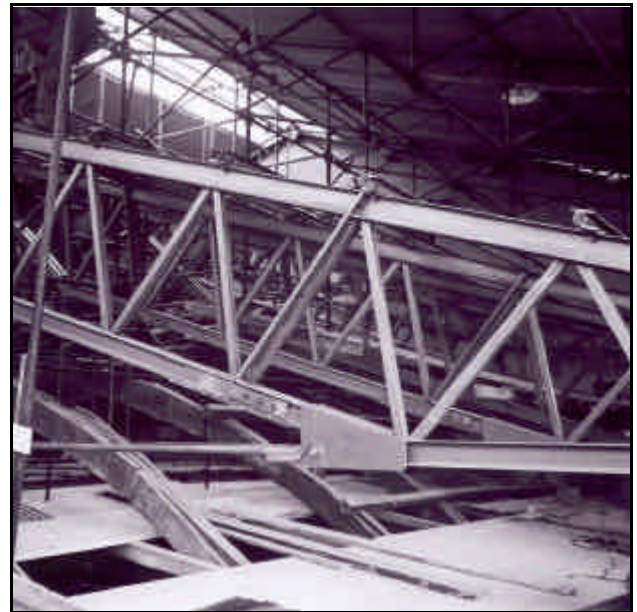
1688	Arch. FILIPPO SENGHER	sostituzione della loggia con il I ordine di palchi, con 78 palchi di legno dislocati su 4 ordini
1755	Arch. GIULIO MANNAIONI	ricostruzione in muratura della sala a pianta ovoidale con 84 palchi dislocati ancora su 4 ordini
1789	Arch. GIULIO MANNAIONI Ing. LUCA RISTORINI	aggiunta del V ordine di palchi e realizzazione del Saloncino
1855	Arch. GAETANO BACCANI	restauro della sala e riprogettazione degli atri
1912	Arch. Ing. PIER ANTONIO SPIGHI	demolizione degli ultimi due ordini di palchi (IV e V) e creazione della galleria
1967	Arch. LUIGI CALITERNA	sostituzione delle capriate lignee degradate con capriate in acciaio, rifacimento del loggione ed opere generali di consolidamento strutturale

Si riportano alcune immagini relative all'intervento di Caliterna.





Capriate in legno degradate



Capriate in acciaio di sostituzione



Piano della graticciata



Gradinata del loggione

Attualmente il Teatro della Pergola risulta un'enorme complesso di edifici assemblati nel tempo, inglobato nel centro storico fiorentino, in un buono stato di conservazione, con struttura portante in muratura e presenza di alcuni orizzontamenti lignei (palcoscenico, platea, graticcia, sale da ballo); il teatro è poi caratterizzato da una perfetta sintonia tra la zona destinata al pubblico, costituita da una sala principale e da una sala adiacente denominata Saloncino, e la zona destinata agli artisti ed ai tecnici, costituita da un complesso sistema di annessi; inoltre l'edificio risulta dislocato su 9 livelli per un'altezza massima di quasi 25m ed una superficie totale di quasi 10000mq, con capienza della sala principale di 999 posti e del Saloncino di 324 posti.



**Platea della sala principale**



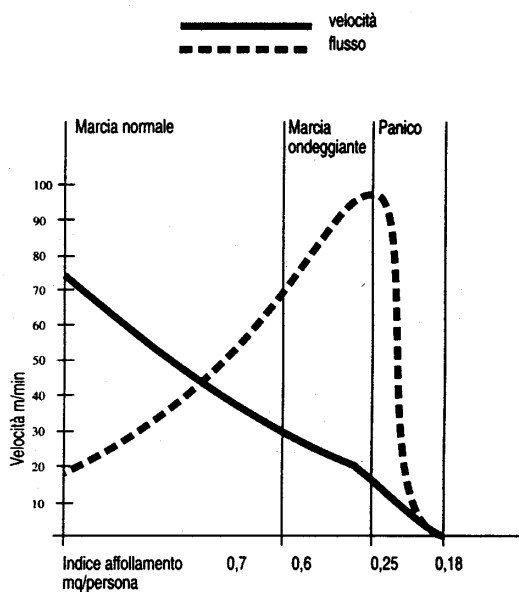
**Atrio delle colonne**



**Palcoscenico del Saloncino**

Per rendersi conto delle possibilità d'intervento e degli obblighi legislativi, si è prima indagato sul concetto di sicurezza antincendio negli edifici storici e relative problematiche, dai fattori di criticità ai tipici fattori d'innescò, ponendosi il duplice obiettivo di incolumità delle vite umane (unico obiettivo per gli edifici di nuova costruzione) e di salvaguardia dei beni storici, sensibili sia alla fiamma viva con perdita di materia, sia al flusso di fumi con gravi danni alle superficie.

MOVIMENTO DI PERSONE (FLUSSO),  
IN RELAZIONE ALLA CONCENTRAZIONE, STATO DI MOTO E VELOCITÀ



Si è poi interpretato il significato dei vari parametri di incendio (resistenza al fuoco, carico d'incendio, reazione al fuoco, tempi di evacuazione, densità di affollamento, capacità di deflusso, etc.) e dei criteri di progettazione in base al rischio incendio, tenendo conto sia di un *fattore tecnico*, legato al progetto ed alla gestione dell'edificio in termini di prevenzione attiva e passiva, sia di un *fattore psicologico*, mediante un'analisi dei processi di percezione del rischio per l'ottimizzazione degli interventi

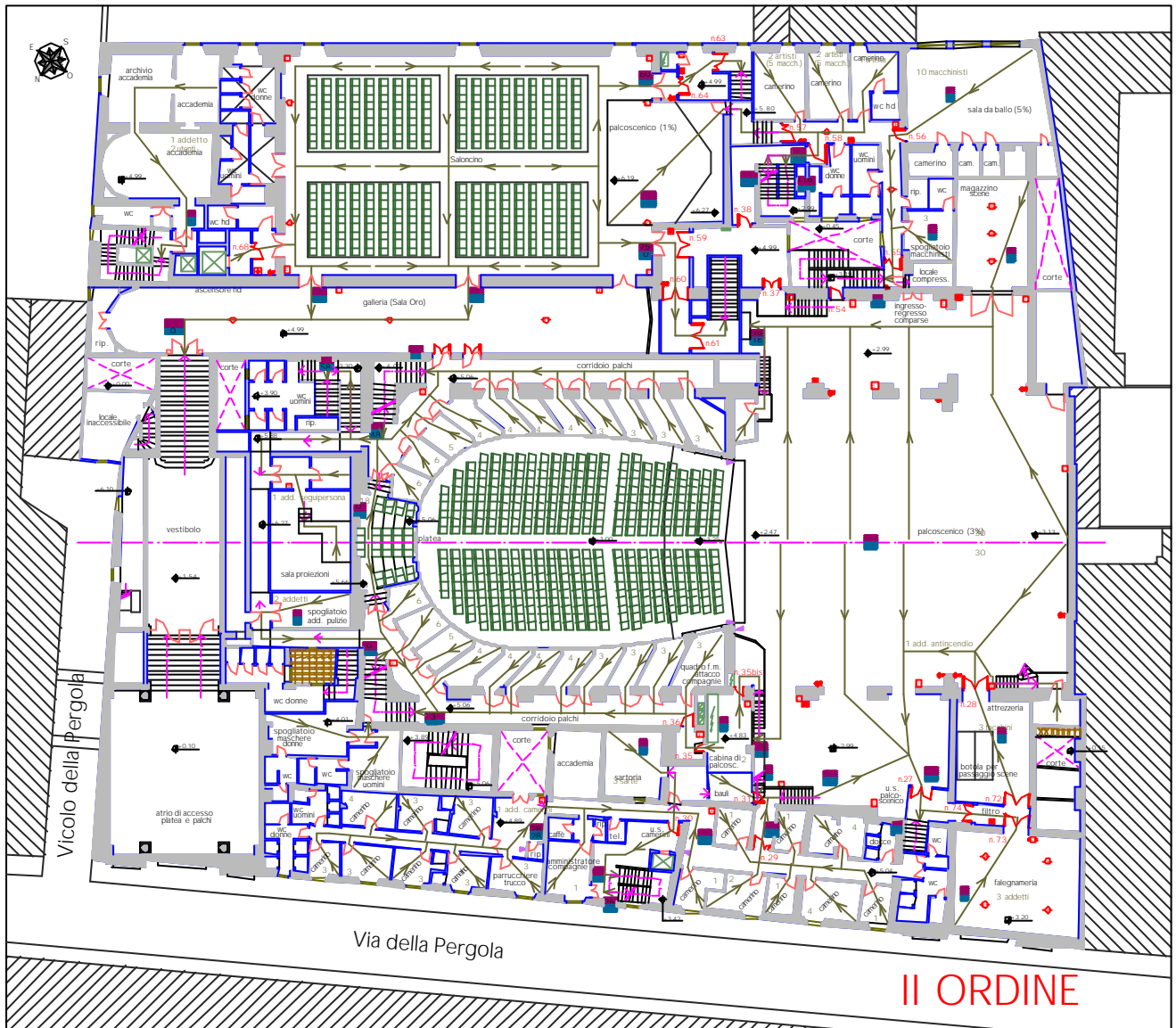
atti a favorire un'adeguata risposta della folla in caso di panico; il perfetto connubio dei due fattori conduce in genere ad un processo di evacuazione rapido ed ordinato.

Si sono dunque rapportate ed incrociate le normative in materia di sicurezza antincendio, relative sia ai luoghi di trattenimento, sia agli edifici di pregio storico, sia ai luoghi di lavoro in genere.

Il lavoro della tesi si è poi dislocato su tre livelli di analisi e valutazione: dall'osservazione dell'edificio nel suo complesso, alla risposta strutturale di alcune parti dello stesso, al comportamento chimico-fisico di alcuni materiali di rivestimento.

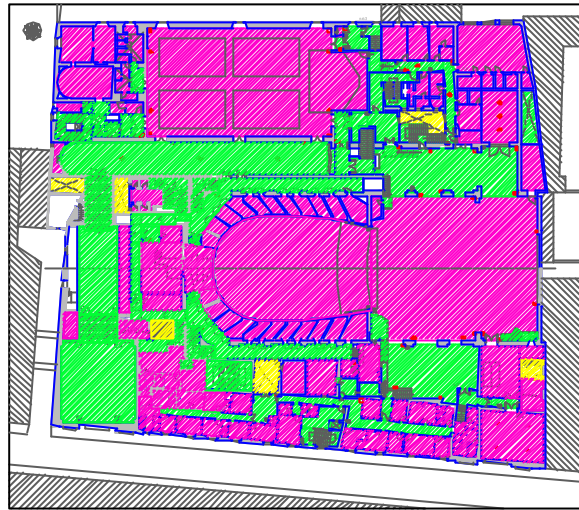
In primo luogo si è osservato e "misurato" l'intero fabbricato in termini di funzionalità e di fruibilità, per capire se l'attuale stato di utilizzo fosse dotato di adeguate attrezzature antincendio e soprattutto di idonee e sufficienti vie di esodo, in rapporto al flusso dei frequentatori; in altre parole si è saggiato il livello di sicurezza dell'edificio, eseguendo un dettagliato rilievo, per numero e posizione, degli attuali sistemi e dotazioni antincendio, con relativa riproduzione grafica.





Flussi di esodo e dotazioni antincendio (II ordine)

Dalla *valutazione degli spazi* è emerso che il 35% della superficie totale dell'edificio è destinato a vie di smistamento, ovvero corridoi, scale e vani di disimpegno; ciò significa che i percorsi di uscita risultano per loro natura lunghi e talvolta tortuosi.



Destinazione d'uso degli spazi (II ordine)

Si è poi eseguita una *valutazione delle vie di fuga* nell'ipotesi di utenza presente nella stagione estiva (periodo del Maggio Musicale), con afflussi diurni di circa 690 persone ed afflussi serali di circa 1250 persone.

	1	2
A	1A	2A
B	1B	2B

Si sono così individuate 4 condizioni di carico in termini di utenza, incrociando la massima attività diurna del Saloncino con la massima attività serale della sala principale; le due situazioni sono state valutate in due momenti diversi: poco prima dell'inizio dello spettacolo ed alla fine dello stesso con massimo affollamento in palcoscenico.

Individuati per ogni vano dell'edificio i percorsi di uscita in caso di calamità, mediante il programma Excel si sono dunque realizzati fogli di calcolo, per ogni condizione di carico, per ogni livello e per ogni vano dell'edificio, sia nello stato di fatto che, come vedremo, nello stato trasformato, per un totale di 72 fogli di calcolo.

Dall'analisi precedente si evince che, secondo le attuali norme antincendio, esistono dei margini per migliorare l'attuale sistema di esodo per garantire il completo e più rapido sfollamento del pubblico e del personale previsto.

Si sono proposti di conseguenza 3 tipi di intervento, suddivisi per categorie (edilizi, antincendio e gestionali), atti a colmare certe carenze, a sopperire a certe realtà contrastanti o talvolta più semplicemente ad aumentare la sicurezza antincendio, in un



ambiente in cui il carico di incendio è tutt'altro che trascurabile e gran parte degli utenti sono estranei al contesto.

Come principi base degli interventi proposti si è cercato di:

- individuare percorsi di esodo aggiuntivi, evitando di eliminare parte del pubblico, via comunque perseguibile;
- separare le vie di fuga del pubblico da quelle degli artisti e degli addetti, essendo diverse le percezioni dell'ambiente;
- bilanciare i flussi di esodo sul numero delle uscite, evitando l'attuale sovraffollamento di alcune uscite contrapposto allo scarso utilizzo di altre;
- rispettare il patrimonio storico-artistico sia interno che esterno;
- proporre soluzioni semplici, reversibili e meno invasive possibile;
- sfruttare ogni versatilità dell'edificio avvalendosi di criteri di sicurezza equivalente.

Alcuni esempi di *interventi edilizi* sono: realizzazione di nuove vie di esodo con creazione di aperture e scale in acciaio o in cemento armato, studiando per ogni percorso più soluzioni e cercando di perturbare il meno possibile la compagine strutturale del teatro; ottimizzazione della compartimentazione degli ambienti a rischio; trattamenti antisdrucchiolo di superfici logore; risistemazione di pavimenti sconnessi; realizzazione di un montacarichi di palcoscenico; aumento della riserva d'acqua; realizzazione di rampe per facilitare l'accesso dei disabili; etc..

Alcuni esempi di *interventi antincendio* sono: protezione dei principali vani scala che conducono all'esterno o verso luoghi sicuri; installazione di rivelatori di fumo puntiformi, lineari e perimetrali; installazione di sistemi di spegnimento a sprinkler (totalmente assenti); incremento di idranti a muro, altoparlanti, estintori a polvere e CO<sub>2</sub>, pulsanti di allarme, evacuatori di fumo e porte REI; introduzione di allarmi luminosi (totalmente assenti); etc..

Alcuni esempi invece di *interventi gestionali* sono: gestione del convoglio del pubblico verso il nuovo sistema di vie di esodo da parte del personale opportunamente formato ed informato, correlando i flussi di esodo con il numero e la collocazione delle maschere; eliminazione e/o redistribuzione dei posti a sedere; pulizie periodiche

contro le polveri infiammabili; simulazioni antincendio; assoluto divieto di parcheggio di motocicli e vetture nelle vie perimetrali per agevolare l'accesso dei soccorsi; gestione della sicurezza nei luoghi di lavoro; gestione dei sistemi di allarme; etc..

Si sono successivamente eseguite alcune *valutazioni economiche*:

- si sono stimati i ricavi perduti a seguito dell'eliminazione di alcuni posti; ipotizzando uno spettacolo in sala ed uno nel Saloncino, i ricavi perduti sono di 1250€ per spettacolo di prosa;
- si sono valutati i costi di realizzazione degli interventi proposti, ovvero per ogni intervento si sono individuate le singole lavorazioni, oltre alle materie prime necessarie; il computo totale è risultato di 385.000€ oneri per l'attuazione dei piani di sicurezza inclusi;
- si sono stimati i costi di manutenzione annua degli interventi antincendio proposti, pari a 5.800€/anno.

Si sono in seguito valutati i *tempi di evacuazione*, sebbene la normativa non ponga dei limiti. La valutazione è stata eseguita, sia nello stato di fatto che nello stato trasformato, per tutti i locali destinati al pubblico, calcolando un tempo cinematico, un tempo che tiene conto della folla, mediante formula sperimentale, ed un tempo che, oltre a tener conto della folla, tiene conto anche dell'effettivo numero di moduli disponibili per ogni vano. Dal confronto dei due stati è emerso che nello stato trasformato lo sfollamento è più equiripartito ed avviene in tempi minori con riduzioni fino al 71%, ovvero l'esodo ovunque risulta più rapido. Infatti sebbene a volte il tragitto di uscita sia più lungo in termini di spazio percorso, il minor affollamento lo rende sicuramente più sgombro, ottenendo un esodo più rapido e più fluido, senza considerare che l'effetto panico si attenua con il minor affollamento. Ad esempio nel loggione si è passati da 4 a 6 percorsi di fuga e, mentre nello stato di fatto l'ultima persona ad abbandonare il locale impiega circa 18 minuti, nello stato trasformato ne impiega solo 10.

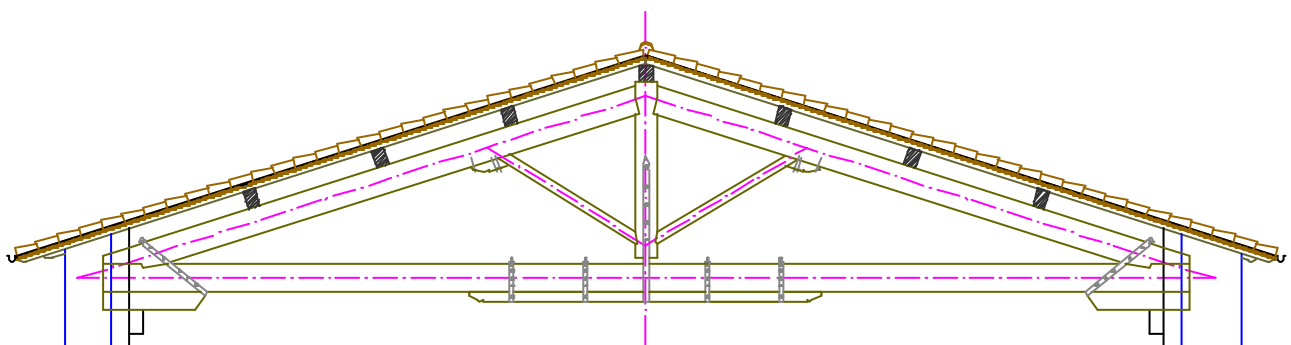
Scendendo ad un maggior livello di dettaglio, lo studio si è focalizzato sul **Saloncino**: inventariati tutti gli oggetti contenuti nel vano (dal cordame al fondale, dagli strapuntini alla tappezzeria), si è stimato il carico d'incendio per ogni oggetto in esso contenuto, compresi il controsoffitto a centine asciate ed il sistema di copertura in abete. Si è così risaliti alla resistenza al fuoco richiesta per normativa, pari a 90 minuti. Una volta eseguito il rilievo geometrico del sistema di copertura ed analizzati i carichi sopportati dalle capriate lignee, si sono verificati tutti gli elementi strutturali a sostegno della copertura, sia a freddo che a caldo, per i principali tempi di esposizione al fuoco.



Capriate in abete



Controsoffitto a centine asciate



Dall'analisi precedente è emerso che, ad esempio, le capriate iniziano a crollare dopo 33 minuti dall'inizio dell'incendio per cedimento delle saette e se anche si proteggessero le saette inizierebbero a cedere i puntoni dopo 69 minuti; comunque sia il dissesto della copertura inizia solo dopo 18 minuti dall'inizio dell'incendio per

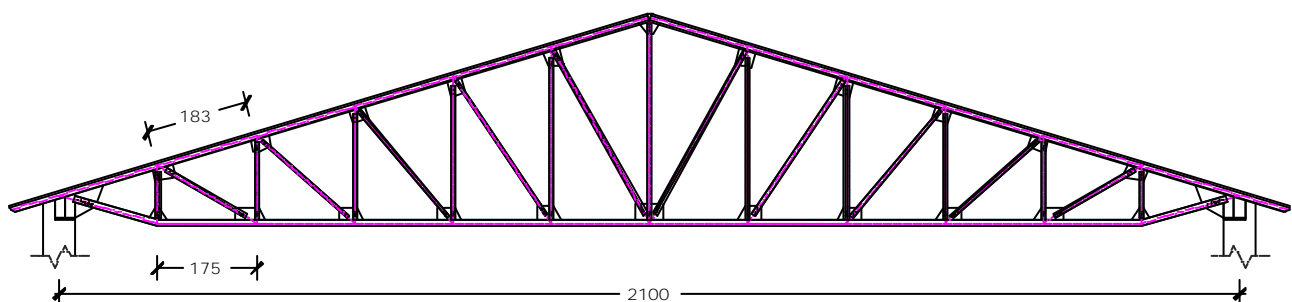


cedimento dei travicelli, che sono gli elementi di sezione più ridotta, dunque gli elementi più vulnerabili. Si sono così proposti degli interventi per riportare la resistenza a 90 minuti, quali il rivestimento con tavole in abete fissate con viti per saette e puntoni della capriata e per gli arcarecci di copertura, la realizzazione di un controsoffitto in cartongesso per la protezione dei travicelli, e la compartimentazione del locale, corredati dal relativo preventivo economico, stimando un costo totale di circa 44.000€

In ultima analisi si è confrontato il comportamento al fuoco delle *capriate in acciaio* del palcoscenico della sala principale con e senza protezione antincendio, secondo le norme UNI 9503.



Capriate in acciaio del palcoscenico



Analizzati i carichi della graticciata e della copertura (strutture portate dalle capriate), si è determinato con metodo incrementale l'andamento delle temperature degli

elementi in acciaio, mediante programma di calcolo Matlab; in particolare si è valutato l'andamento della temperatura della capriata tipo non protetta esposta al fuoco per 180 minuti; analogamente per la trave protetta, basandosi su prove di laboratorio, si è individuata la variazione con la temperatura di alcuni parametri della protezione antincendio ipotizzata (vernice intumescente). Si sono così determinate le sollecitazioni sia di progetto che allo stato limite ultimo, deducendo la temperatura critica per ogni elemento, dunque per l'intera capriata, pari a 397°C. Nota la temperatura critica, si sono confrontate le resistenze al fuoco nelle due situazioni. Come risultato si è trovato che le capriate non protette iniziano a crollare dopo 8 minuti dall'inizio dell'incendio, mentre una protezione antincendio tipo vernice intumescente garantisce almeno 60 minuti per il completo sfollamento.