



UNIVERSITÀ DEL SALENTO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

IN SPERIMENTAZIONE E CONTROLLO DEI MATERIALI E DELLE STRUTTURE

***Comportamento Statico di Volte in Muratura
Soggette a Carico d'Incendio.***

RELATORE:

Chiar.ma Prof. Marianovella LEONE

Chiar.ma Prof. Maria Antonietta AIELLO

LAUREANDO:

Giuliano DE PASCALI

ANNO ACCADEMICO 2012/2013

Sommario

1	Introduzione	3
2	La Resistenza al Fuoco	5
2.1	Generalità sul Quadro Normativo in Italia e in Europa.....	5
2.2	Scenari d'Incendio.....	7
2.2.1	Fase Pre-Flash Over.	8
2.2.2	Fase Flash Over.....	8
2.2.3	Fase Post-Flash Over.....	8
2.2.4	Tipologie di Approccio all'Analisi.	9
2.3	Le Curve d'Incendio.....	11
2.3.1	Curve Nominali.....	12
2.3.2	Le Curve Naturali.....	13
2.4	Classi di Resistenza al Fuoco e Classificazione del Compartimento.....	14
2.4.1	Livello I.	15
2.4.2	Livello II.....	15
2.4.3	Livello III.....	15
2.4.4	Livello IV e Livello V.....	16
2.5	Carico d'Incendio.....	16
2.6	Verifica della Prestazione Strutturale in Caso d'Incendio.	17
2.7	Comportamento dei Materiali Soggetti al Fuoco (Reazione al fuoco).....	20
3	La Muratura e le Volte in Muratura.....	22
3.1	Elementi Resistenti Costituenti.	22
3.1.1	Resistenza a Compressione degli Elementi Resistenti Naturali.	23
3.2	La Malta.....	23
3.3	Resistenza a Compressione e a Taglio della Muratura.....	24
3.4	Comportamento della Muratura Soggetta a Carico d'Incendio.	27
3.4.1	Proprietà Dipendenti dalla Temperatura.	35
3.4.2	Effetto della Temperatura sulle Proprietà Meccaniche dei Materiali da Costruzione.	44
3.5	Le Volte in Muratura.....	50

3.5.1	Volta a Botte.	51
3.5.2	Volta a Crociera.	52
3.5.3	Volta a Spigolo e Volta a Squadro.	53
3.6	Volte in Muratura Soggette a Carico d’Incendio.	54
4	Analisi Sperimentale.	60
4.1	Modellazione Materiale Muratura.	60
4.1.1	Conducibilità Termica della Pietra Leccese.	62
4.2	Calcolo Spessore Minimo della Volta a Botte.	66
4.2.1	Il raggiungimento della Temperatura di Inefficacia.	66
4.2.2	Il metodo di Mèry.	67
4.2.3	Valore dello Spessore Minimo.	69
4.3	Analisi Termiche.	72
4.3.1	Influenza dello Spessore.	74
4.3.2	Influenza della Conducibilità Termica.	77
4.3.3	Calcolo dei Tempi di Resistenza.	79
4.3.4	Influenza del Bordo.	82
4.3.5	Influenza della Luce della Volta a Botte.	84
4.4	Confronti.	91
5	Conclusioni e Sviluppi Futuri.	94
	APPENDICE A: Misura Sperimentale della Conducibilità Termica.	98
	APPENDICE B: Analisi Termiche.	99
	APPENDICE C: Influenza del Bordo.	108
	APPENDICE D: Influenza della Luce della Volta a Botte.	119
	Bibliografia	121

1 Introduzione

Il patrimonio architettonico italiano consta numerosi edifici storici realizzati in muratura per i quali è necessario interrogarsi sul problema della resistenza al fuoco.

Nel caso specifico del territorio salentino, tale patrimonio presenta un gran numero di coperture con volte, distinte in due macro categorie: la volta a spigolo, molto simile alla più celebre volta a crociera, e la volta a squadro.

Le costruzioni dotate di volta a spigolo hanno caratterizzato per secoli l'architettura leccese in quanto particolarmente adatte a risolvere i problemi di carattere costruttivo e statico della volta a crociera, quest'ultima frutto dell'intersezione di due volte a botte.

Per queste tipologie di volte è del tutto sconosciuta la prestazione alle alte temperature.

Le costruzioni in muratura di tipo tradizionale dimostrano, in termini di prestazioni strutturali, una capacità spesso eccellente nel sopportare le azioni del fuoco e delle alte temperature. Tuttavia la normativa in vigore sia per il costruito esistente sia per le nuove costruzioni pone l'esigenza di una valutazione della sicurezza residua della costruzione successivamente ad un incendio; ciò avviene a seconda del livello di prestazione richiesto in sede di progettazione o di verifica sul costruito esistente.

Per la valutazione della resistenza al fuoco delle strutture in muratura si fa generalmente riferimento all'Eurocodice 6 parte1-2 (Progetto di strutture in muratura – regole generali per la resistenza all'incendio), all'Eurocodice 1 parte2-2 (Azioni sulle strutture – Azioni sulle strutture esposte al fuoco) e alle Norme tecniche per le costruzioni 2008.

La letteratura tecnica risulta, allo stato attuale, esigua in termini di modelli per la valutazione della resistenza di coperture a volta. Di conseguenza, l'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di contribuire a colmare questo gap. In particolare, è stata studiata la distribuzione della temperatura, dovuta ad azioni termiche di curve nominali di incendio, nella volta a botte, al variare della luce e dello spessore, nonché il tempo di resistenza della struttura soggetta a carico verticale uniformemente distribuito. Al fine di simulare delle condizioni quanto più realistiche possibili nel modello agli elementi finiti, il parametro della conducibilità termica inserito è stato ricavato da misure sperimentali della stessa appositamente effettuate nel laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università del Salento.

I risultati ottenuti evidenziano che la distribuzione della temperatura all'interno della volta dipende dallo spessore e dalla luce della stessa, nonché dalle proprietà termiche del materiale, in particolar modo della conducibilità.

Di seguito, si riporta la struttura del lavoro di tesi presentato.

Nel secondo capitolo, si descrive il quadro normativo a livello nazionale ed internazionale in materia di incendio. In particolare, dopo un'analisi di tipo storico delle norme, si riportano gli approcci all'analisi previsti, si definiscono gli scenari e le curve d'incendio utilizzabili, si accenna alle classi di resistenza al fuoco e ai livelli di riferimento prescritti dalle normative.

Nel terzo capitolo, si definisce il materiale muratura, si descrive la sua caratterizzazione meccanica, e si riporta lo stato dell'arte relativo al problema di strutture soggette a carico d'incendio. Particolare attenzione è posta al decadimento delle proprietà del materiale, dovuto alle alte temperature. Inoltre, si descrivono le più importanti tipologie di volte diffuse nel territorio salentino e si riportano i risultati di alcuni studi relativi al problema di archi o volte in muratura soggetti a carico d'incendio.

Nel quarto capitolo si descrive, innanzitutto, la campagna sperimentale condotta per la determinazione della conducibilità termica della pietra leccese e si riportano e commentano i risultati ottenuti. In seguito, si descrive la procedura adottata per la modellazione della volta a botte, nonché tutte le analisi termiche effettuate e i risultati conseguiti.

Il quinto capitolo è dedicato alle conclusioni e alla definizione dei limiti della ricerca e dei possibili sviluppi futuri.

2 La Resistenza al Fuoco

2.1 Generalità sul Quadro Normativo in Italia e in Europa.

La modellazione dell'incremento della temperatura in funzione del tempo, all'interno dell'ambiente sottoposto a incendio, è fondamentale per lo studio della resistenza al fuoco delle strutture. Tale incremento va interpretato come una vera e propria azione sulla struttura, paragonabile al caso di azioni sismiche e/o accidentali.

A partire dal 1934, anno del primo decreto ministeriale in materia di antincendio, il quadro normativo italiano concernente la resistenza al fuoco ha subito diverse modifiche; di seguito si riporta un elenco non esaustivo delle norme introdotte negli anni e una breve nota sul loro contenuto.

- D.P.R. 27 aprile 1955, n. 547: misure generiche sulla prevenzione e sull'estinzione;
- Circolare del Ministero dell'interno del 14 settembre 1961 N° 91: metodi per la valutazione della resistenza al fuoco di elementi da costruzione;
- D.M. del 16 novembre 1983: elenco delle attività soggette, nel campo dei rischi di incidenti rilevanti, all'esame degli ispettori regionali o interregionali del Corpo nazionale dei vigili del fuoco;
- UNI 9502:1989 (rivista nel 2001): Calcolo della resistenza al fuoco degli elementi costruttivi;
- D.M. 10 Marzo 2005: Classi di reazione al fuoco per i prodotti da costruzione da impiegarsi nelle opere per le quali è prescritto il requisito della sicurezza in caso di incendio;
- D.M. 15 Marzo 2005: Requisiti di reazione al fuoco dei prodotti da costruzione installati in attività disciplinate da specifiche disposizioni tecniche di prevenzione in base al sistema di classificazione europeo;
- D.M. 16 Febbraio 2007: Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione;
- D.M. 9 Marzo 2007: Prestazioni di resistenza delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del corpo nazionale dei vigili del fuoco
- Circolare N°1968 del 15 Febbraio 2008: Pareti di muratura portante resistenti al fuoco.

A livello europeo, i riferimenti alla progettazione in presenza di incendio sono da ricercarsi negli eurocodici; sebbene tale tematica sia trattata anche nell'Eurocodice 3, 4, 5, 9, particolare rilevanza è data ai seguenti riferimenti.

- Eurocodice 1: “Basi di calcolo ed azioni sulle strutture - Parte 2-2: Azioni sulle strutture - Azioni sulle strutture esposte al fuoco”.
- Eurocodice 2: “Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione della resistenza all'incendio;
- Eurocodice 6 - Progettazione delle strutture di muratura - parte 1-2: regole generali - progettazione strutturale contro l'incendio.

Una struttura progettata per resistere all'incendio (inteso come azione accidentale) deve presentare alcune caratteristiche precise:

- Conservazione della capacità portante della costruzione per un periodo di tempo specifico;
- Limitazione e contenimento della propagazione di fuoco e fumo;
- Limitazione della propagazione del fuoco alle costruzioni adiacenti;
- Possibilità di abbandono dell'edificio o di soccorso con altri mezzi;
- Garanzia di sicurezza per il soccorritori.

Di seguito si riporta una definizione di resistenza al fuoco di un elemento strutturale coerente con le definizioni presenti nelle altre norme considerate (D.M. 16 Novembre 1983).

“Attitudine di un elemento da costruzione (componente o struttura) a conservare - secondo un programma termico prestabilito e per un tempo determinato - in tutto o in parte: la stabilità «R», la tenuta «E», l'isolamento termico «I», così definiti:

- *La stabilità: è l'attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco;*
- *La tenuta: è l'attitudine di un elemento da costruzione a non lasciar passare né produrre - se sottoposto all'azione del fuoco su un lato - fiamme, vapori o gas caldi sul lato non esposto;*
- *L'isolamento termico: è l'attitudine di un elemento da costruzione a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore.”*

Più recentemente, il DM 9/3/2007 definisce la “resistenza al fuoco” una delle fondamentali strategie di protezione da perseguire per garantire un adeguato livello di sicurezza della costruzione in condizioni di incendio. Essa riguarda la capacità portante in caso di incendio, per una struttura, per una parte della struttura o per un elemento strutturale nonché la capacità di compartimentazione rispetto all’incendio per gli elementi di separazione sia strutturali, come muri e solai, sia non strutturali, come porte e tramezzi” (Definizione del DM 9 marzo 2007).

In termini numerici, la resistenza al fuoco rappresenta l’intervallo di tempo, espresso in minuti primi, di esposizione dell’elemento strutturale all’incendio, durante il quale l’elemento costruttivo considerato conserva i requisiti progettuali di stabilità meccanica, tenuta ai prodotti della combustione e di coibenza termica, in presenza di un incendio con curva standard temperatura-tempo (Curva ISO 834).

La determinazione della resistenza al fuoco delle strutture si effettua seguendo il procedimento indicato nell’allegato al DM 9 marzo 2007.

2.2 Scenari d’Incendio.

L’azione termica di calcolo è valutata mediante l’adozione di uno scenario di incendio: è necessario scegliere una curva tempo-temperatura che definisca l’evoluzione della temperatura dell’incendio nel corso del quale i requisiti prefissati nel progetto devono essere mantenuti (incendio convenzionale di progetto); per il D.M. 9/3/2007 lo scenario *“può comprendere le seguenti fasi: innesco, crescita, incendio pienamente sviluppato, decadimento. Deve inoltre definire l’ambiente nel quale si sviluppa l’incendio di progetto ed i sistemi che possono avere impatto sulla sua evoluzione, come ad esempio eventuali impianti di protezione attiva.”*

La curva in Figura 2.1 rappresenta come la temperatura dei gas di combustione all’interno della superficie degli elementi strutturali cambi in funzione del tempo, permettendo così di identificare 3 fasi:

- Fase pre-flashover;
- Fase flashover;
- Fase post flashover.

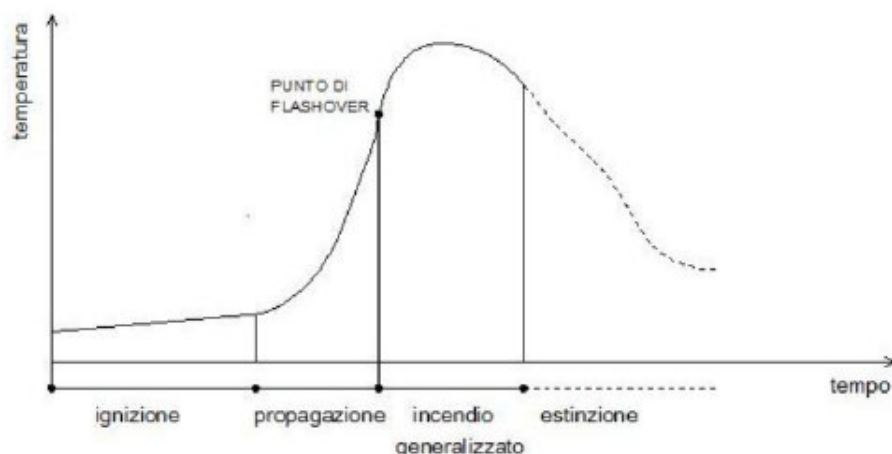


Figura 2.1: *Andamento Tipo dell'Evolutione dell'Incendio.*

2.2.1 Fase Pre-Flash Over.

Questa fase comprende ignizione e propagazione. L'ignizione rappresenta il momento principale dell'incendio, durante il quale la combustione è facilmente controllabile poiché i vapori delle sostanze combustibili, solide o liquide, iniziano il processo di combustione. Durante la propagazione dell'incendio l'innalzamento della temperatura provocato dal calore è lento con emissione di fumi e la quantità di combustibile coinvolta è scarsa.

2.2.2 Fase Flash Over.

Durante tale fase, la temperatura si alza repentinamente e la quantità di combustibile coinvolta nel processo di combustione aumenta notevolmente. Il fenomeno di flash over genera un flusso termico dovuto ad irraggiamento. Tale fenomeno è imputabile all'incremento di temperatura dei gas caldi dello strato superiore dei fumi di combustione, che raggiunge circa i 600°, all'interno di ambienti chiusi. Affinché si verifichi il flash over, definibile come una transizione di combustione da localizzata a generalizzata, sono necessarie alcune condizioni, quali la presenza di un compartimento chiuso e la disponibilità di materiale combustibile e ventilazione che apporti ossigeno.

2.2.3 Fase Post-Flash Over.

Tale fase comprende l'incendio generalizzato, l'estinzione e il raffreddamento. Durante la fase d'incendio generalizzato tutto il materiale combustibile presente nel compartimento partecipa alla combustione, divenuta incontrollabile, e la temperatura può superare anche i 1000°. L'estinzione rappresenta la fase finale di combustione durante la

quale si verificano i fenomeni di Esaurimento (termine dei materiali combustibili) e/o Soffocamento (termine del comburente, generalmente tramite autoestinzione di bracieri ad alta temperatura). Il raffreddamento, invece rappresenta la fase post-conclusiva dell'incendio durante la quale la zona interessata si raffredda e le sostanze volatili più pesanti dei residui di combustione si solidificano sul suolo.

2.2.4 Tipologie di Approccio all'Analisi.

La curva tempo-temperatura dipende da numerosi fattori fisico-chimici che a loro volta sono riconducibili a cinque parametri fondamentali:

- Carico d'incendio;
- Distribuzione del materiale combustibile;
- Ventilazione;
- Geometria del compartimento;
- Inerzia termica delle pareti.

Nell'ambito dell'odierna progettazione antincendio in ambienti soggetti ad affollamento - *FireSafetyEngineering* (Sassu, 2007, Setti, 2008) - si fa riferimento al problema dell'evacuazione dell'ambiente e del soccorso. In tali situazioni occorre predisporre misure e procedure di prevenzione e sistemi di protezione attiva, prendere in considerazione i tempi d'intervento dei vigili del fuoco nonché la propagazione dei fumi. A tal scopo esistono a livello normativo molteplici scenari tipo.

L'Eurocodice si esprime in merito raccomandando una valutazione di rischio antecedente alla scelta dello scenario d'incendio (CEN TC 250 2005). Gli scenari possono essere scelti utilizzando tre diversi approcci:

- Approccio probabilistico;
- Approccio deterministico;
- Approccio normativo.

Il primo è incentrato sulla valutazione probabilistica del verificarsi dell'incendio e delle relative conseguenze. L'analista, nel caso in cui scelga tale approccio, determinerà la verosimiglianza di uno o più gruppi di scenari eliminando quelli poco probabili.

Il secondo approccio, invece, è permeato dalla conoscenza della materia da parte del professionista. Tale approccio è difatti caratterizzato da analisi, prove sperimentali e giudizi basati sulla fisica, chimica e sulle correlazioni al fine di prevedere le conseguenze

dell'incendio. Questo approccio sopperisce alla frequente mancanza di dati relativi alle frequenze di accadimento, poiché si fonda sull'esperienza e non valuta la probabilità d'insorgenza.

Il terzo approccio, infine, è incentrato sulla norma NFPA 101 (life safety code) e prevede otto scenari predeterminati da scegliere e adattare in base alle caratteristiche dell'edificio preso in esame. A tali scenari si aggiungono i quattro delineati dalla norma NFPA 914 (*code for fire protection of historic structures*) concepiti per la valutazione della tutela dei beni.

Lo svolgimento delle verifiche meccaniche può avvenire attraverso differenti modalità; si possono effettuare verifiche nel dominio del tempo, per le quali è necessario verificare che il valore di progetto della resistenza tipo al fuoco, $t_{fi,d}$, deve essere superiore al tempo richiesto di resistenza al fuoco, $t_{fi,requ}$:

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$$

È possibile anche svolgere verifiche nel dominio delle resistenze nelle quali la resistenza dell'elemento $E_{fi,d,t}$ all'istante t deve superare gli effetti delle azioni $R_{fi,d,t}$:

$$E_{fi,d,t} \geq R_{fi,d,t}$$

Infine, si possono svolgere verifiche nel dominio delle temperature per le quali la temperatura di progetto del materiale θ_d non deve raggiungere il valore critico di progetto $\theta_{cr,d}$:

$$\theta_d \geq \theta_{cr,d}$$

Agli approcci summenzionati occorre aggiungere un ulteriore approccio, introdotto nel quadro normativo italiano con il decreto del 9 maggio 2007 con il nome di “approccio ingegneristico”. Tale approccio alla progettazione, di natura probabilistico-prestazionale, è stato inserito a livello europeo dagli Eurocodici (CEN TC 250 2004, 2005a-b), e in Italia con i decreti emanati nel 2007 (D. M. 2007a-b-c) e la Circolare 1968/2008 (Circ. Min. Int. 2008) i quali hanno rivisto e corretto la precedente disciplina, di tipo deterministico-prescrittivo, contenuta nella Circolare 91/1961 rimasta invariata per oltre quattro decenni. I metodi di calcolo a disposizione includono la possibilità di svolgere sperimentazioni dirette, nonché l'utilizzo di metodi prescrittivi tabellari, e di metodologie di tipo analitico basate sul calcolo degli elementi finiti e sulle informazioni disponibili nell'ambito delle proprietà dei materiali alle alte temperature.

Se confrontati ai metodi sperimentali e tabellari, i metodi analitici offrono svariati vantaggi tra i quali soprattutto l'applicabilità a intere strutture o a parti d'esse anziché

solo a singoli elementi. Tali metodi prevedono una modellazione in grado di riprodurre la risposta termica e strutturale attraverso procedimenti di analisi strutturale.

Nel caso in cui si verificano effetti di azioni eccezionali che comportino variazioni o riduzioni della capacità resistente e/o deformativa della struttura o delle sue parti, la normativa prevede che venga effettuata una valutazione della sicurezza allo scopo di stabilire se siano necessari o meno interventi quali la modifica della destinazione d'uso della costruzione ripristinando o aumentando la capacità portante. La valutazione presuppone la determinazione e il confronto dei livelli di sicurezza prima e dopo eventuali interventi e deve essere necessariamente effettuata antecedentemente agli interventi strutturali di adeguamento, miglioramento o riparazione locale.

Il D.M. 2008, al fine di limitare i rischi derivanti dagli incendi, racchiude in livelli le prestazioni richieste alle strutture di una costruzione (Tabella 2.1)

Tabella 2.1: *Livelli di Prestazione Richiesti alle Strutture – tab. 3.5.IV D.M.2008*

Livello I	Nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze del collasso delle strutture siano accettabili o dove il rischio di incendio sia trascurabile.
Livello II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.
Livello III	Mantenimento requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza.
Livello IV	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse.
Livello V	Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse.

L'adempimento dei requisiti di livello IV e V richiede che la struttura interessata dall'incendio possieda una capacità portante residua che permetta di effettuare interventi di riparazione o ripristino strutturale, nonché il mantenimento della funzionalità. Tali livelli dipendono dalle richieste del committente e non sono generalmente adottati per gli edifici ordinari, per i quali il livello III è considerato adeguato.

2.3 Le Curve d'Incendio.

La definizione delle azioni esercitate sugli elementi di una costruzione dovute al fuoco non può prescindere dalla modellazione della fase di pieno sviluppo dell'incendio, poiché è in tale fase che si raggiungono le temperature massime dei gas caldi contenuti nel

compartimento. Al fine di concretizzare tale modello, il D.M. 09/03/2007 propone due differenti tipi di curve:

- Curve nominali applicate agli elementi costruttivi per un intervallo di esposizione pari alla classe di resistenza al fuoco prevista; tali curve prendono in considerazione alcuna fase di raffreddamento e sono adottate per le verifiche di resistenza al fuoco di tipo convenzionale e per la classificazione delle costruzioni;
- Curve naturali determinate in base ai modelli d'incendio, sono applicate agli elementi costruttivi per l'intera durata dell'incendio (devono, quindi, considerare la fase di raffreddamento fino al ritorno a temperatura ambiente).

L'applicazione degli incendi convenzionali di progetto deve avvenire ad un compartimento per volta, a meno di diverse previsioni nello scenario d'incendio.

2.3.1 Curve Nominali.

Si tratta di curve convenzionali che, essendo generalmente monotone crescenti, sono facilmente riproducibili in laboratorio. Tali curve trovano origine nel punto di *flashover* (fase di ignizione e propagazione trascurata). Ve ne sono diversi esempi proposti in letteratura, ma nel seguito si elencano quelle previste nel D.M. 09/03/2007.

In primo luogo si definisce la *curva nominale standard ISO 834* definita dalla seguente equazione:

$$T_g = 20 + 345 \log(8t + 1)$$

Nella quale T_g è la temperatura, espressa in °C, raggiunta dai gas caldi al tempo t espresso in minuti. Come riportato dall'Eurocodice 1, la si rapporta ai carichi d'incendio dovuti alla combustione di materiali a base di cellulosa. Lo stesso Eurocodice 1 indica un valore del coefficiente di convezione dei gas caldi, α_c , pari a 25W/(m²K).

Un'altra delle curve nominali proposte dal decreto è la *curva nominale degli idrocarburi* (*hydrocarbon curve*) che si utilizza nei casi in cui è previsto l'incendio di grosse quantità di idrocarburi. Tale curva ha un'equazione del tipo:

$$T_g = 20 + 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t})$$

In questo caso, l'Eurocodice 1 propone un valore α_c pari a 50W/(m²K). Negli incendi descritti in tale curva, la temperatura cresce più in fretta e raggiunge valori molto più elevati.

Infine, si riporta la *curva nominale di esposizione all'incendio esterno* utilizzata nella valutazione della resistenza al fuoco di elementi posti all'esterno dell'edificio ma che

possono essere investiti dal calore prodotto dalle fiamme uscenti da porte e finestre di un fabbricato adiacente. Tale curva ha un'equazione del tipo:

$$T_g = 20 + 660(1 - 0,325e^{-0,32t} - 0,675e^{-3,8t})$$

Anche in questo caso, l'Eurocodice 1 prevede un valore di α_c pari a $25\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Il grafico in Figura 2.2 riporta un confronto tra le diverse curve citate per una durata d'incendio pari a 180 minuti.

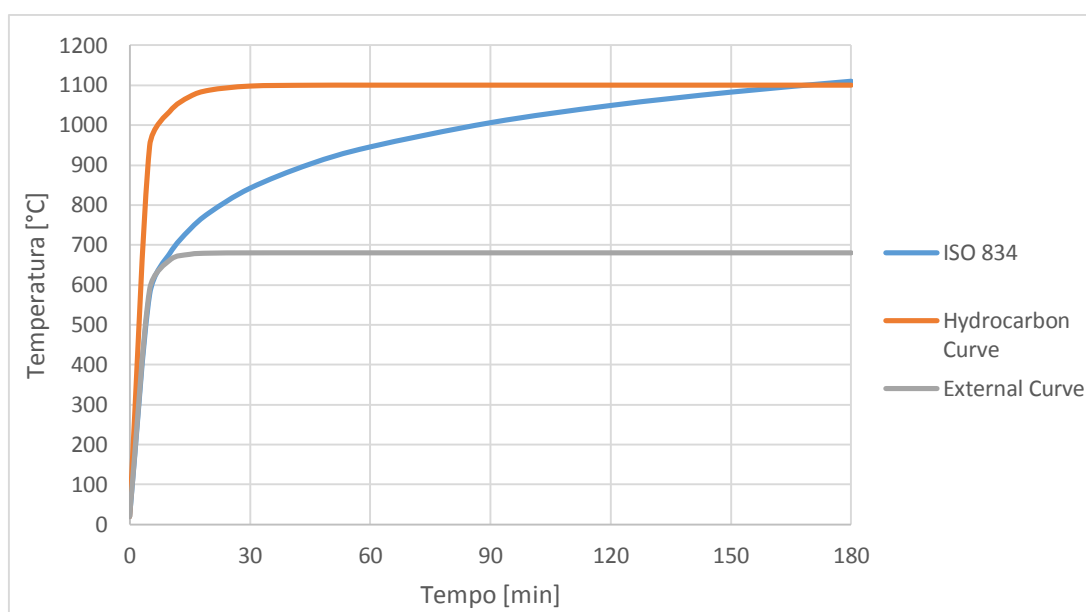


Figura 2.2: Confronto tra le Curve Nominali - ISO 834, Hydrocarbon Curve, External Fire Exposure Curve.

2.3.2 Le Curve Naturali.

Per un progetto condotto seguendo un approccio prestazionale, secondo le indicazioni contenute nei provvedimenti emanati dal Ministero dell'interno, la capacità portante e/o la capacità di compartimentazione, può essere verificata rispetto all'azione termica della curva naturale di incendio, applicata per l'intervallo di tempo necessario al ritorno alla temperatura ordinaria, che si dovrà determinare utilizzando:

- Modelli d'incendio sperimentali;
- Modelli d'incendio numerici semplificati (incendio parametrico, incendio localizzato);
- Modelli d'incendio numerici avanzati (modelli a zone, modelli di campo).

Ovvero, è possibile utilizzare il metodo delle classi; tuttavia, qualora si adotti il metodo prestazionale, è necessario verificare che gli elementi costruttivi garantiscano il possesso di requisiti minimi di resistenza al fuoco determinati rispetto all'azione termica della curva di incendio nominale standard ISO 834 secondo la correlazione tra carico d'incendio specifico di progetto ($q_{f,d}$) e classe di riferimento riportata nel D.M.09/03/2007 (Tabella 2.2):

Tabella 2.2: *Correlazione tra carico d'incendio specifico di progetto e classe: determinazione della minima classe di resistenza al fuoco da garantire in caso di applicazione dell'approccio ingegneristico (Tab.5 D.M.2007)*

Carichi d'incendio specifici di progetto ($q_{f,d}$)	Classe
Non superiore a 300 MJ/m²	0
Non superiore a 450 MJ/m²	15
Non superiore a 600 MJ/m²	20
Non superiore a 900 MJ/m²	30
Non superiore a 1200 MJ/m²	45
Non superiore a 1800 MJ/m²	60
Non superiore a 2400 MJ/m²	90
Superiore a 2400 MJ/m²	120

Le curve di incendio naturale dovranno essere determinate per lo specifico compartimento, con riferimento a metodi di riconosciuta affidabilità e facendo riferimento al carico di incendio specifico di progetto ponendo pari ad 1 i coefficienti relativi alle misure di protezione che si intendono modellare.

2.4 Classi di Resistenza al Fuoco e Classificazione del Compartimento.

La classe di resistenza al fuoco si esprime indicando, in minuti primi, l'intervallo di tempo durante il quale il compartimento antincendio garantisce la capacità di compartimentazione; ancora meglio, la si può definire come la durata minima di resistenza al fuoco da richiedere alla struttura, o all'elemento costruttivo in essa contenuto, per un incendio nominale; si hanno le classi 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240, 360.

La classificazione dei compartimenti, invece, avviene a seconda degli obiettivi prestazionali richiesti allo stesso.

Il D.M. 14.01.2008, così come la Norma C.N.R. 12/99, classifica la resistenza al fuoco delle strutture in 5 livelli descritti nel seguito.

2.4.1 Livello I.

Nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze di un crollo delle strutture siano accettabili e/o dove il rischio di incendio sia trascurabile. A tale livello, eventuali crolli totali o parziali della costruzione non devono arrecare danni ad altre costruzioni, non devono compromettere l'efficacia di elementi di compartimentazione e sistemi antincendio che proteggono altre costruzioni; le attività svolte sono tali da non comportare un carico di incendio specifico riferito a tutti i compartimenti e gli ambienti che li compongono maggiore di 100 MJ/m^2 ; all'interno della struttura non si svolgono attività che comportano l'impiego di sostanze infiammabili, esplosive, tossiche o che possono dar luogo a reazioni pericolose, la costruzione non è adibita ad attività che comportano impiego di fiamme libere, di resistenze elettriche in vista e di corpi incandescenti non protetti. La costruzione non è adibita interamente o in parte, ad attività che comportino la presenza di persone, esclusa quella occasionale e di breve durata del personale addetto.

2.4.2 Livello II

Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in un luogo sicuro. Eventuali crolli totali o parziali della costruzione non devono arrecare danni ad altre costruzioni e non devono compromettere l'efficacia di elementi di compartimentazione e sistemi antincendio che proteggono altre costruzioni. Il massimo affollamento complessivo della costruzione non deve superare le 100 persone e la densità di affollamento media dei compartimenti deve essere al massimo di 0,2 persone per metro quadrato. Per quanto concerne le attività svolte all'interno della costruzione, esse non devono prevedere posti letto, né devono essere rivolte a malati, anziani, bambini o persone con ridotte o impedito capacità motorie, sensoriali, cognitive.

2.4.3 Livello III

Requisiti di resistenza al fuoco delle strutture tali da evitare, per tutta la durata dell'incendio, il collasso delle strutture stesse. Tale livello è adeguato per tutte le costruzioni, fatte salve quelle con prestazioni di livello IV o V. È ammesso il livello di

prestazioni II per elementi strutturali secondari purché sia verificato che un eventuale crollo di elementi secondari non comprometta la capacità portante delle altre parti della struttura, così come la capacità di elementi costruttivi di compartimentazione e di sistemi antincendio, un eventuale crollo di elementi secondari non deve costituire pericolo per gli occupanti e per i soccorritori.

2.4.4 Livello IV e Livello V.

Per il livello IV si devono avere requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse (su richiesta del committente). Deve essere mantenuta la capacità portante per tutta la durata dell'incendio, il regime di deformazione contenuto, capacità portante residua che consenta interventi di ripristino.

Per il livello V si devono avere requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse (su richiesta del committente). Deve essere mantenuta la capacità portante per tutta la durata dell'incendio, il regime di deformazione deve essere trascurabile, la capacità portante residua adeguata alla funzionalità immediata della ricostruzione.

2.5 Carico d'Incendio.

Il valore nominale del carico d'incendio riferito alla superficie lorda, A , della pianta del compartimento si valuta attraverso la relazione:

$$q_f = \frac{\sum_{i=1}^N g_i \cdot H_i \cdot m_i \cdot \Psi_i}{A} [MJ/m^2]$$

Dove con i si indica l' i -esimo materiale combustibile e quindi g_i ne rappresenta la massa espressa in [kg], H_i ne rappresenta il potere calorifico inferiore espresso in MJ/kg, m_i è il fattore di partecipazione alla combustione (in genere pari a 0,8 per i materiali di natura cellulosa e 1 per tutti gli altri materiali combustibili), Ψ_i è il fattore di limitazione della partecipazione alla combustione (pari a 0 per i materiali contenuti in contenitori progettati appositamente per resistere al fuoco, 0,85 per quelli in contenitori non combustibili non progettati appositamente, 1 in tutti gli altri casi).

Se la distribuzione materiale combustibile non è uniforme, è necessario procedere ad una valutazione del carico d'incendio specifico che tenga conto della sua effettiva distribuzione.

A partire dal carico specifico d'incendio si definisce il carico d'incendio specifico di progetto, che rappresenta il potenziale termico netto (riferito all'unità di superficie) che può essere prodotto nel corso della combustione completa di tutti i materiali contenuti in un compartimento, e che è calcolabile attraverso la relazione:

$$q_{f,d} = q_f \delta_{q1} \delta_{q2} \delta_n$$

Dove δ_{q1} è il fattore che tiene conto del rischio d'incendio in funzione della dimensione del compartimento, δ_{q2} è il fattore che tiene conto del rischio d'incendio in funzione dell'attività svolta all'interno del compartimento, δ_n è il fattore che tiene conto delle differenti misure di protezione antincendio e gestionali adottate. Per i valori di tali coefficienti si rimanda al D.M. 09/03/2007.

Il carico d'incendio specifico di progetto è la grandezza di riferimento per la valutazione della resistenza al fuoco delle costruzioni.

2.6 Verifica della Prestazione Strutturale in Caso d'Incendio.

La verifica della prestazione strutturale in caso di incendio di un'opera o di un elemento strutturale si può effettuare scegliendo una delle seguenti procedure:

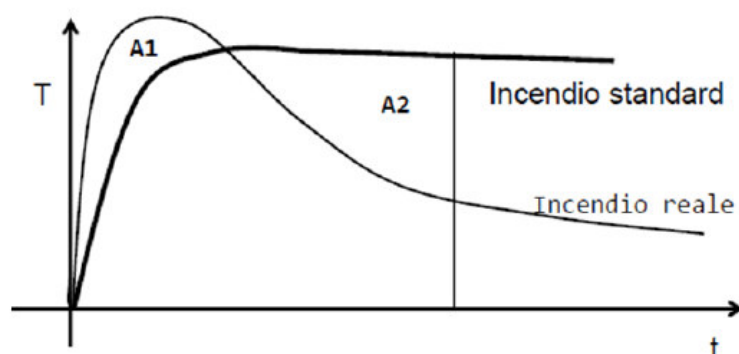
- Metodo sperimentale;
- Metodo tabellare;
- Metodo analitico.

Nel caso di verifica sperimentale, come riportato nel D.M. 16/02/2007, le prestazioni degli elementi soggetti al fuoco devono essere testati attraverso prove in forno condotte in uno dei laboratori indicati dalla stessa norma all'art.1 comma 9.

Il decreto stabilisce che le procedure da seguire nello svolgimento della prova sono quelle indicate nella norma UNI EN 13501: *"Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione"*.

Le prove di resistenza al fuoco permettono di controllare il comportamento al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi quando sono sottoposti ad un preciso ciclo di riscaldamento definito dalla curva nominale d'incendio standard. Gli ostacoli più evidenti al metodo sono dovuti alle differenze tra la gravità dell'incendio reale e quello standard, ipotizzato dalle curve Temperatura –tempo (Figura 2.3).

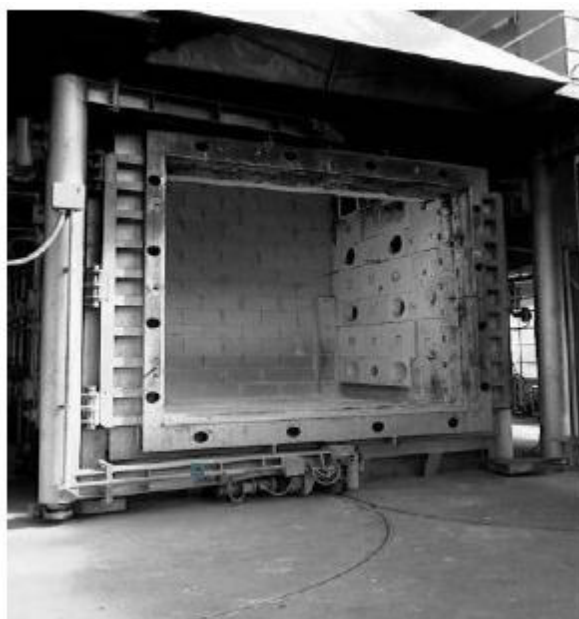
Figura 2.3: *Confronto tra Curva d'Incendio Standard e Curva d'Incendio Reale.*



Il forno, appositamente progettato per tali scopi (Figura 2.4), può essere alimentato con combustibile liquido o gassoso; inoltre, deve essere in grado di riscaldare gli elementi da compartimentazione verticali oppure orizzontali su una sola faccia o su più lati.

Il modello più comune è quello a parete verticale con dimensioni 3.0m x 3.0 m; tuttavia esistono versioni di dimensioni maggiori 4m x 4 m. Gli elementi orizzontali, come travi e solette, invece, sono testati in forni orizzontali.

Figura 2.4: *Forno Verticale per Prove di Resistenza al Fuoco.*



I risultati da prove di resistenza al fuoco su elementi strutturali eseguiti su scala reale potrebbero essere più indicati in quanto le prove, più economiche, su scala ridotta non sono in grado di ricreare gli eventuali effetti dei collegamenti, dei ritiri e dell'influenza del rivestimento.

Sebbene il metodo sperimentale abbia il vantaggio di fornire risultati molto vicini alla realtà e che possono essere applicati, senza ulteriori valutazioni, a prodotti /elementi

realizzati all'interno del campo di applicazione diretta del risultato di prova, esso non è esente da alcuni svantaggi di concettuale e pratico:

- Non si tiene conto delle diverse modalità di trasmissione del calore;
- La curva tempo temperatura del forno ha una certa tolleranza, il regime termico non sempre è uniforme in tutto il forno;
- Elevato costo della prova sperimentale;
- Impossibilità di effettuare test su strutture di grandi dimensioni.

Il professionista che si affida al metodo sperimentale può utilizzare direttamente i risultati di una prova solo nel caso in cui essa riproduca fedelmente l'elemento posto in opera; in pratica, solo se l'elemento costruttivo ricade all'interno del campo di diretta applicazione del risultato di prova (La Malfa Antonio, 2008).

Nell'utilizzo del metodo tabellare, invece, si presuppone che la struttura debba resistere, senza che si presentino fenomeni di rovina, all'incendio delle sostanze combustibili in essa contenute. Il metodo è basato sull'utilizzo di tabelle che forniscono lo spessore degli elementi strutturali, privi di rivestimento o spessore del rivestimento, affinché sia garantita la resistenza portante per un intervallo di tempo stabilito ad un incendio standard. I valori tabellati costituiscono il risultato di ampie campagne sperimentali così come di elaborazioni numeriche riferite alle tipologie costruttive e ai materiali che più sono diffusi nelle attività a rischio d'incendio. Bisogna precisare che le interpolazioni, le estrapolazioni o le modifiche alle condizioni di utilizzo non sono consentite. Quindi, le tabelle possono essere utilizzate correttamente solo se è possibile individuare al loro interno l'elemento costruttivo per il quale si vuole determinare la resistenza al fuoco.

Nel metodo si introducono i concetti di: carico d'incendio e classe dell'edificio. La classe esprime il carico di incendio virtuale, in Kg/mq di legna standard, e nello stesso tempo esprime in minuti primi la durata minima di resistenza al fuoco da richiedere alla struttura (la semplificazione adottata è che 1 Kg/mq di legna bruci in 1 minuto).

In formule:

$$C = K \cdot q$$

Dove C indica la classe ($C = 15-30-45-60-90-120-180$), q indica il carico d'incendio che per il locale o per il piano considerato si ottiene calcolando, per il materiale combustibile presente, l'equivalente in legno sulla base del potere calorifico superiore dello stesso (pari a 4400 Cal/Kg), K è il coefficiente di riduzione che tiene conto delle reali condizioni d'incendio ed è compreso tra 0,2 e 1.

Una volta determinata la classe della struttura si dimensionano gli spessori e le misure di protezione da adottare per i vari componenti strutturali secondo le tabelle riportate in normativa.

Nel caso del metodo tabellare, i vantaggi sono dovuti alla facilità d'utilizzo dello stesso e al suo costo contenuto; gli svantaggi, invece, sono attribuibili all'impossibilità di estensione dei risultati a tutte le tipologie strutturali e alla non considerazione di determinati parametri sui materiali (tipologia, stagionatura del calcestruzzo, ecc.).

Infine, per quanto riguarda i metodi analitici, essi hanno l'obiettivo di permettere la progettazione e la verifica di elementi costruttivi e nel caso in cui non sia possibile attribuire a quest'ultimi un valore di resistenza attraverso il confronto con tabelle, l'importanza di tali metodi risulta tanto più evidente.

L'incognita principale del problema è rappresentata dalla mappatura della temperatura all'interno della sezione dell'elemento; essa è importante in quanto il procedimento di calcolo si basa su una riduzione della resistenza dei materiali dovuta al degrado al crescere della temperatura.

I calcoli che il progettista esegue quando utilizza il metodo analitico sono necessari per dimostrare che le azioni di progetto risultano sempre inferiori della resistenza opportunamente ridotta dell'elemento. Si precisa che la valutazione permessa da tali metodi, in presenza d'incendio, riguarda la capacità portante degli elementi costruttivi e non la loro tenuta ai al fumo e ai gas.

Sebbene siano richiesti degli strumenti di calcolo complessi, i vantaggi legati all'utilizzo dei metodi analitici sono tutt'altro che trascurabili; essi sono dovuti, innanzitutto, al fatto che i risultati sono costanti nel tempo e dipendono unicamente delle caratteristiche geometriche dell'elemento strutturale nonché delle caratteristiche dei materiali, tiene conto delle caratteristiche della sollecitazione reali, l'onere a carico del committente risulta ridotto.

2.7 Comportamento dei Materiali Soggetti al Fuoco (Reazione al fuoco).

Il calore che si sviluppa nel compartimento, a seguito dell'incendio, determina un aumento della temperatura nei vari punti della sezione di un elemento costruttivo e, di conseguenza, il degrado delle proprietà dei materiali che lo costituiscono. A ciò si può aggiungere l'eventuale variazione dello stato tensionale per effetto delle dilatazioni termiche impedita.

Oltre al degrado strutturale, i materiali presentano caratteristiche che contribuiscono a incrementare le problematiche di propagazione e sicurezza; esse sono:

- L'inflammabilità, cioè la capacità di un materiale di prendere fuoco quando viene messo in contatto con una sorgente di ignizione e di permanere in questo stato di ignizione anche quando la sorgente viene allontanata.
- La velocità di propagazione fronte di fiamma, che è la velocità con cui il fronte di fiamma avanza su un materiale, cioè la velocità con cui un materiale brucia (riferito soprattutto ai materiali bidimensionali come tende, pavimenti, controsoffitti, ecc.)
- Il gocciolamento, cioè la capacità di un materiale, soggetto al fuoco, di produrre gocce che continuano a bruciare e che possono incendiare altri materiali.
- Lo sviluppo di calore nel tempo, che è la quantità di calore che il materiale produce nell'unità di tempo quando brucia. Un materiale che emette grandi quantità di calore è in grado di innescare altri materiali nelle sue vicinanze.
- La produzione di fumo, cioè la quantità e l'opacità dei fumi emessi. E' strumentale alla stima del grado di oscuramento dell'ambiente soggetto all'incendio.
- La produzione di gas tossici: che è la quantità e il tipo di sostanza tossica prodotta dall'incendio.

Il comportamento alle alte temperature dei materiali da costruzione è dipendente dalla struttura chimico-fisica dei materiali stessi. Di conseguenza la temperatura influenza il carico di snervamento e rottura, la duttilità del materiale e le sue proprietà elastiche.

3 La Muratura e le Volte in Muratura.

Nel presente capitolo si esporranno le proprietà fisiche e meccaniche della muratura e dei singoli elementi che la costituiscono. In particolare, ci si limiterà all'esame esclusivo della muratura ordinaria, tralasciando il caso di quella armata, in quanto di nessun interesse per il presente lavoro di tesi.

Da un punto di vista tecnico, la muratura è, di fatto, un materiale composito i cui costituenti di base sono malta e inerti di grosse dimensioni che rappresentano gli elementi resistenti.

3.1 Elementi Resistenti Costituenti.

La natura degli elementi costituenti la muratura può essere di due tipi differenti: blocchi in pietra naturale oppure blocchi artificiali.

I primi sono ricavati da materiale lapideo che non deve essere friabile o sfaldabile, deve resistere bene a temperature molto basse, e nel quale non vi devono essere significative percentuali di sostanze organiche o solubili; l'utilizzo di blocchi in pietra naturale permette la realizzazione di muratura in pietra non squadrata, muratura listata, o muratura in pietra squadrata.

I blocchi artificiali, invece, possono essere realizzati in laterizio, ottenuti attraverso la cottura a elevata temperatura di argilla, o in calcestruzzo; questi ultimi possono essere di aggregato leggero o denso. Inoltre, a differenza di quelli naturali, i blocchi artificiali possono essere presentare foratura (verticale o orizzontale) parallela o perpendicolare rispetto al piano di posa.

La percentuale di foratura è definita attraverso la seguente relazione:

$$\varphi = F \frac{100}{A}$$

In tale espressione:

- F rappresenta l'area complessiva dei fori passanti e profondi non passanti;
- A rappresenta l'area lorda della faccia dell'elemento di muratura delimitata dal suo perimetro.

Attraverso la percentuale di foratura è possibile effettuare una classificazione dei blocchi: si distinguono blocchi pieni, semipieni e forati.

3.1.1 Resistenza a Compressione degli Elementi Resistenti Naturali.

Il D.M. 20 Novembre 1987 riporta, tra l'altro, le modalità di prova per la determinazione della resistenza a compressione degli elementi resistenti naturali. In particolare, la norma prevede che ogni cava sia controllata almeno annualmente ed ogni qualvolta cambino la natura e le caratteristiche meccaniche dei materiali. Nel caso in cui il direttore dei lavori richieda il controllo di accettazione in cantiere, lo stesso deve essere effettuato su uno o più prelievi ciascuno costituito da tre campioni sui quali determinare la resistenza a compressione.

Indicando con f_i la resistenza a compressione dell' i -esimo elemento, si ha:

$$\frac{\sum_{i=1}^3 f_i}{3} = 1,2 f_{bk}$$

Deve comunque risultare che la più piccola delle tre resistenze sia maggiore del 90% di f_{bk} la quale rappresenta la resistenza caratteristica a compressione indicata dal produttore.

3.2 La Malta.

Alla malta è attribuito il compito di legare tra loro i blocchi. La sua realizzazione avviene in seguito al mescolamento, secondo ben precise proporzioni, di legante, acqua, e sabbia. La lavorabilità e il tempo di indurimento del composto che se ne ottiene dipendono da numerosi fattori, tra cui quantità di acqua, dimensione degli inerti, eventuale presenza di additivi, etc.

Al variare del legante utilizzato, si possono distinguere le seguenti tipologie di malta:

- Malte aeree, confezionate utilizzando calci aeree;
- Malte Idrauliche, confezionate utilizzando leganti di tipo idraulico (calci idrauliche, pozzolaniche, ecc.);
- Malte Bastarde o Composte, confezionate utilizzando più leganti.

Per determinare le caratteristiche meccaniche della malta, si effettuano prove di flessione e compressione su provini prismatici i quali sono fatti maturare a umidità del 90% e alla temperatura di 20 °C come da norma UNI EN 196-1:2005. Per le prove di flessione, i provini vengono posti su appoggi a coltello e caricati da carico verticale crescente concentrato in mezzzeria; la resistenza si ottiene attraverso la seguente relazione:

$$R_f = \frac{1,5 F_f \cdot l}{b^3}$$

In cui R_f è la resistenza a flessione, b è il lato della sezione quadrata del prisma, F_f è il carico applicato in mezzzeria al momento della rottura, l è la distanza tra gli appoggi.

I due mezzi prismi ottenuti dalla rottura a flessione del prisma originario sono oggetto delle prove a compressione nelle quali essi sono caricati lateralmente con una forza la cui velocità d'incremento è pari a circa 2,4 kN/s. La resistenza a compressione si ottiene attraverso la seguente relazione:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

In cui: R_c è la resistenza a compressione e F_c è il carico massimo a rottura.

Nel caso di malte aeree, la resistenza a compressione è abbastanza scarsa (dell'ordine dei 0,5 MPa) e il loro indurimento è molto lento e; inoltre, sono vulnerabili all'azione del gelo e agli ambienti aggressivi.

Le malte idrauliche, invece, possiedono una resistenza a compressione che è dell'ordine dei 2,5 MPa, inferiore a quella delle malte bastarde, pari a 5 MPa.

Esistono, anche altre tipologie di malta; una di queste è la malta cementizia, che può essere confezionata con vari tipi di cemento e per la quale lo sviluppo delle caratteristiche di resistenza è molto più rapido. Tali malte possiedono una resistenza a compressione dell'ordine dei 12 MPa.

3.3 Resistenza a Compressione e a Taglio della Muratura.

Il comportamento a compressione mono assiale di un prisma di muratura, a causa della coazione che si sviluppa tra malta e mattoni, risulta essere intermedio tra quello dei singoli elementi (Figura 3.1). Dal punto di vista del calcolo si approssima la curva ad una bilatera in modo simile al calcestruzzo.

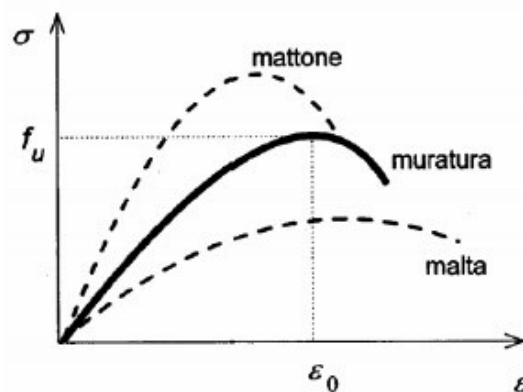


Figura 3.1: *Legame Costitutivo Muratura.*

La Normativa italiana così come l'Eurocodice fanno ricorso a diagrammi sforzi-deformazione idealizzati come il diagramma parabola- rettangolo (come in Figura 3.2) o come una bilatera.

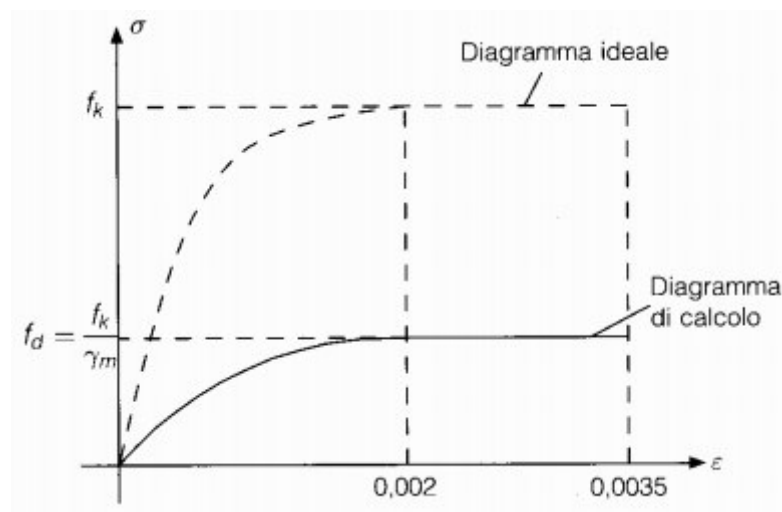


Figura 3.2: *Legame Costitutivo Parabola-Rettangolo Muratura (Eurocodice).*

In mancanza di una determinazione sperimentale della resistenza a compressione della muratura, f_k , la stessa può essere determinata a partire dalla resistenza dei singoli elementi che la costituiscono; a tal scopo, la normativa fornisce un apposito strumento che consiste nella Tabella 3.1 e Tabella 3.2, nelle quali sono indicati i valori di resistenza a compressione della muratura, costituita da elementi artificiali e naturali, ottenibili in funzione della tipologia di malta utilizzata.

Tabella 3.1: *Resistenza a Compressione di Muratura in Elementi Artificiali Pieni e Semipieni – Tabella 11.10.V N.T.C. 08*

Resistenza caratteristica a compressione f_{k2} dell'elemento N/mm^2	Tipo di malta			
	M15	M10	M5	M2,5
2,0	1,2	1,2	1,2	1,2
3,0	2,2	2,2	2,2	2,0
5,0	3,5	3,4	3,3	3,0
7,5	5,0	4,5	4,1	3,5
10,0	6,2	5,3	4,7	4,1
15,0	8,2	6,7	6,0	5,1
20,0	9,7	8,0	7,0	6,1
30,0	12,0	10,0	8,6	7,2
40,0	14,3	12,0	10,4	—

Tabella 3.2: *Resistenza a Compressione di Muratura in Elementi Naturali in Pietra Squadrata*
– Tabella 11.10.V N.T.C. 08

Resistenza caratteristica a compressione f_{mk} dell'elemento	Tipo di malta			
	M15	M10	M5	M2,5
2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
3,0	2,2	2,2	2,2	2,0
5,0	3,5	3,4	3,3	3,0
7,5	5,0	4,5	4,1	3,5
10,0	6,2	5,3	4,7	4,1
15,0	8,2	6,7	6,0	5,1
20,0	9,7	8,0	7,0	6,1
30,0	12,0	10,0	8,6	7,2
$\geq 40,0$	14,3	12,0	10,4	--

Per quanto concerne la rottura a taglio, si possono distinguere, per un pannello murario incastrato alla base, non armato e senza aperture, due tipologie:

- Rottura per scorrimento nei giunti orizzontali;
- Rottura per taglio trazione nella zona centrale della parete.

La resistenza a taglio si ricava attraverso la seguente espressione:

$$f_{vk} = f_{vk0} + \mu \sigma_n$$

Nella quale:

- f_{vk} è la resistenza caratteristica a taglio;
- f_{vk0} è la resistenza caratteristica a taglio in assenza di carichi verticali;
- μ è il coefficiente d'attrito ed è pari a 0,4;
- σ_n è la tensione normale media dovuta ai carichi verticali.

Qualora il valore di f_{vk0} non fosse determinato sperimentalmente, si possono prendere in considerazione i valori forniti dalla N.T.C. 08 nella Tab. 11.10.VII, i quali sono stimati sulla base della resistenza a compressione degli elementi costituenti la muratura (Tabella 3.3).

Tabella 3.3: Resistenza caratteristica a taglio in assenza di tensioni normali f_{vk0} (valori in N/mm^2) (Tab. 10.11.VII NTC 08).

Tipo di elemento resistente	Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento	Classe di malta	f_{vk0} (N/mm^2)
Laterizio pieno e semipieno	$f_{bk} > 15$	$M10 \leq M \leq M20$	0,30
	$7,5 < f_{bk} \leq 15$	$M5 \leq M < M10$	0,20
	$f_{bk} \leq 7,5$	$M2,5 \leq M < M5$	0,10
Calcestruzzo; Silicato di calcio; Cemento autoclavato; Pietra naturale squadrata.	$f_{bk} > 15$	$M10 \leq M \leq M20$	0,20
	$7,5 < f_{bk} \leq 15$	$M5 \leq M < M10$	0,15
	$f_{bk} \leq 7,5$	$M2,5 \leq M < M5$	0,10

In particolare, nella Tabella 3.3 sono rappresentati i valori di f_{vk0} in funzione della classe di malta, della tipologia e della resistenza a compressione dell'elemento.

3.4 Comportamento della Muratura Soggetta a Carico d'Incendio.

Gli ambiti di ricerca inerenti la resistenza al fuoco della muratura esposta ad alte temperature sono numerose; lo stato dell'arte include ad esempio:

- Ricerche sperimentali e/o numeriche sulle effettive prestazioni degli elementi di muratura sottoposti ad incendio. Tali ricerche sono spesso volte allo studio localizzato di murature tipiche delle murature presenti nel Paese preso in esame.
- Ricerche volte alla caratterizzazione fisica e meccanica dei materiali (muratura, malta, calcestruzzo normale e ad alte prestazioni) prima, durante, e dopo l'esposizione ad alte temperature.

Le prime ricerche sperimentali relative alla resistenza al fuoco degli elementi costruttivi risalgono

Le prime ricerche sperimentali relative alla resistenza al fuoco degli elementi costruttivi (anni 20-60 del secolo scorso) permisero la codificazione delle prove standard tuttora utilizzate in Europa, Stati Uniti e Australia (ISO 1975, ASTM 1995, AS 1990), nonché la formazione di gran parte delle conoscenze empiriche a disposizione. Infatti, ancora oggi le prove standard rappresentano lo strumento fondamentale di validazione dei metodi di calcolo e dell'ampliamento/aggiornamento dei dati tabulati usati spesso nella pratica dai progettisti.

Il problema degli elementi murari aventi funzione di separazione è più frequentemente oggetto delle ricerche disponibili. Al momento, infatti, i protocolli non contemplano il caso del muro non separante, riscaldato sui due lati, né la situazione della colonna isolata sotto incendio. La distribuzione delle temperature nello spessore sottoposto ad incremento di temperatura su entrambi i lati deve essere pertanto determinata attraverso l'uso di soluzioni analitiche (Kreith, 1975).

In Italia, è da segnalare una ricerca, svolta negli anni '90 del secolo scorso, su varie tipologie di muratura in elementi di laterizio (blocchi con diverse percentuali di foratura e diversa densità dell'impasto), allo scopo di produrre una proposta di aggiornamento della tabella "Spessori delle pareti tagliafuoco" contenuta nella Circolare 91/1961 49 allora in vigore (CSE ANDIL, 1995). Il Centro Studi ed Esperienze Antincendi del Ministero dell'Interno (Roma -Capannelle) in collaborazione con l'ANDIL (Associazione Nazionale degli Industriali dei Laterizi) ha avviato nel 1989 e concluso nel 1994 una ricerca sperimentale avente la finalità di valutare le caratteristiche di resistenza al fuoco (classe REI) di strutture murarie confezionate con elementi di laterizio e di partizioni orizzontali realizzate con elementi tipologicamente diversi e di vario spessore. Le prove sono state eseguite su prototipi confezionati con materiale fornito direttamente da Aziende produttrici di laterizi associate all'ANDIL. Le prove, condotte secondo le indicazioni della Circolare 91/1961 49, hanno stabilito la resistenza al fuoco secondo il criterio REI su 20 pannelli non caricati, di spessore compreso tra 6 e 25 cm, realizzati con elementi di laterizio normale e alleggerito in pasta, assemblati con giunti orizzontali e verticali continui di malta tipo M2 con pareti non rifinite esternamente con intonaco.

Per confezionare i pannelli sono stati utilizzati elementi di laterizio pieni, semipieni e forati, con percentuale di foratura compresa tra 0 e 70% secondo il DM 20.11.87. Essendo stati considerati come elementi di separazione (quindi, con semplici funzioni di pareti "tagliafuoco"), non sono stati soggetti a nessun carico.

I pannelli murari, costruiti all'interno di appositi telai di acciaio di dimensioni pari a 220 x 122 cm, hanno subito una fase di stagionatura di 3 mesi, terminata la quale, sono stati installati sulla bocca del forno in modo da realizzare una camera di combustione chiusa. Su tutti i campioni sottoposti a prova sono state applicate, per valutare meglio l'andamento delle temperature, termocoppie sui setti interni della parete a varie profondità oltre che sulla superficie non esposta al fuoco. Il forno è stato riscaldato secondo la curva temperatura/tempo prevista dalla Circolare n. 91 e nel rispetto delle tolleranze prescritte.

In Tabella 3.4 è riportato un riassunto con le dimensioni degli elementi impiegati per il confezionamento dei muri e i risultati delle prove per il raggiungimento della temperatura massima (180°).

Tabella 3.4: *riassunto dei risultati delle prove di resistenza al fuoco, svolte presso il “centro studi ed esperienze dei vigili del fuoco” alle Capannelle (Roma)*

ELEMENTO L x H x P (cm)	SPESSORE PANNELLO (cm)	FORATURA (%)	TIPO DI ELEMENTO	SIGLA	DURATA PROVA (minuti)	REI
30 x 16 x 25	25	50	Normale	P.N.2	180	180
35 x 25 x 20	20	50	Normale	P.N.1	180	180
35 x 25 x 20	20	50	Alleggerito	P.A.3	180	180
30 x 19 x 20	20	50	Alleggerito	P.A.2	180	180
25 x 25 x 20	20	65	Alleggerito	T.A.1	180	180
25 x 25 x 20	20	65	Normale	T.N.1	128	120
25 x 22.5 x 17	17	45	Alleggerito	P.A.1	180	180
25 x 25 x 15	15	65	Alleggerito	T.A.2	149	120
25 x 25 x 15	15	65	Normale	T.N.4	151	120
28 x 5.8 x 14	14	15	Normale	P.N.4	180	180
45 x 22.5 x 12	12	45	Alleggerito	T.A.4	153	120
25 x 25 x 12	12	70	Normale	T.N.2	56	45
30 x 19 x 12	12	50	Normale	T.N.6	161*	120
25 x 12 x 12	12	45	Normale	P.N.3	164	120
25 x 6 x 12	12	0	Normale	P.N.6	180	180
25 x 15 x 12	12	45	Alleggerito	P.A.4	166*	120
25 x 25 x 10	10	65	Normale	T.N.5	78	60
45 x 25 x 8	8	45	Alleggerito	T.A.3	75	60
25 x 25 x 8	8	70	Normale	T.N.3	39	30
25 x 12 x 6	6	0	Normale	P.N.5	60	60

L'individuazione di alcuni aspetti del comportamento delle pareti soggette al fuoco ha permesso alcune considerazioni: il valore di resistenza al fuoco è dipeso esclusivamente dal parametro I (isolamento); indipendentemente dal valore REI raggiunto e quindi dal tipo di elementi resistenti utilizzati, tutte le pareti hanno conservato la loro stabilità R e non hanno presentato fenomeni di passaggio di vapori o fumi verso l'esterno (tenuta E). In funzione dello spessore delle pareti provate e dei valori ottenuti sono stati distinti 3 diversi tipi di comportamento al fuoco:

- Tipo A occorre in pareti a bassa inerzia termica utilizzando elementi in laterizio normale con spessore di 6-8-10 cm. La curva di andamento della temperatura sul lato non esposto può essere idealmente suddivisa in due parti: un primo tratto orizzontale (variabile da 15 a 30 minuti), in cui la parete mostra la sua scarsa inerzia termica a seguito dell'aumento della temperatura del forno; un secondo

tratto in cui la temperatura aumenta in modo più o meno lineare (Figura 3.3 - Curva A). Il valore REI è determinato dal superamento della temperatura media di 150 °C sul lato non esposto della parete. Il tempo di resistenza può essere stimato nell'ordine di 30-60 minuti. Occorre ricordare che il termine inerzia termica definisce l'effetto combinato di massa, calore specifico e conducibilità termica e che tale inerzia ha un ruolo fondamentale durante una prova al fuoco, soprattutto su pareti di spessore limitato (ad esempio su tramezzature).

- Tipo B occorre in pareti a media inerzia termica, più pesanti delle tradizionali tramezzature, ma con spessore, piuttosto contenuto, variabile tra i 12-14-17 cm. In questo caso, la curva della temperatura, sul lato non esposto, presenta un andamento che può essere schematizzato con un primo tratto orizzontale (poco più lungo di quello della curva A) durante il quale il calore fornito dal forno viene immagazzinato dalla parete senza che si rilevi un aumento apprezzabile della temperatura sulla faccia esposta; un secondo tratto, più o meno orizzontale, durante la quale, in corrispondenza di una temperatura di circa 100 °C, si verifica il fenomeno di evaporazione dell'acqua contenuta nel manufatto a seguito dell'aumento del calore sulla parete (Figura 3.3 - Curva B); tale fenomeno ha una durata compresa tra 15 e 30 minuti circa ed essicca completamente il campione. In questo caso la resistenza raggiunta in corrispondenza del superamento della temperatura media di 150 °C è di circa 120 minuti.
- Tipo C occorre in pareti ad alta inerzia termica utilizzando laterizi con spessore superiore a 17 cm. Similmente agli altri due tipi, la curva di riscaldamento della faccia non esposta presenta un primo tratto orizzontale che dipende dall'inerzia termica offerta dalla parete, in questo caso di durata variabile tra 45 e 60 minuti circa; un secondo tratto, anch'esso orizzontale, relativo al momento in cui si manifesta l'evaporazione dell'acqua contenuta nel manufatto, a una temperatura di 100 °C, di durata variabile; infine, un terzo tratto, durante il quale ad un aumento della temperatura del forno corrisponde un aumento della temperatura sulla faccia non esposta; tale regime di temperatura può, pertanto, essere considerato stazionario (Figura 3.3 - Curva C). La caratteristica REI rilevata nel corso delle prove è superiore a 180 minuti.

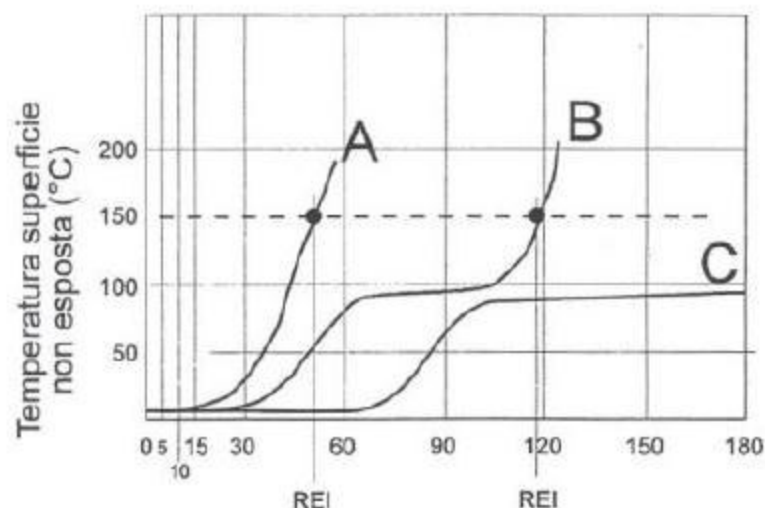


Figura 3.3: Andamento della temperatura sulla faccia non esposta nel caso di prova al fuoco su pareti in laterizio (Centro studi ed esperienze antincendi Roma-Capannelle)

Dall'analisi dei risultati delle prove sperimentali è emerso che il valore di REI dipende, oltre che dallo spessore della parete, dall'inerzia termica della stessa.

Per valutare il tempo di resistenza al fuoco, le massime temperature sopportate, e l'andamento delle deformazioni sotto incendio si utilizza generalmente un modello piano della sezione muraria; pertanto, il caso di muro sottoposto a carico d'incendio su uno solo dei suoi lati è riconducibile a quello di una colonna caricata lateralmente, soggetta al peso proprio ed eventualmente ad un carico assiale, in cui i parametri che governano lo spostamento sotto un dato carico sono le caratteristiche geometriche, le condizioni di vincolo e l'eccentricità del carico. L'inflessione fuori dal piano verso la sorgente di calore dovuta all'espansione termica della superficie esposta dà origine al fenomeno deformativo chiamato in letteratura *thermal bowing* (Figura 3.4).

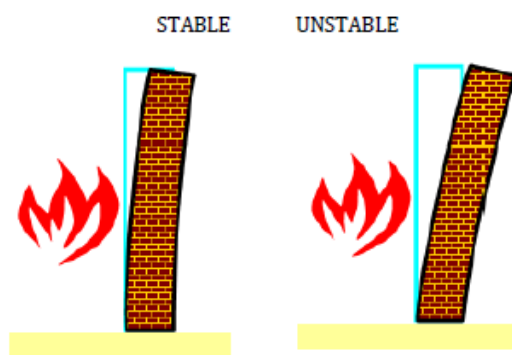


Figura 3.4: Fenomeno del Thermal Bowing (Elia, 2013).

Sull'entità di tale fenomeno sono presenti pochi dati in letteratura (Dhanasekar, Chandrasekaran, & Grubits, 1994), poiché i protocolli standard non prescrivono la misurazione degli spostamenti durante l'esecuzione della prova al fuoco; tuttavia,

l'ultima edizione dell'Eurocodice 6 prevede la possibilità d'introdurre nel progetto, su richiesta del committente, criteri di resistenza che prendano in considerazione la deformazione sotto incendio accanto a quelli consueti di stabilità, tenuta e isolamento (CEN/TC 250 2005b).

In letteratura, le ricerche teoriche e teorico-sperimentali per la muratura sono al momento esigue e riconducibili a ricerche svolte prevalentemente in Regno Unito e Australia. All'interno di tali studi è da segnalare quello di (Gnanakrishnan & Lawther, 1990), i quali analizzando le ricerche disponibili in letteratura hanno riassunto, nel caso di murature a singolo paramento le seguenti conclusioni:

- La capacità di isolamento è direttamente proporzionale all'idratazione della muratura allo spessore equivalente degli elementi impiegati (ottenuto dal prodotto dello spessore effettivo per la frazione volumetrica dei pieni) tuttavia, la presenza dei vuoti introduce discontinuità nella conduzione del calore; le murature di elementi con alte proprietà isolanti possono, pertanto, giungere alla crisi di isolamento per effetto delle caratteristiche del giunto di malta;
- La crisi per perdita di tenuta riguarda soprattutto le murature in elementi cementizi, a causa dell'entità del ritiro che si manifesta oltre i 150°C, sebbene anche i blocchi forati in laterizio siano sensibili alla perdita di tenuta poiché manifestano una tendenza allo spalling. È da sottolineare, inoltre, le condizioni al contorno imposte nelle prove standard rendono difficile il manifestarsi della crisi di tenuta prima della crisi di isolamento (l'intelaiatura semirigida esercita un'azione di contenimento);
- In condizioni di alte temperature, le murature portanti non incontrano in genere la crisi per compressione; è, bensì, lo spostamento orizzontale dovuto al *thermal bowing* a rendere probabile la crisi per instabilità, difatti, il collasso avviene generalmente quando lo spostamento massimo in mezzzeria raggiunge circa l'80% dello spessore.

Alcuni anni più tardi, studi sperimentali condotti da Nadjai et al. hanno cercato di fare luce sull'influenza del livello di carico e del deterioramento delle proprietà meccaniche sulle modalità di collasso della muratura portante sotto l'azione delle alte temperature, svolgendo prove su elementi portanti di blocchi di calcestruzzo pieni e malta cementizia (Nadjai, O'Garra, Ali, & Lavery, 2003). In particolare, sono stati testati due muri, realizzati in scala 1:2 con un'altezza di 133 cm e uno spessore di 5 cm, a cui sono stati

applicati diversi livelli di carico. I campioni sono stati realizzati con blocchi in calcestruzzo di resistenza a rottura pari a 20 MPa. Alle estremità dei campioni, la presenza di due piastre in acciaio ha garantito l'uniforme distribuzione del carico assiale verticale applicato (Figura 3.5).

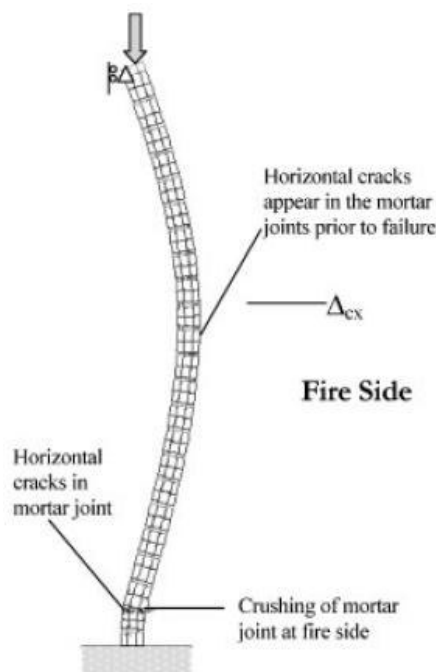


Figura 3.5: *Modalità di Rottura Muro (Deformata amplificata di un fattore pari a 4,0) (Nadjai, O'Garra, Ali, & Laverty, 2003).*

Dai risultati è emerso che all'aumentare del livello di carico, diminuisce la deformazione termica e si rileva una crescita lenta degli spostamenti orizzontali al crescere della temperatura; il deterioramento meccanico indotto dall'alta temperatura sul lato esposto al fuoco può, quindi, determinare l'eccentricità del carico verso il lato esposto, giungendo a provocare una significativa parzializzazione della sezione resistente.

Altri studi sperimentali (Al Nahhas, Ami Saada, Bonnet, & Delmotte, 2007) hanno dimostrato che per la muratura in blocchi forati portanti in calcestruzzo, gli spostamenti verticali e orizzontali presentano un tratto costante, analogo all'andamento della temperatura, in corrispondenza dello sviluppo completo del cambiamento di fase dell'acqua contenuta nella muratura (Figura 3.6). Le prove sono state condotte su muri di 2,82 m di altezza e 19,7 cm di spessore, costituiti da blocchi forati in calcestruzzo. I campioni sono stati testati in una fornace verticale nella alla temperatura è stato fatto seguire l'andamento dettato dalla curva d'incendio standard (ISO834).

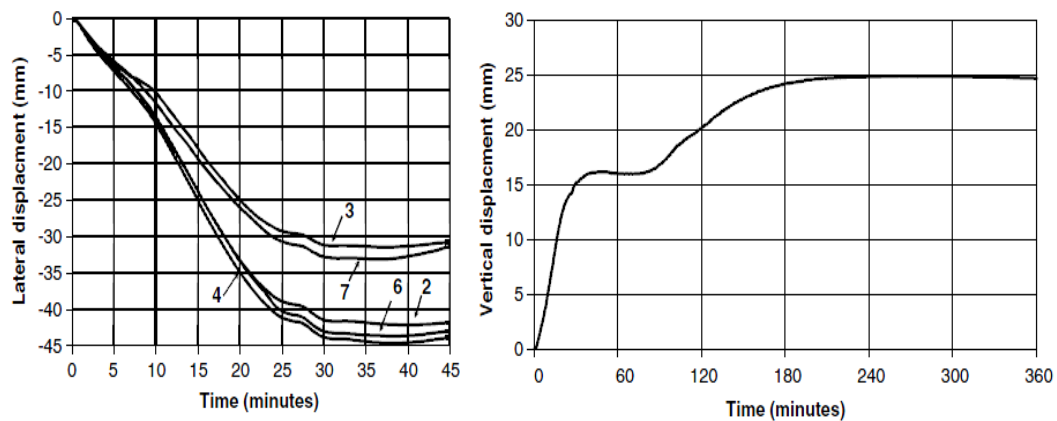


Figura 3.6: *Spostamenti Orizzontali e Lateralali in funzione del Tempo d'Incendio (Al Nahhas, Ami Saada, Bonnet, & Delmotte, 2007).*

Oltre all'andamento degli spostamenti verticali e laterali subiti dal campione nel tempo, gli autori hanno anche osservato che modelli semplici basati sulla trasmissione del calore per conduzione, convezione e irraggiamento forniscono risultati affidabili senza ricorrere alla modellazione accurata dei processi igrometrici relativi alla migrazione dell'acqua allo stato liquido all'interno della struttura porosa dei materiali. L'effetto dell'evaporazione può essere efficacemente preso in considerazione, in sede di analisi numerica, implementando la variazione del calore specifico secondo la temperatura (Nguyen, Meftah, Chammas, & Mebarki, 2009).

Oltre alle summenzionate ricerche sperimentali, sono stati sviluppati alcuni modelli numerici. È opportuno menzionare gli studi di Cooke et al. (1996) sul comportamento delle murature sottoposte all'azione del fuoco, riferiti ad una sezione verticale dell'elemento murario con blocchi di calcestruzzo (Cooke, Virdi, & Jeyarupalingam, 1996). Gli autori rappresentano una colonna di materiale omogeneo, implementando la legge costitutiva, parabolica a compressione e bilineare a trazione, tipicamente usata per il calcestruzzo sottoposto alle alte temperature (CEN/TC 250 2004), e assumono proprietà meccaniche e coefficiente di espansione termica costanti nella temperatura. Assumendo come parametro di analisi lo spessore del pannello murario, gli autori osservano delle discordanze in termini di *thermal bowing* tra i risultati sperimentali e le analisi numeriche. I succitati Gnanakrishnan e Lawther hanno proposto un modello agli elementi finiti nel quale i materiali componenti sono rappresentati separatamente mediante elementi in stato piano di deformazione (Gnanakrishnan & Lawther, 1990). Il calcolo degli spostamenti dovuti all'azione del carico e delle alte temperature avviene per successivi input della distribuzione istantanea delle temperature determinata sperimentalmente. Nel modello proposto, non si tiene conto del comportamento non lineare dei materiali e l'introduzione

della dipendenza dalla temperatura su base sperimentale è limitata ai coefficienti di espansione termica, mentre per le proprietà meccaniche è tenuta in conto mediante fattori di riduzione, derivati dai modelli di decadimento allora disponibili, basati sulle ricerche di Anderberg e Thelandersson (1976) relativi ai materiali cementizi.

Oltre alla produzione di dati empirici nelle prove di resistenza al fuoco, e alla loro sistematizzazione nelle tabelle prescrittive degli spessori minimi per classe di resistenza, sono state elaborate formulazioni di calcolo della resistenza al fuoco. Questi metodi hanno lo scopo di fornire strumenti utili a evitare o limitare i costi della valutazione sperimentale, e a superare, ove necessario, i limiti della classificazione tabellare, la quale spesso non può rendere conto della resistenza al fuoco di spessori murari composti da diversi strati eterogenei o con intercapedine. Ad esempio, le norme statunitensi avallano un metodo di calcolo elaborato in base ai risultati di prove standard, basato sulla seguente formulazione (BIA, 2008):

$$R = (c \cdot V)^n$$

Nella quale R rappresenta il tempo in ore di resistenza al fuoco, V il volume effettivo (al netto della foratura) per unità di superficie, c un coefficiente dipendente da materiale, apparecchiatura muraria, e unità di misura, n un parametro che dipende dal tasso di crescita della temperatura sulla superficie esposta. Tale formulazione può essere considerata valida nel caso di muratura composta da un unico strato; se, invece, essa risulta composta da più strati, la relazione è adattata nel seguente modo:

$$R = \left(\sum_{j=1}^i c_j V_j \right)^n = \left(\sum_{j=1}^i R_j^{1/n} \right)^n$$

Dove j rappresenta il j -esimo strato di materiale e i è il numero totale di strati.

3.4.1 Proprietà Dipendenti dalla Temperatura.

L'affidabilità dei risultati delle indagini sperimentali e delle elaborazioni numeriche dipende dalla preliminare considerazione di determinati fattori quali il comportamento non lineare dei materiali a fronte dell'aumento della temperatura. Nel caso di analisi termiche sulla muratura, pertanto, occorre prendere in considerazione sia l'andamento delle proprietà meccaniche sia la variazione delle proprietà termiche come la conducibilità e il calore specifico.

Alla base del deterioramento meccanico, in funzione della temperatura, vi sono fenomeni fisici e chimici che si verificano nei materiali sottoposti al carico termico elevato; tali

fenomeni, sono stati indagati in maniera particolare per il calcestruzzo ed i materiali a base cementizia, a causa della necessità di individuare soluzioni per limitare il deterioramento delle proprietà meccaniche e prevenire i fenomeni di improvviso distacco locale degli strati superficiali degli elementi strutturali esposti alle alte temperature (Tabella 3.5).

Tabella 3.5: *Processi fisico-chimici nel calcestruzzo a base di cemento Portland (Khoury, 2000).*

Temperatura (°C)	Fenomeni
100	Inizio della perdita di idratazione Incremento dell'inerzia termica
300-400	Dissociazione dell'idrossido di calcio (calce) Punto triplo dell'acqua Disidratazione di alcuni tipi di inerti Inizio della perdita di resistenza meccanica Possibile manifestazione di spalling esplosivo
573	Inversione espansiva del quarzo α in quarzo β Forte incremento del creep Il materiale inizia a diventare strutturalmente inefficiente
700	Dissociazione del carbonato di calcio
800	Disidratazione completa del materiale
1200-1400	Fusione del materiale

Per quanto attiene le proprietà meccaniche si può far ricorso a sperimentazioni dirette o attingere da dati disponibili di affidabilità comprovata. Invece, per le proprietà termiche, consiste nell'assumere i valori riportati nell'allegato D dell'Eurocodice 6, inerente ai metodi di calcolo avanzati (CEN/TC 250, 2005b), nel quale si possono reperire in funzione della temperatura di conducibilità termica, calore specifico, deformazione termica e legame sforzo-deformazione di blocchi di laterizio e calcestruzzo.

Per quanto riguarda la densità dei materiali, la norma in questione assume che essa sia indipendente dalla temperatura. In tale allegato si può reperire, inoltre, il grafico deformazione termica- temperatura ed il legame σ - ϵ dipendente dalla temperatura per i laterizi caratterizzati da densità $\rho = 900\sim1200 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 12\sim20 \text{ MPa}$ (Figura 3.7, Figura 3.8), densità $\rho = 600\sim1000 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 4\sim6 \text{ MPa}$ (Figura 3.9, Figura 3.10); densità $\rho = 1600\sim2000 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 12\sim20 \text{ MPa}$ (Figura 3.11, Figura 3.12) nonché i valori di conducibilità termica λ_a , capacità termica specifica c_a , al variare della densità $\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$ dei laterizi; per questi ultimi, riportati di seguito in Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15,

il termine (1) indica il rapporto tra la tensione σ corrente e la resistenza a compressione f_c .

Al contrario, per quanto riguarda la densità dei materiali, la norma in questione assume che essa sia indipendente dalla temperatura.

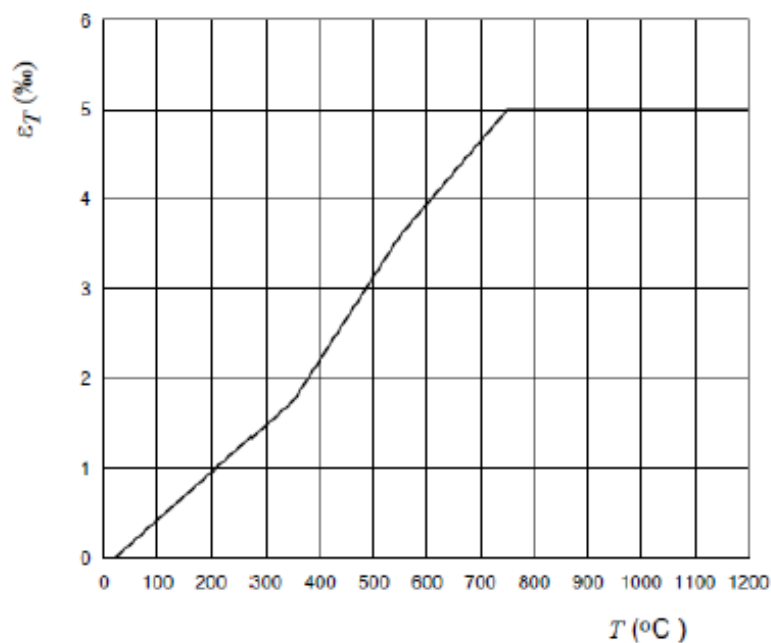


Figura 3.7: EN1996-1-2:2005; grafico deformazione termica - temperatura per laterizi con densità $\rho = 900\sim1200 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 12\sim20 \text{ MPa}$.

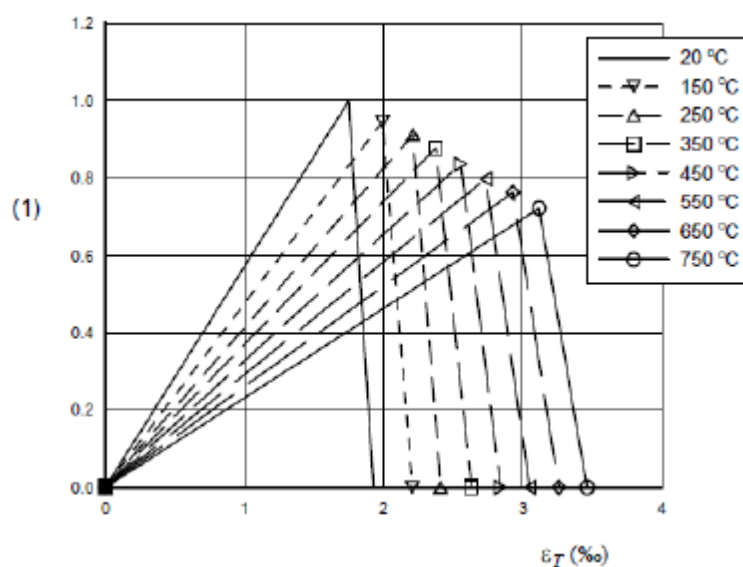


Figura 3.8: EN1996-1-2:2005; legame σ - ε dipendente dalla temperatura per laterizi con densità $\rho = 900\sim1200 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 12\sim20 \text{ MPa}$.

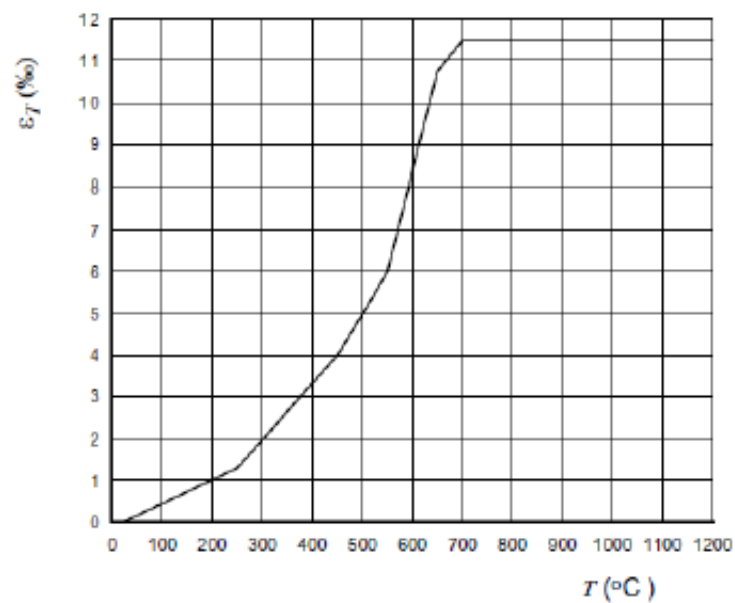


Figura 3.9: EN1996-1-2:2005; grafico deformazione termica - temperatura per laterizi con densità $\rho = 1600\sim2000 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 12\sim20 \text{ MPa}$.

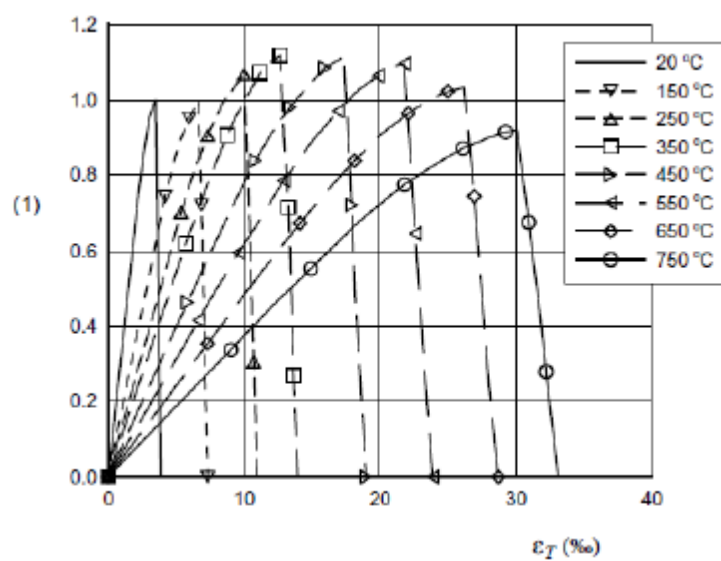


Figura 3.10: EN1996-1-2:2005; legame σ - ε dipendente dalla temperatura per laterizi con densità $\rho = 1600\sim 2000 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 12\sim 20 \text{ MPa}$.

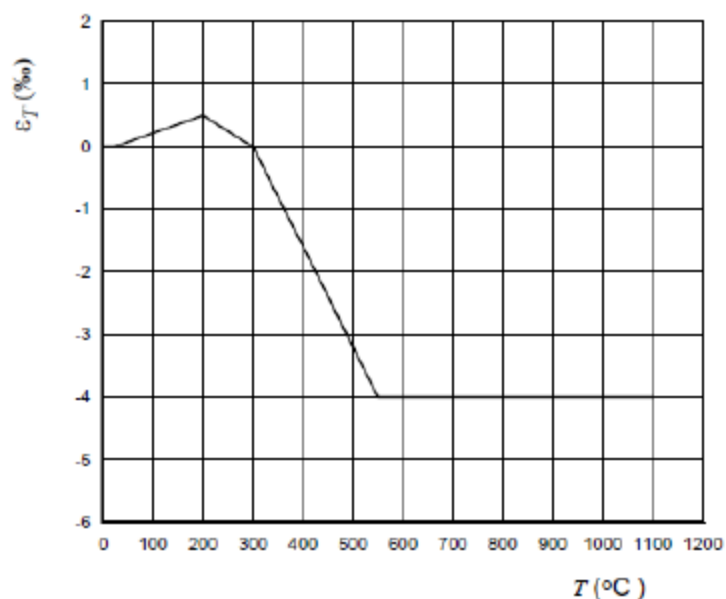


Figura 3.11: EN1996-1-2:2005; grafico deformazione termica - temperatura per laterizi con densità $\rho = 600\sim 1000 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 4\sim 6 \text{ MPa}$.

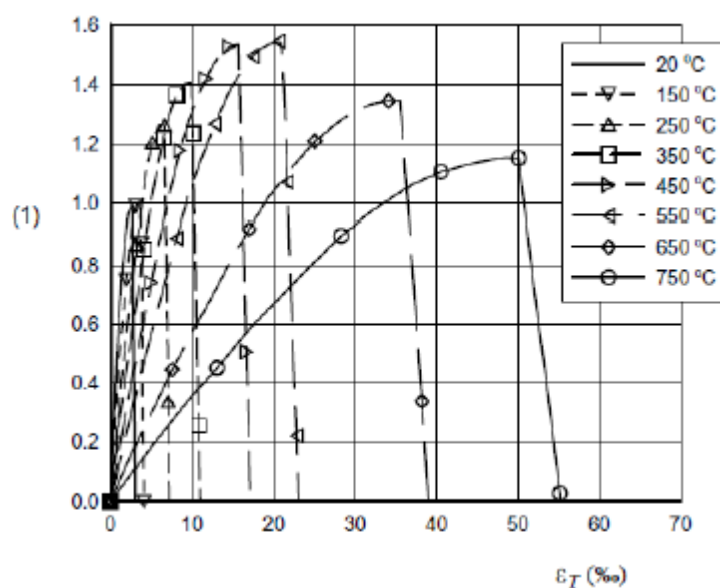


Figura 3.12: EN1996-1-2:2005; legame σ - ε dipendente dalla temperatura per laterizi con densità $\rho = 600\sim 1000 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 4\sim 6 \text{ MPa}$.

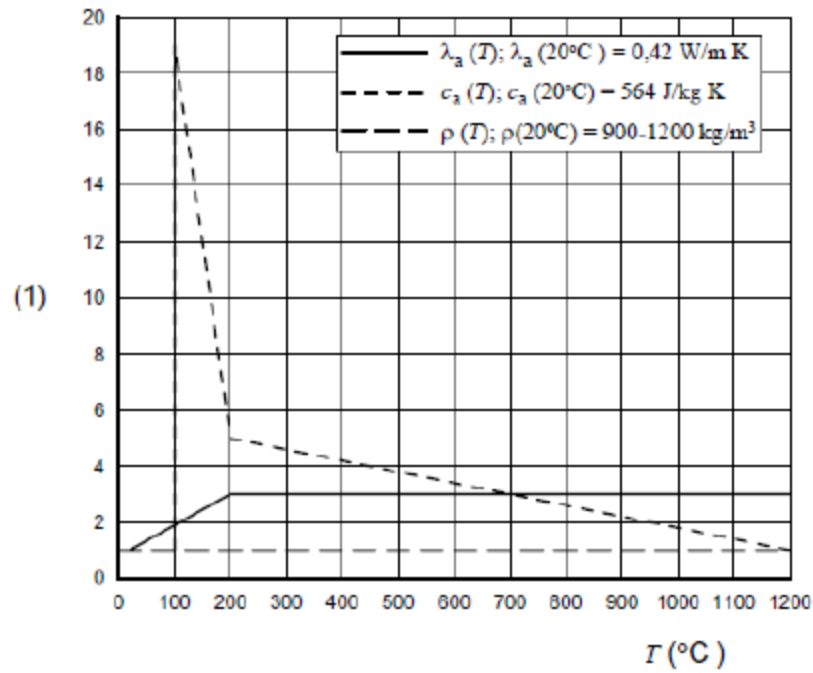


Figura 3.13: EN1996-1-2:2005; proprietà termiche laterizi (con $\rho = 900\sim1200 \text{ kg/m}^3$ e resistenza a compressione $f_c = 12\sim20 \text{ MPa}$): blocchi di argilla. Conducibilità (λ_a), Calore Specifico (c_a).

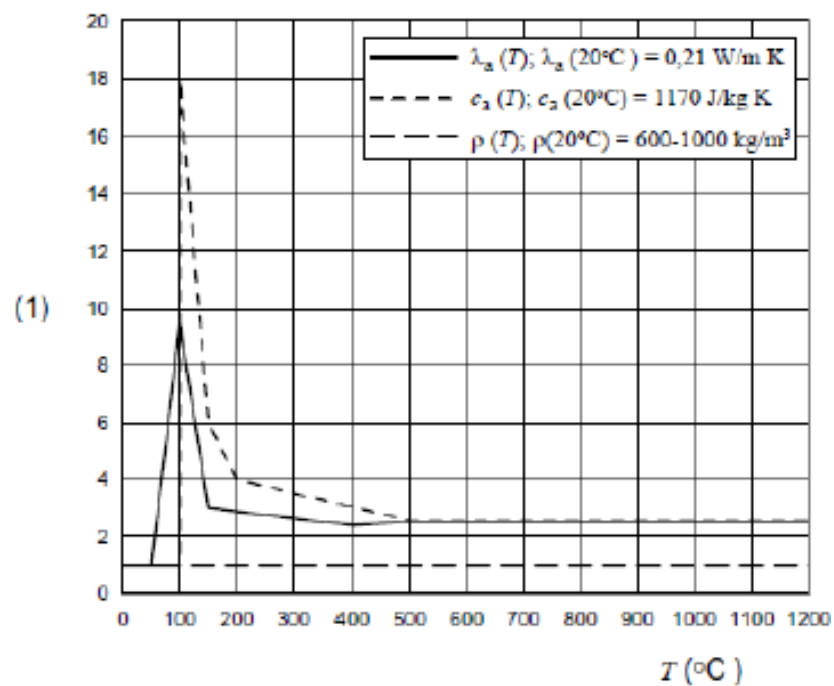


Figura 3.14: EN1996-1-2:2005; proprietà termiche laterizi (con densità $\rho = 600\sim1000 \text{ kg/m}^3$): blocchi di calcestruzzo alleggerito. Conducibilità (λ_a), Calore Specifico (c_a).

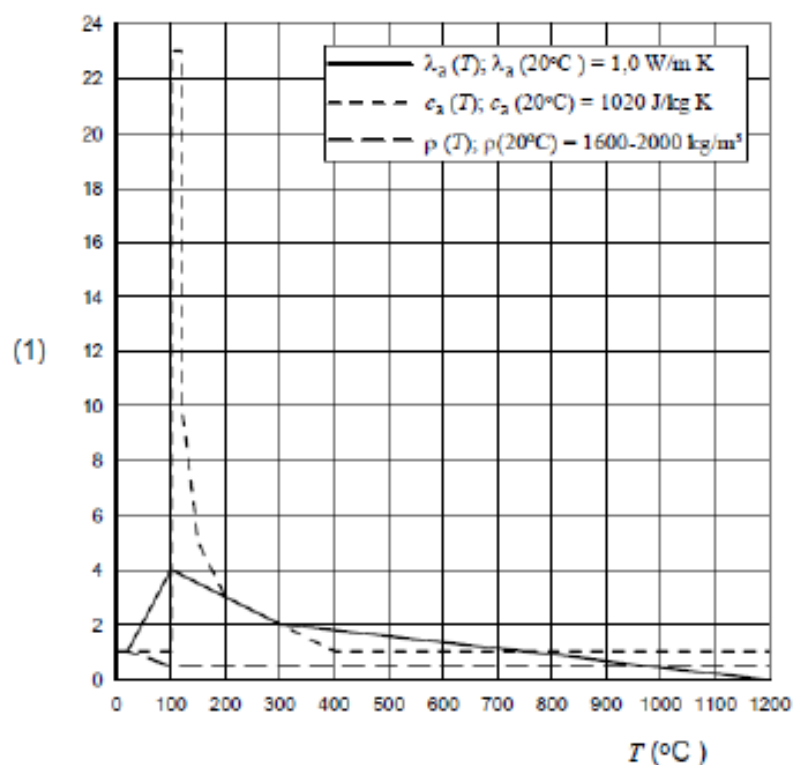


Figura 3.15: EN1996-1-2:2005; proprietà termiche laterizi (con densità $\rho = 1600\sim 2000 \text{ kg/m}^3$): blocchi di silicato di calcio. Conducibilità (λ_a), Calore Specifico (c_a).

Dalla Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15 si evince che, per quanto attiene il calore specifico, nel caso di calcestruzzo leggero e laterizio, si denota una netta influenza dell'evaporazione del contenuto d'acqua sull'andamento di tale proprietà in funzione della temperatura. Invece, per quanto concerne l'andamento della conducibilità termica del laterizio rispetto alla temperatura si rileva un aumento iniziale seguito da una brusca diminuzione del parametro intorno ai 100 $^{\circ}\text{C}$, cui segue poi una ripresa costante (Harmathy, 1961). Occorre menzionare l'influenza dell'inclusione dei vuoti nella conducibilità termica dei laterizi forati, la quale è costante sino a circa 300 $^{\circ}\text{C}$ e in seguito diminuisce rapidamente; tuttavia, a valori termici molto elevati, l'influenza della radiazione attraverso i vuoti induce una ripresa (Nguyen, Meftah, Chammas, & Mebarki, 2009). Nel caso dei mattoni, invece, l'Eurocodice 6 riporta valori crescenti sino a tre volte il valore iniziale a 200 $^{\circ}\text{C}$ ed in seguito costanti (Figura 3.13).

La conducibilità termica dei diversi tipi di calcestruzzo non ha tendenza univoca all'aumentare della temperatura. Studi condotti da Abrams (1979) riportano dei range di variabilità di detta proprietà per calcestruzzi normali e alleggeriti. Inoltre, i risultati ottenuti dagli autori per il calcestruzzo con inerti granitici indicano un decadimento del parametro non reversibile con il ritorno della temperatura a valori normali (Abrams, 1979). Studi più recenti inerenti tale proprietà nella pietra calcarea (travertino) hanno

rilevato una diminuzione della conducibilità termica all'aumentare della temperatura (Cartapati & Gabbianelli, 2002). Quanto descritto è illustrato in Figura 3.16, Figura 3.17, e Figura 3.18.

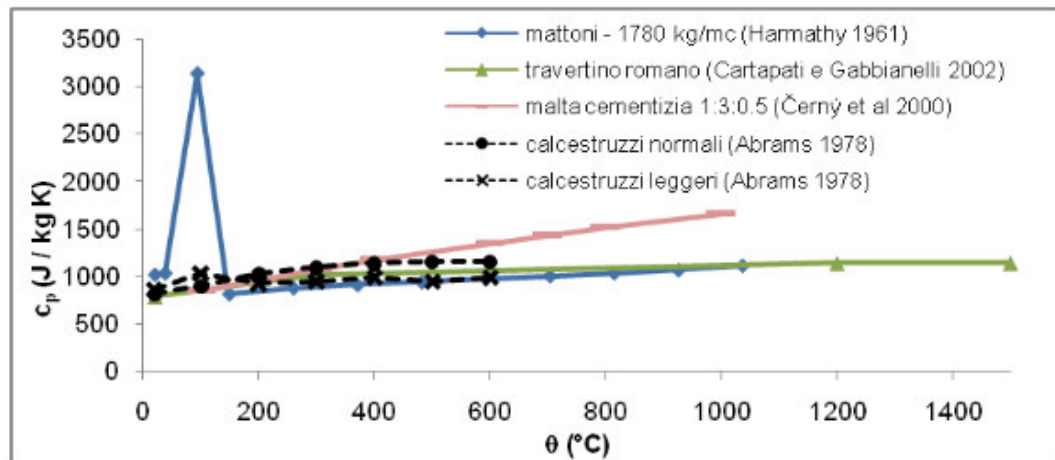


Figura 3.16: Calore Specifico in Funzione della Temperatura (Sciarretta, 2010).

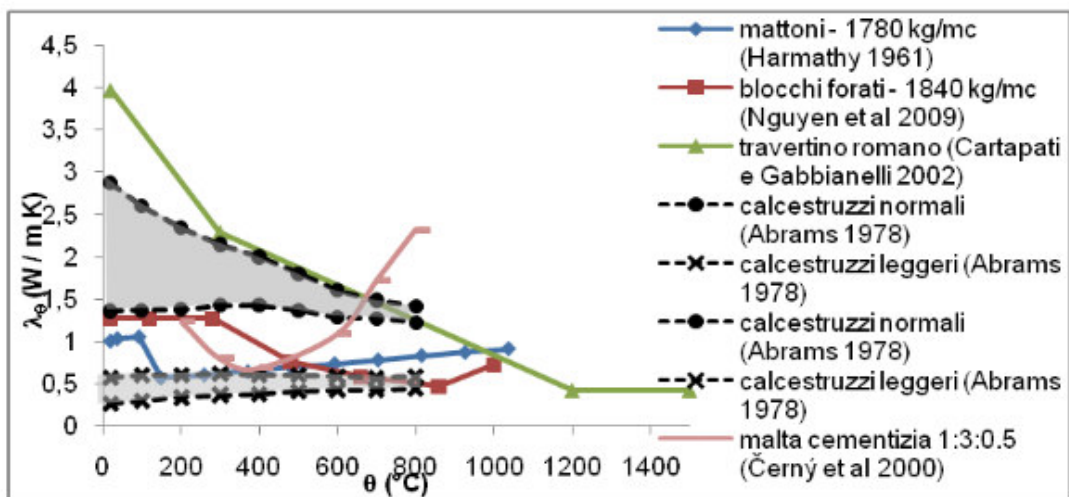


Figura 3.17: Conducibilità Termica in Funzione della Temperatura (Sciarretta, 2010).

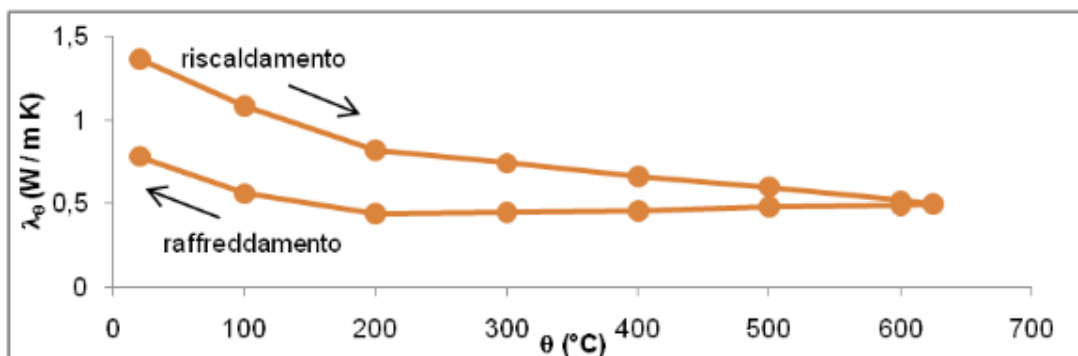


Figura 3.18: Conducibilità termica di un calcestruzzo con inerti granitici sottoposto a riscaldamento e raffreddamento (Sciarretta, 2010).

Ulteriori studi hanno investigato l'espansione termica lineare nei diversi tipi di calcestruzzo. Nella malta a base di cemento Portland, il coefficiente di espansione termica lineare è crescente sino a circa 500°C e in seguito decresce (Černý, et al., 2000; Gnanakrishnan & Lawther, 1990). La deformazione termica del calcestruzzo aumenta con la temperatura in modo generalmente non lineare; gli inerti silicei determinano una crescita più marcata rispetto agli inerti calcarei (Abrams, 1979). Per i blocchi cementizi (Allen & Harmathy, 1973), come per il calcestruzzo normale, la deformazione termica è sensibile alla tipologia d'inerti impiegati: quelli di tipo vulcanico, ad esempio, determinano un coefficiente di espansione termica molto basso talvolta negativo (Gnanakrishnan & Lawther, 1990). Per il calcestruzzo e per la malta cementizia è stata studiata l'influenza del livello di carico su campioni sottoposti ad alte temperature (Anderberg & Thelandersson, 1976; Černý, et al., 2000), rilevando una forte riduzione della deformazione termica al crescere del livello di carico. Per il calcestruzzo, un'espressione approssimata della variazione del coefficiente di espansione termica α con la temperatura θ è la seguente (Lie, 1992):

$$\alpha = (0,008\theta + 6) \cdot 10^{-6}$$

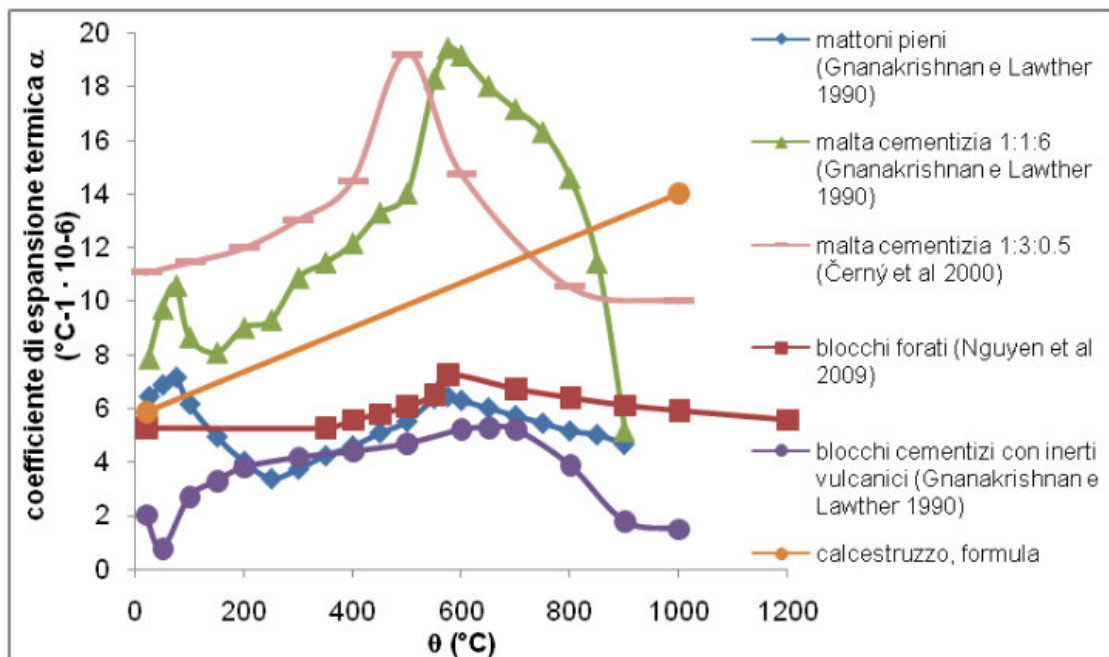


Figura 3.19: Coefficiente di Espansione Termica in funzione della Temperatura (Sciarretta, 2010).

3.4.2 Effetto della Temperatura sulle Proprietà Meccaniche dei Materiali da Costruzione.

Numerosi studi volti all'analisi dell'andamento del modulo elastico dei materiali da costruzione hanno evidenziato un decadimento dello stesso al crescere della temperatura. Nel caso di utilizzo di mattoni (Nguyen, Meftah, Chammas, & Mebarki, 2009), è riscontrabile un aumento della rigidezza che si accentua tra 400 e 750°C, cui segue un rapido decadimento che conduce all'annullamento del modulo elastico, raggiunti i 1000°C. Per quanto riguarda il calcestruzzo, invece, il parametro è soggetto a un calo tendenzialmente esponenziale o lineare al crescere della temperatura (Li & Guo, 1993). Per quanto attiene il coefficiente di Poisson, i vari studi non evidenziano un chiaro comportamento al crescere della temperatura. Di seguito si riportano gli esigui dati a disposizione in base alla tipologia di calcestruzzo.

- Calcestruzzo normale: si nota una diminuzione del coefficiente di Poisson al crescere della temperatura (Cruz, 1961);
- Calcestruzzo ad alte prestazioni: si presenta una diminuzione del coefficiente di Poisson al crescere della temperatura sotto livelli di carico medio - bassi (Xiao, Wang, Xie, & Li, 2003);
- Calcestruzzo ad alta resistenza: si evidenzia un netto aumento del coefficiente di Poisson oltre i 400°C (Wu, Yuan, & Wang, 2000);
- Calcestruzzo rinforzato con fibre d'acciaio: si evidenzia un aumento del coefficiente di Poisson per una temperatura compresa fra 200 e 400°C seguito da una successiva diminuzione (Colombo, Di Prisco, & Felicetti, 2007).

Un'ulteriore proprietà che occorre prendere in considerazione è l'andamento della resistenza a compressione alle alte temperature. Per i laterizi, la norma prescrive un decadimento lineare della resistenza a compressione al crescere della temperatura (Eurocodice6 – vedi Figura 3.7).

Per la malta cementizia è stata osservata una più netta tendenza alla diminuzione rispetto al calcestruzzo, come per il modulo elastico (Fu, Wong, Poon, Tang, & Lin, 2004). La resistenza a compressione nel calcestruzzo normale può presentare un lieve calo iniziale sino a circa 200°C, seguito da una ripresa e dal decadimento definitivo. L'alta variabilità dei risultati è riconducibile alla diversa tipologia d'inerti che influisce sul fenomeno in modo non trascurabile. Le ricerche sperimentali di Abrams evidenziano l'importanza del livello di carico agente durante l'esposizione alle alte temperature: il carico applicato

influisce sul comportamento ad alte temperature ritardando l'inizio del decadimento della resistenza a compressione all'aumentare della temperatura. L'Eurocodice 2 fornisce valori per il coefficiente riduttivo della resistenza a compressione alle alte temperature attraverso due curve relative al tipo di inerti, valide per tassi di riscaldamento standard (CEN TC/250 2004). Alcuni studi (Li & Guo, 1993; Li & Purkiss, 2005) hanno permesso agli autori di determinare delle relazioni per il calcolo della resistenza a compressione. Per quanto concerne le proprietà residue della muratura, uno studio approfondito (Nadjai, O'Garra, Ali, & Lavery, 2003) ha evidenziato la variazione della resistenza del materiale a fronte di un aumento di temperatura. In particolare, sono state considerate delle pareti in muratura caricate e si è osservato come, a seguito dell'aumento di temperatura sono variate le proprietà del materiale. Inoltre, è stata valutata la relazione tra temperatura e snellezza, nonché tra temperatura e condizioni al contorno. Si è fatto riferimento alle tre tipologie di pareti riportate in Figura 3.20:

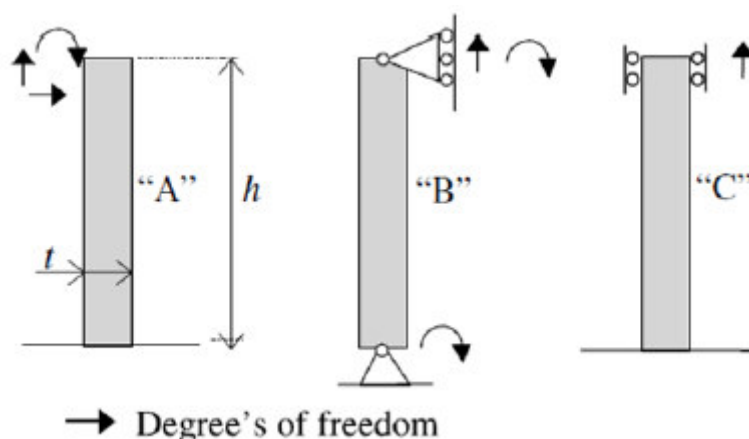


Figura 3.20: Condizioni di Vincolo: Tipologie A, B, C (Nadjai et al., 2003).

In tutti i casi di condizioni al contorno ed eccentricità del carico, la temperatura ultima è diminuita all'aumentare della snellezza. Tuttavia, nella parete di tipo C, non è stato osservato nessun cedimento fino ad una temperatura di 1000°C. In tutte le tipologie di pareti di tipo C, la modalità di crisi verificatasi è attribuibile alla crisi delle proprietà del materiale. Nelle tipologie A e B invece, la modalità di crisi predominante si è verificata per instabilità laterale (carico di punta).

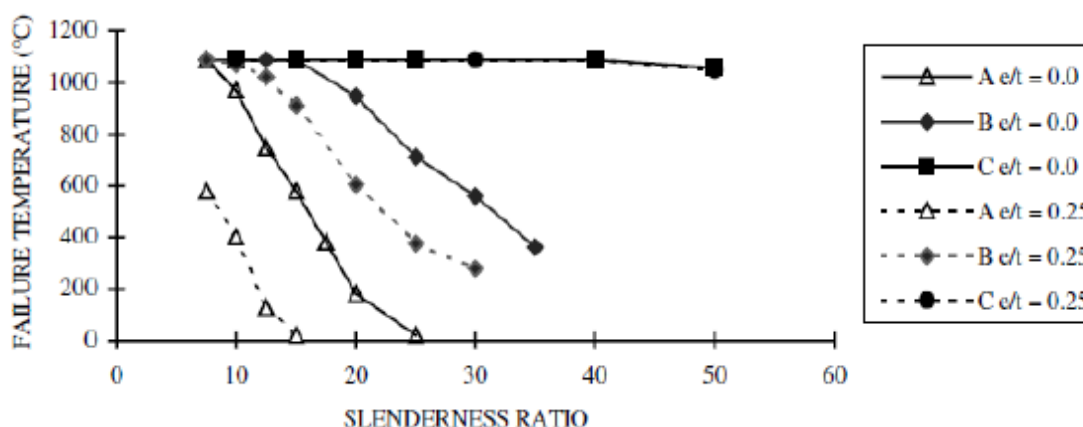


Figura 3.21: *Relazione tra Snellezza - Temperatura Ultima (Nadjai et al., 2003).*

Per quanto riguarda l'effetto delle condizioni al contorno, la tipologia di parete più critica è risultata essere quella A, seguita dalla B, mentre la parete di tipo C ha mantenuto la stabilità strutturale fino ad una temperatura di 1000°C.

Lo studio di Nadjai et al., pertanto, permette di desumere che:

- Il parametro che maggiormente influenza il comportamento al fuoco delle pareti è la snellezza;
- Se il carico eccentrico è spostato principalmente verso il lato della parete esposto al fuoco si hanno tensioni maggiori e minori spostamenti laterali;
- Per la tipologia di parete C, sia il carico sia l'eccentricità rappresentano un effetto trascurabile sulle temperature di crisi, e la crisi non si ottiene fino a quando le proprietà del materiale sono sufficientemente degradate.

Infine, si menziona il fatto che sono stati condotti alcuni studi circa l'influenza del metodo di raffreddamento della muratura sulla resistenza a compressione della stessa una volta che l'incendio si è estinto (Xiao & König, 2004; Husem, 2006; Bingöl & Gül, 2008).

Per quanto concerne, invece, la resistenza a trazione, i dati disponibili in merito al comportamento ad alte temperature riguardano solo il calcestruzzo. L'Eurocodice 2 propone una legge di decadimento lineare della resistenza a trazione, generalmente molto cautelativa rispetto ai dati sperimentali disponibili. Una formulazione semplificata della resistenza a trazione del calcestruzzo in funzione della temperatura è la seguente (Li & Guo, 1993):

$$f_{t,\theta} = (1 - 0,001 \cdot \theta) f_t$$

Nella quale $f_{t,\theta}$ è la resistenza a trazione alla temperatura θ , mentre, f_t è la resistenza a trazione a temperatura ambiente.

Studi condotti da Thelandersson inerenti alla resistenza a trazione cilindrica indicano un decadimento rapido della stessa al crescere della temperatura e una scarsa influenza della velocità di riscaldamento (Thelandersson, 1972). Una legge trilineare basata sugli stessi dati di Thelandersson è stata utilizzata per il decadimento della resistenza a trazione della muratura, agli scopi della modellazione numerica (Nadjai, O'Garra, Ali, & Laverty, 2003).

In Russo et al. (2008), sono riportati dati sperimentali ottenuti su mattoni storici provenienti da un edificio in muratura portante, colpito da un incendio: la struttura è stata esposta per una durata di circa 3 ore alle alte temperature che hanno avuto un massimo di circa 1000°C. Una volta estinto l'incendio, sono stati prelevati campioni, da usare per prove di compressione a temperatura ambiente, di due tipologie: esposti direttamente alle fiamme ed esposti indirettamente alle fiamme. Il grafico di seguito riportato (Figura 3.22) presenta i risultati sperimentali tensione-deformazione dei mattoni e dei prismi di muratura analizzati.

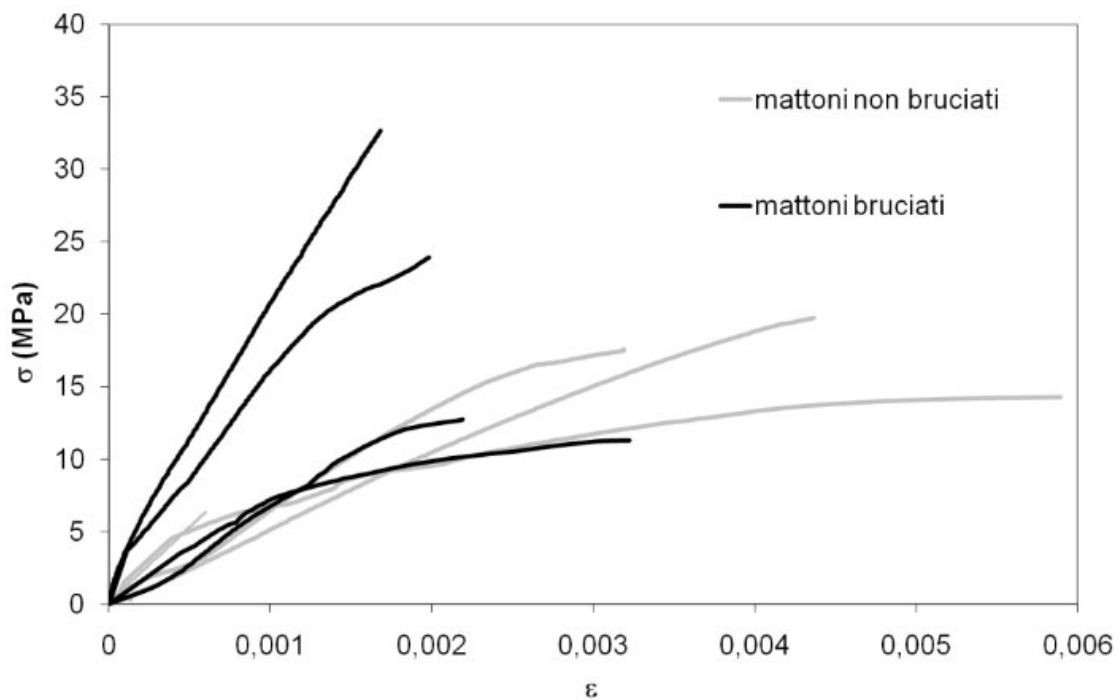


Figura 3.22: *Diagramma Sforzo-Deformazione di Mattoni Prelevati da una Struttura Storica Soggetta ad Incendio (Russo et al. 2008)*

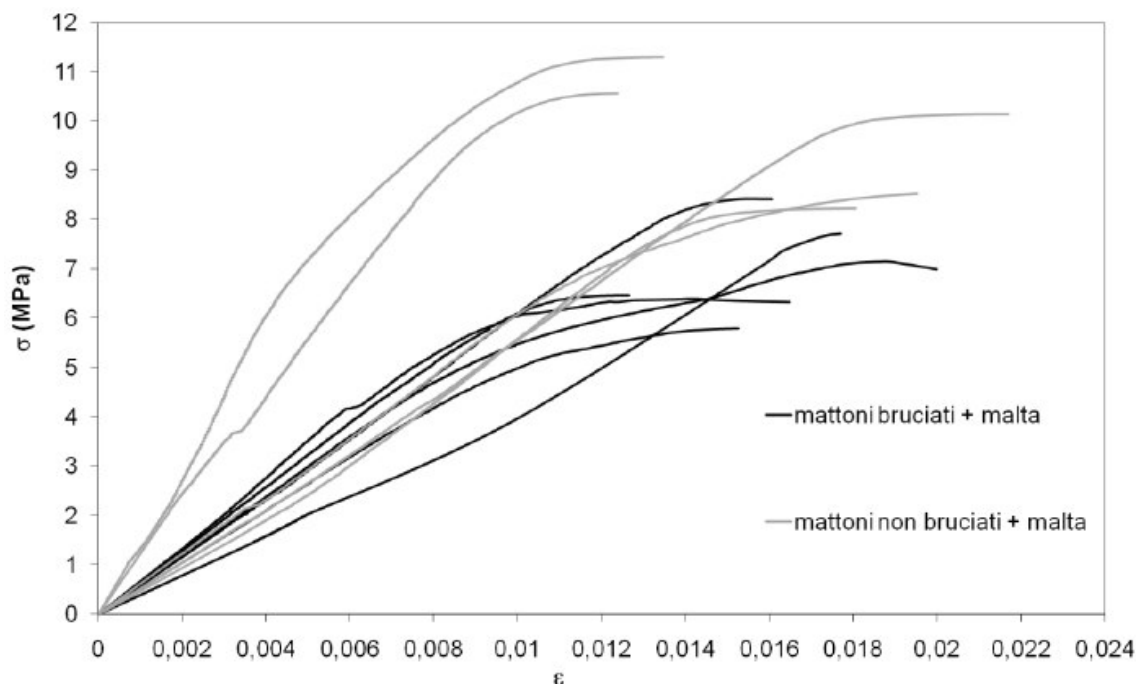


Figura 3.23: *Diagramma Sforzo-Deformazione di Pile di Muratura assemblate con Malta e Mattoni prelevati da una Struttura Storica soggetta ad Incendio (Russo et al. 2008)*

Le prove a compressione eseguite su campioni di mattoni indicano, quindi, che le alte temperature, con esposizione diretta alle fiamme, provocano un aumento del modulo elastico e della resistenza a compressione, nonché una diminuzione della deformazione ultima a compressione. Queste prove, effettuate su prismi di muratura assemblati con mattoni danneggiati e non danneggiati dal fuoco, ugualmente provenienti dal sito, e con malta preparata in laboratorio, indicano una resistenza a compressione leggermente inferiore della muratura danneggiata.

In un recente studio condotto in Italia (Andreini & Sassu, 2011), si è valutato il comportamento meccanico di pannelli in muratura sotto l'azione del fuoco. L'analisi termica è stata condotta considerando una parete di altezza h , spessore t e profondità unitaria, sottoposta ad una fonte di calore che agisce su un solo lato. L'azione termica convettiva e l'irraggiamento sono stati calcolati secondo quanto riportato nella Norma EN 1991-1-2, considerando come temperatura dei gas prodotti dal fuoco quella ottenuta dall'espressione della curva tempo - temperatura nominale. Il coefficiente di trasmissione del calore per convezione è stato considerato pari a 25 come da Norma, per l'emissività relativa ad un compartimento del fuoco si è considerato $\epsilon_f=1$, per l'emissività relativa alla superficie del materiale si è considerato $\epsilon_m=0,8$. La temperatura iniziale è stata assunta

pari a 20°C, mentre la parete non esposta è stata caricata con un flusso termico convettivo pari a 4 W/m²K.

Le funzioni per il calore specifico c_a in funzione della temperatura (T) e la conducibilità termica λ_a (T) sono stati redatti dall' Appendice D della EN1996-1-2 considerando il caso di mattoni di argilla con densità pari a 1000kg/m³ e calcestruzzo con densità pari a 800 kg/m³.

I risultati di tali analisi sono riportati in Figura 3.24 e Figura 3.25, ivi compreso un confronto tra temperatura e spessore per i vari tempi di esposizione al fuoco.

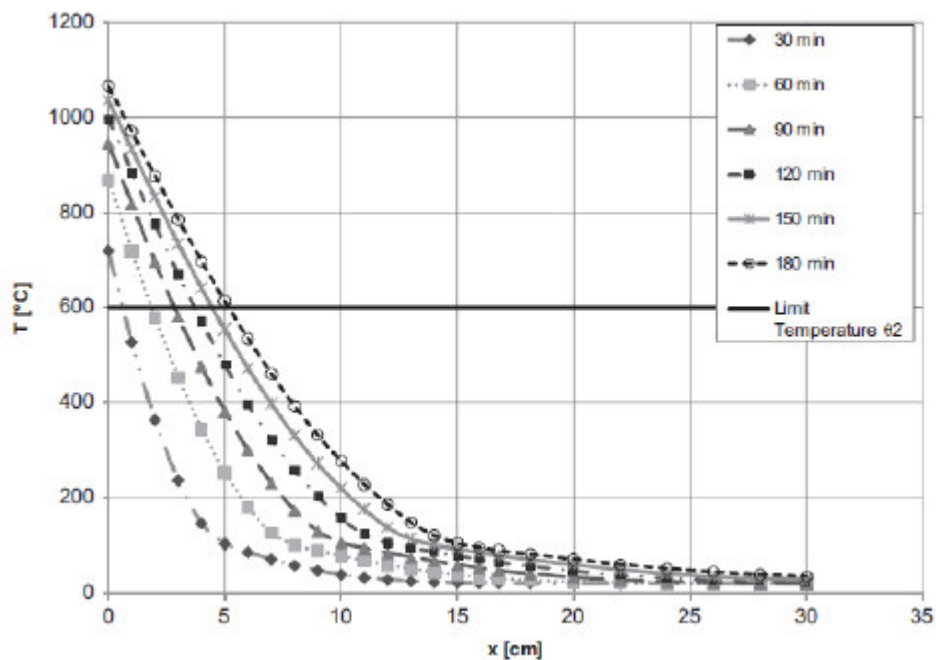


Figura 3.24: Profilo di Temperatura per i diversi Tempi di Esposizione (mattoni d'argilla). Il valore di θ_2 (Temperatura d'Inefficacia) è indicato in 600 °C, secondo l'Appendice C della EN1996-1-2 (Andreini & Sassu 2011).

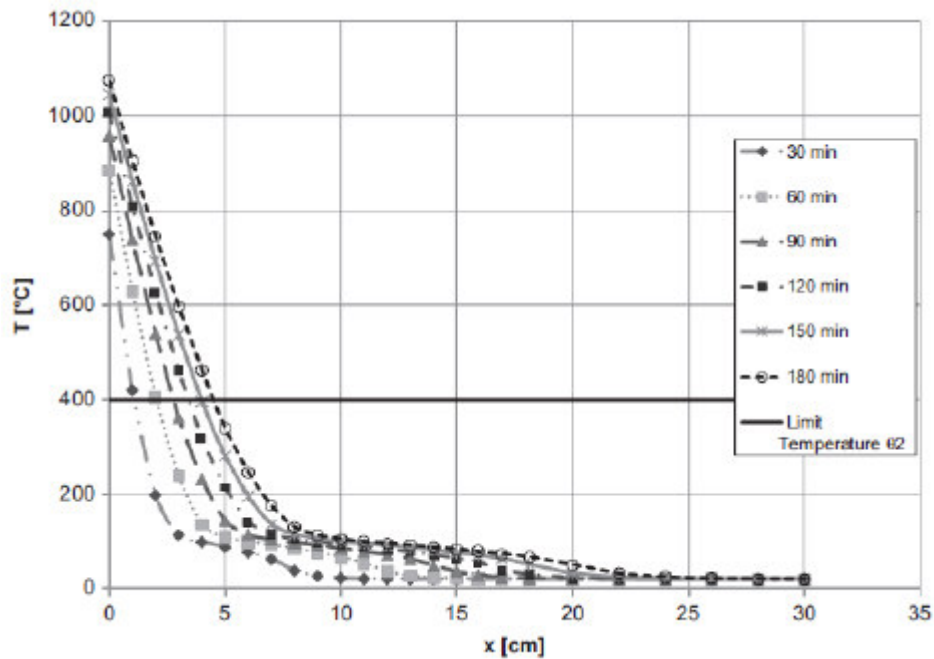


Figura 3.25: *Profilo di Temperatura per i diversi Tempi di Esposizione (mattoni in calcestruzzo alleggerito). Il valore di θ_2 (Temperatura d'Inefficacia) è indicato in 400 °C, secondo l'Appendice C della EN1996-1-2 (Andreini & Sassu 2011).*

Per entrambe le tipologie di mattoni, dopo 180 minuti, è stato osservato che lo spessore minimo interessata a fenomeni termici è circa pari a 5 cm. In altre parole, nell'arco di tempo della prova, lo spessore resistente, inteso come quello che non raggiunge la temperatura di inefficacia passa da 30 cm a 25 cm.

3.5 Le Volte in Muratura.

La volta rappresenta una delle tipologie fondamentali di copertura architettonica per realizzare ambienti chiusi o in parte aperti. Da un punto di vista strutturale, il concetto di volta è strettamente correlato a quello di arco; staticamente, infatti, esse possono considerarsi come una successione di archi elementari, di cui il peso e la spinta sono assorbiti da altri elementi strutturali.

Gli elementi verticali che sostengono le volte possono essere di diverse tipologie a seconda del tipo di volta (setti portanti, pilastri, ecc.). La genesi geometrica e costruttiva delle volte si basa su operazioni di traslazione, rotazione o rivoluzione degli archi; il piano che divide gli elementi portanti verticali dalla superficie voltata è detto piano d'imposta, mentre, il punto (o i punti) o le generatrici appartenenti alla volta e giacenti alla massima quota sono detti elementi di chiave. La geometria di una volta varia a seconda del tipo di superficie geometrica di cui essa è costituita.

Le tipologie di volte esistenti, che prendono il loro nome in base alla geometria della copertura che le caratterizza, sono: volte a “botte”, volte a “crociera”, volte a “spigolo”, volte a “squadro”, volte a “padiglione”, volte a “vela”, volte a “schifo” e volte a “costoloni”; di seguito si descrivono alcune di queste tipologie.

3.5.1 Volta a Botte.

Da un punto di vista geometrico e costruttivo, tra le varie tipologie, la volta a botte è la più semplice nonché, con molta probabilità, il primo esempio di copertura in pietra di ambienti abitativi (Figura 3.26); inoltre, la sua semplicità la rende molto versatile: infatti, può essere utilizzata per coprire le luci più piccole (è il caso dei corridoi -Figura 3.27), così come quelle più grandi (come le cantine).

L’arco della volta a botte può essere di diverse tipologie: a tutto sesto, a sesto ribassato, a sesto rialzato, a sesto acuto, ellissoidico etc.

La sua struttura la rende in grado di sopportare anche sovraccarichi importanti. Si può realizzare con qualsiasi tipo di pietra anche molto dura.



Figura 3.26: *Modello 3D di una Volta a Botte.*



Figura 3.27: *Esempio di Volta a Botte.*

3.5.2 Volta a Crociera.

La volta a crociera deriva, dall'intersezione di due volte a botte aventi la stessa freccia (Figura 3.28); in particolare è composta dalle quattro superfici (unghie) che si trovano al di sopra delle due curve di intersezione ed è limitata all'esterno da quattro archi perimetrali. Anche le volte a crociera possono essere a tutto sesto, a sesto ribassato, etc.

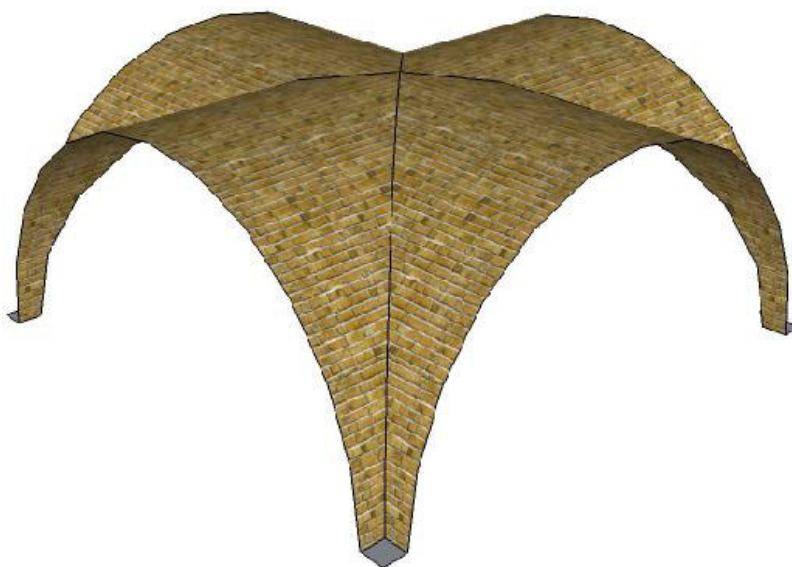


Figura 3.28: *Modello 3D di Volta a Crociera.*

Lo studio del regime statico delle volte a crociera è assai difficile; la soluzione del problema fu ottenuta da Mèry (1840) per via grafica e costituisce ancora un valido approccio al calcolo delle forze che la volta cede ai piedritti. Tale metodo è stato utilizzato per il dimensionamento degli stessi elementi portanti imponendo che la risultante delle forze cedesse all'interno del nocciolo centrale di inerzia.

3.5.3 Volta a Spigolo e Volta a Squadro.

La volta a spigolo è la più diffusa nel territorio salentino (Figura 3.29). Essa è chiamata *volta a stella* nel gergo locale a causa della stella che la porzione di calotta proiettata sul piano orizzontale forma al centro.



Figura 3.29: *Volta a Spigolo o a "Stella".*

L'introduzione di tale tipologia è attribuibile alle modifiche di costruzione della volta a crociera ad opera della maestranza locale. Infatti, essa nasce dall'esigenza di risolvere i problemi di carattere costruttivo e statico della volta a crociera, frutto dell'intersezione di due volte a botte. Le unghie, in questa tipologia di volta, non si toccano e la parte centrale, che funge da contrasto, è costituita da una porzione di volta a vela. Le forze risultanti dovute ai carichi verticali si scaricano sui quattro pilastri laterali e quindi i muri servono solo da tamponamento laterale della struttura. Questo tipo di volta più indicata per gli ambienti di dimensioni medio piccole (da ml. 4.00 a ml. 5.50) - in quanto l'arco laterale, essendo a tutto sesto farebbe diventare la struttura troppo alta è realizzata anche nella tipologia con arco ribassato.

La volta a squadro (Figura 3.30) si riconosce per la stella a otto punte che la proiezione della calotta, forma sul piano orizzontale. Oltre alla bellezza estetica, questo tipo di volta ha il vantaggio di esercitare una modesta spinta sugli angoli e all'esterno perché molte tensioni interne si annullano reciprocamente; ne sono prova molti esempi ben riusciti di volte a squadro realizzate su muri da 25 m. in pietra.

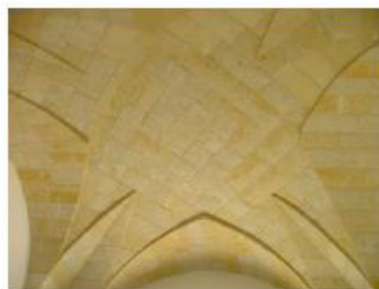


Figura 3.30: *Volta a Squadro.*

3.6 Volte in Muratura Soggette a Carico d'Incendio.

Allo stato attuale non esiste una norma che fornisca metodi di verifica tabellari per le volte in muratura: il D.M. 16/02/07 analizza strutture portanti riferendosi solo a muri orizzontali e a solai orizzontali in latero-cemento o acciaio, mentre, le indicazioni contenute nell'Eurocodice 6 indicano chiaramente che le procedure contenute all'interno del documento non si applicano al caso di archi e volte.

La carenza nelle norme riguardo tale argomento è stata evidenziata ancora prima dal corpo dei vigili del fuoco, i cui tecnici collaborano con il mondo accademico al fine di sviluppare ricerche in merito. Il fine ultimo è, senza dubbio, quello di fornire strumenti utili ai progettisti che devono interfacciarsi col problema di valutare e certificare la resistenza delle strutture a volta sotto l'azione del fuoco. Allo stato attuale qualsiasi informazione in più sarebbe d'aiuto e questa premessa è alla base del lavoro di ricerca svolto e presentato nel prossimo capitolo, mentre, nel presente paragrafo, si riportano alcuni studi su archi e volte in muratura soggette a carico d'incendio che permetteranno di inquadrarlo al meglio.

Nello studio effettuato da Fantilli et al., gli autori propongono un metodo analitico iterativo per la risoluzione di un arco in muratura soggetto a carico d'incendio (Fantilli, Vallini, & Demarchis, 2009). In particolare, si considera il singolo arco come un unico macro-elemento trave curvilinea in regime di non linearità meccanica (Figura 3.31), per il quale è possibile individuare il legame esistente tra sollecitazioni nodali $\{S\}$ e gli spostamenti nodali $\{\eta\}$:

$$\{S\} = [K]\{\eta\} + \{S_0\}$$

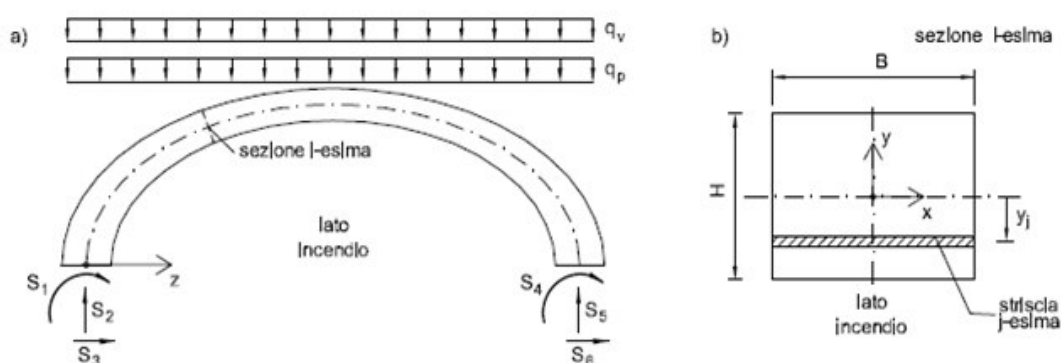


Figura 3.31: Macro-elemento Trave adottato nel Metodo Generale di Calcolo.
(Fantilli, Vallini, & Demarchis, 2009)

Nel caso dell'arco di Figura 3.31, sull'arco gravano sia i carichi distribuiti permanenti, q_p , e variabili, q_v ; inoltre, nell'i-esima sezione si hanno delle deformazioni impresse dovute all'azione termica ed alle non linearità del materiale.

Gli autori, una volta noti la geometria della struttura, i carichi agenti, il profilo della temperatura, il tipo di materiale, la sua deformabilità in funzione della temperatura ed il legame costitutivo, si propongono un il seguente algoritmo iterativo per la determinare, in ogni sezione dell'arco, i valori dello sforzo normale, del momento flettente e del taglio.

- 1) Calcolo della deformazione assiale e della curvatura nell'i-esima sezione (λ_i e μ_i);
- 2) Calcolo dei termini noti $\{S_0\}$ in funzione della azioni implicite ed esplicite;
- 3) Determinazione dello stato di sollecitazione interno alle sezioni (N_i e M_i);
- 4) Calcolo delle deformazioni totali, della componente termica e di quella elastica nelle singole strisce (indicate con pedice j) in cui è divisa la sezione;
- 5) Calcolo della distribuzione delle tensioni per mezzo della legge costitutiva del materiale (dipendente dalla temperatura):

$$\sigma_{i,j} = \sigma(\varepsilon_{i,j}, T(y_i))$$

- 6) Determinazione dello sforzo normale di risposta (N_{resp});
- 7) Se N_{resp} non approssima correttamente il valore dello sforzo normale N_i , si corregge la deformazione assiale attraverso l'imposizione di una deformazione impressa aggiuntiva $\Delta\lambda_i$ e si ritorna al punto 1);
- 8) Calcolo del momento di risposta (M_{resp});
- 9) Calcolo del termine di correzione della curvatura $\Delta\mu_i$;
- 10) Se $\Delta\mu_i$ è non nullo in almeno una sezione allora si ritorna al punto 2) altrimenti la soluzione del problema è ottenuta.

Gli autori hanno inserito il procedimento esposto all'interno di un ciclo più esterno con il quale hanno incrementato i carichi variabili agenti sulla struttura; hanno così valutato la capacità portante dell'arco da esaminare con il progredire dell'incendio.

All'interno del loro lavoro, Fantilli et al. hanno anche applicato tale procedura ad un esempio numerico; in particolare, essi hanno esaminato l'arco in muratura riportato in Figura 3.32, considerandolo sottoposto a profili di temperatura come di Figura 3.33.

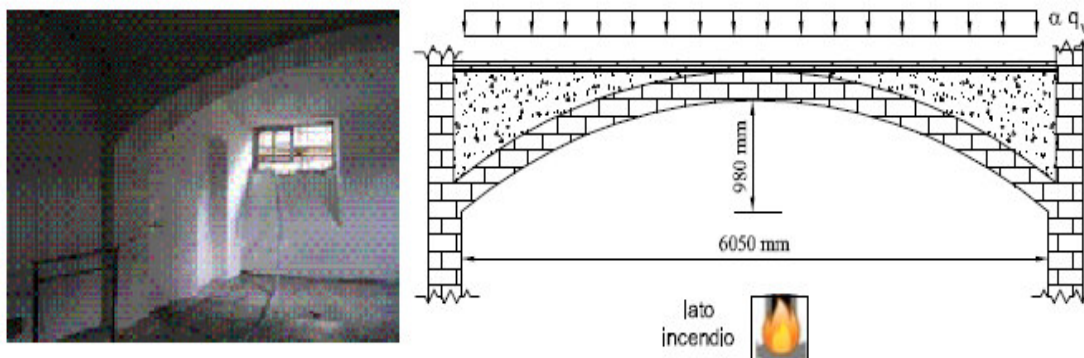


Figura 3.32: *Applicazione del Modello ad un Caso Reale. (Fantilli, Vallini, & Demarchis, 2009).*

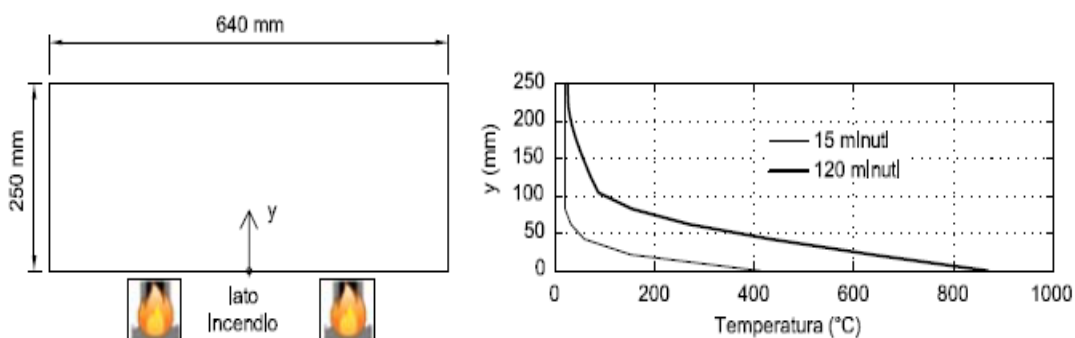


Figura 3.33: *Profili di Temperatura relativi ad una Sezione soggetta ad Incendio Standard. (Fantilli, Vallini, & Demarchis, 2009)*

Di seguito si riportano le caratteristiche geometriche dell'arco:

- Lunghezza di 6050 mm
- Altezza in chiave di 980 mm.
- Larghezza sezione trasversale, B , di 640 mm
- Altezza sezione trasversale, H , di 250 mm.

Inoltre, sull'arco insistono volte in muratura, con relativo riempimento di peso specifico 15 kN/m³, per una larghezza di competenza di 4500 mm.

Per un prefissato tempo di esposizione al fuoco, il carico variabile gravante sul solaio sovrastante (4 kN/m²) viene incrementato di un fattore α , i cui possibili valori sono riportati in Figura 3.34 in funzione del tempo, fino alla rottura dell'arco.

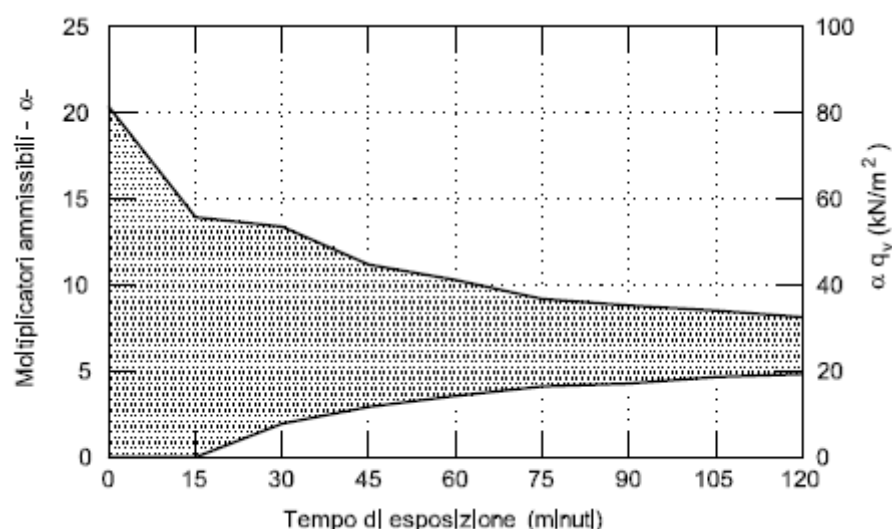


Figura 3.34: *Moltiplicatori Ammissibile del Carico Variabile con il Progredire dell'incendio.*
(Fantilli, Vallini, & Demarchis, 2009)

Gli autori rimarcano come, in seguito all'esposizione alle elevate temperature, si abbia una drastica riduzione del massimo carico supportabile: si passa da un moltiplicatore massimo di 20 (equivalente ad un carico variabile di 80 kN/m^2) in condizioni di normale esercizio, a circa 8 (equivalente ad un carico variabile di 32 kN/m^2) dopo due ore di esposizione all'incendio. In particolare, si osserva una perdita di circa il 50% rispetto alle condizioni ordinarie dopo appena un'ora di esposizione; superato tale intervallo di tempo la riduzione della resistenza continua in misura minore, con valori massimi del moltiplicatore α compresi tra 8 e 9.

Inoltre, Fantilli et al. hanno riscontrato l'esistenza di un minimo valore del carico variabile, la cui presenza è necessaria a garantire la resistenza dell'arco all'incendio. Infatti, la Figura 3.34 mostra come, dopo 15 minuti di esposizione al fuoco, la struttura collasserebbe se il carico variabile fosse nullo, poiché l'effetto benefico del peso non riesce a contrastare gli effetti negativi dell'azione termica. I livelli di carico minimo crescono con il progredire dell'esposizione al fuoco, quindi l'intervallo di carico ammissibile per l'arco analizzato si assottiglia nel tempo.

Nel 2011 l'Ing. Dall'Aglio ha svolto indagini e considerazioni nell'ambito della certificazione sulla resistenza al fuoco delle strutture a volta appartenenti ad un complesso edilizio di proprietà della fondazione "Don Carlo Gnocchi" di Milano (Dall'Aglio, 2011). Nel suo studio, Dall'Aglio si è soffermato sulla valutazione analitica della resistenza delle volte in laterizio esposte all'azione del fuoco per una durata di 60 minuti.

Il calcolo della tensione massimo all'interno della volta, nel caso di combinazione dei carichi in sia in presenza che in assenza d'incendio, è stato effettuato attraverso un

apposito software che si basa sul metodo di Mèry (Figura 3.35): la resistenza massima considerata, seguendo quanto prescritto dalla N.T.C. 08, è pari a 1,778 MPa.

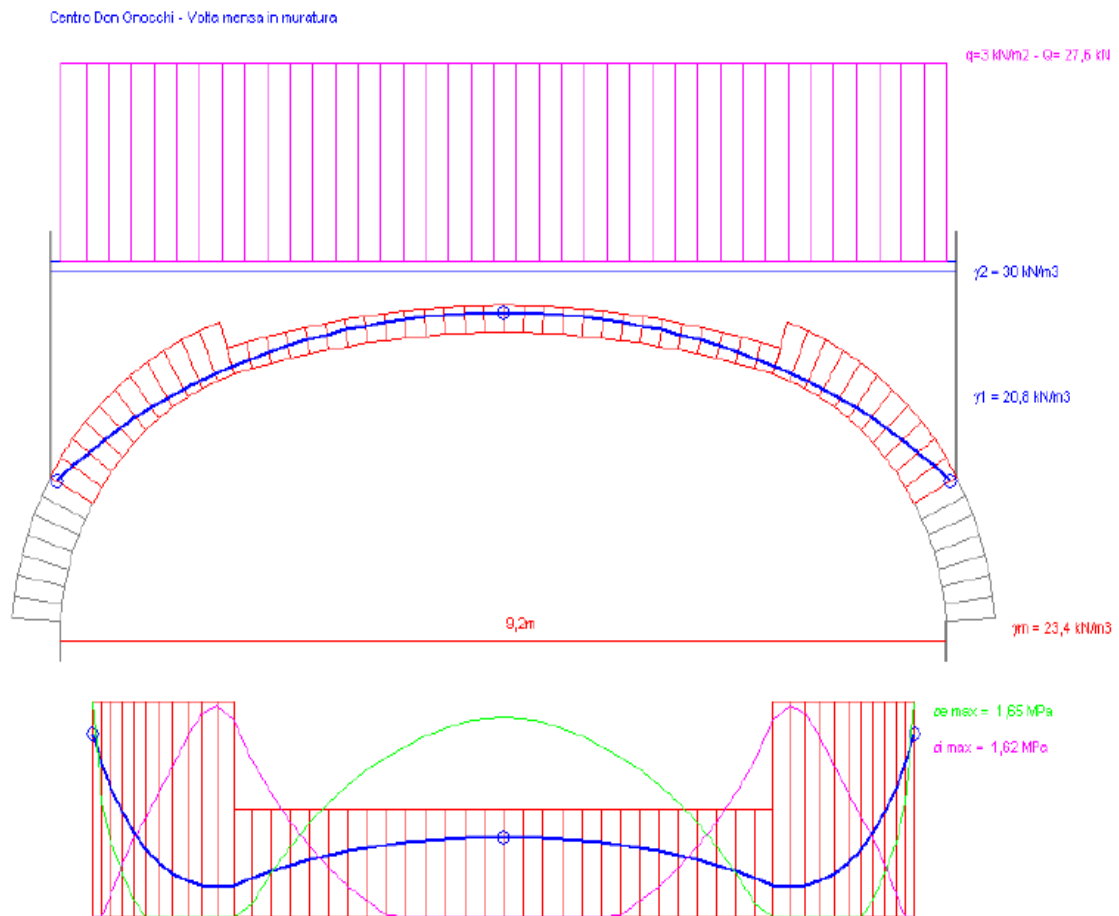


Figura 3.35: Andamento delle Pressioni e Tensioni Massime Volta Centro “Don Gnocchi”.
(Dall’Aglia, 2011)

Dall’Aglia, allo scopo di considerare lo spessore residuo dopo l’esposizione al fuoco, ha elaborato una mappatura termica attraverso il metodo FEM (Figura 3.36), tenendo conto dei parametri indicati nell’Eurocodice 6. Dalla mappa termica, il progettista ha desunto lo spessore di sezione non più efficace, cioè quello a temperatura al di sopra di 100°C (Figura 3.37).

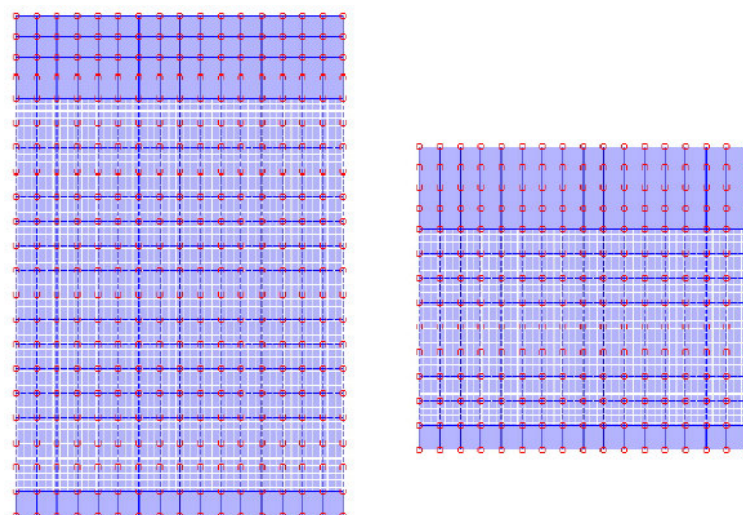


Figura 3.36: Mesh con suddivisione dei Materiali (Viola per Intonaco/Calcestruzzo; Griglia per Mattoni) – Mattoni da 24 cm e da 12 cm. (Dall'Aglio, 2011)

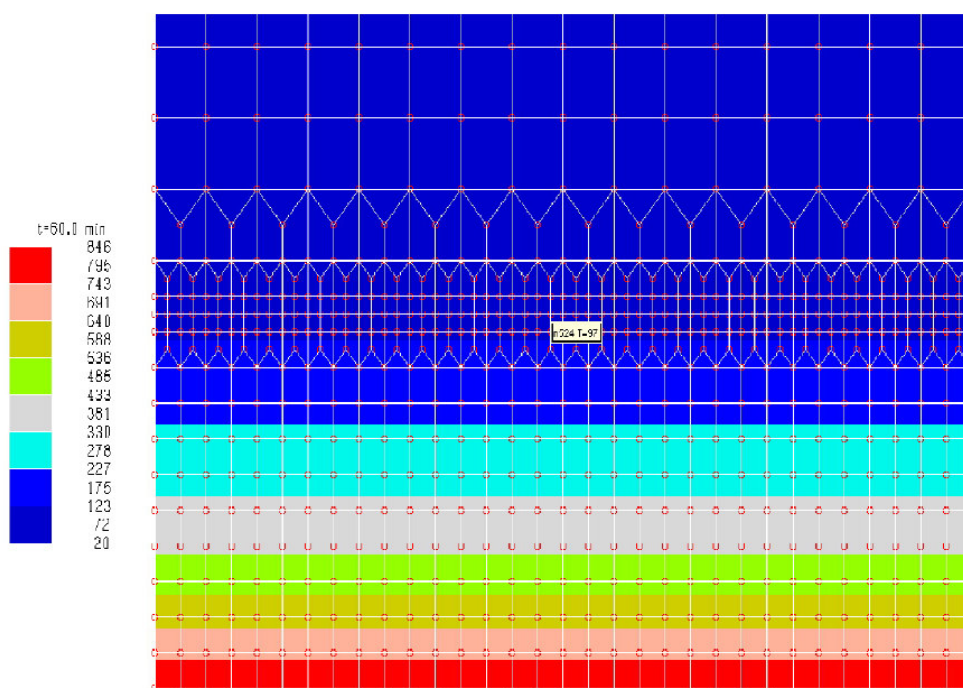


Figura 3.37: Particolare Mappa Termica Mattone da 24 cm (Dall'Aglio, 2011)

Il risultato ottenuto da Dall'Aglio è stato che la isoterma a 100°C è situata a 24,3 mm dalla faccia di contatto tra intonaco e mattone, pertanto, lo spessore della sezione reagente, dopo 60 minuti di esposizione al fuoco, è pari a 21,6 cm.

Procedendo in maniera analoga nel caso di mattone da 12 cm, il progettista ha ottenuto uno spessore della sezione resistente pari a 8,1 cm.

4 Analisi Sperimentale.

Nel presente capitolo si descrivono gli aspetti studiati nel presente lavoro di tesi in merito al problema delle volte in muratura soggette a carico d'incendio, nonché le metodologie utilizzate e le analisi condotte.

In primo luogo, sono state definite le proprietà del materiale analizzato sia dal punto di vista meccanico sia termico. In particolare, si descrivono le prove condotte in laboratorio per la misura sperimentale della conducibilità termica.

Successivamente, si descrive la procedura per il calcolo dello spessore minimo che garantisce la stabilità della volta.

Infine, si riportano le analisi numeriche condotte al fine di ottenere la mappa termica della volta a botte e, in particolare, l'andamento della temperatura in funzione del tempo in corrispondenza dello spessore minimo.

4.1 Modellazione Materiale Muratura.

Una parte fondamentale dello svolgimento delle analisi numeriche è costituita dalla modellazione del materiale muratura nel software utilizzato (MIDAS FEA). Tale fase è stata caratterizzata dall'inserimento di parametri di natura sia meccanica che termica.

Da un punto di vista meccanico, le caratteristiche della muratura sono state scelte facendo riferimento alle N.T.C. 08 (Tabella 4.1), le quali forniscono i mezzi per la definizione della resistenza di progetto del materiale, il suo modulo elastico, e il suo modulo di taglio. In Tabella 4.1, si è fatto riferimento alla voce “*Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)*”.

Tabella 4.1: *Tabella C8A.2.1 NTC 08*

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Il materiale scelto, quindi, ha una resistenza pari a:

$$f_m = 140 \frac{N}{cm^2} = 1,4 MPa$$

Per il livello di confidenza si sceglie di considerare il più cautelativo:

$$LC3 \rightarrow 1,35$$

Ciò permette di calcolare la resistenza di progetto per la muratura considerata:

$$f_d = 1,04 MPa$$

Inoltre, è stata assunta la densità del materiale pari a 16kN/m³ e il calore specifico in accordo con la Tabella 4.2.

Tabella 4.2: *Calore Specifico dei Materiali (Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria Facoltà di Architettura Dipartimento di Arte Scienza e Tecnica del Costruire)*

MATERIALE	CALORE SPECIFICO kJ /kg K
ACQUA	4,186
ARIA a press. costante	1,0
PIETRA terra, calces.	0,8
LATERIZIO	0,8
TUFO	1,3
LEGNO	2,7
ACCIAIO	0,5
ORO	0,13

4.1.1 Conducibilità Termica della Pietra Leccese.

Al fine di migliorare l'affidabilità dei risultati ottenuti con le analisi numeriche, è stata avviata una campagna d'indagine sperimentale volta alla misurazione del valore di conducibilità termica della pietra leccese. La campagna sperimentale è stata svolta presso il laboratorio di Fisica Tecnica dell'Università del Salento.

Di seguito si descrivono le prove effettuate e si discutono i risultati ottenuti.

Le prove sono state svolte su campioni costituiti da blocchetti in pietra leccese delle dimensioni:

- Base sezione di 45 mm
- Altezza sezione di 25 mm;
- Altezza blocchetto di 80 mm.

I campioni sono stati montati su un supporto in acciaio ed è stato applicato un apposito sensore (di fatto una termo-resistenza tra due piastre di mica), in modo da ricreare una situazione in cui lo stesso si potesse considerare all'interno del materiale (Figura 4.1).



Figura 4.1: *Apparato di Prova per la Misura della Conducibilità Termica.*

I campioni così preparati sono stati inseriti all'interno della fornace della Vecstar Ltd (Figura 4.2) per essere portati ad alte temperature.

Sono state effettuate misurazioni a temperatura ambiente (20°C), a 100°C, a 200°C, e a 300°C; per ogni temperatura, il numero di misurazioni è stato pari a 5.



Figura 4.2: *Fornace della Vecstar Ltd.*

In Tabella 4.3 sono riportati i risultati medi ottenuti; mentre, in APPENDICE, è possibile visionare ogni singola misurazione.

Tabella 4.3: *Elaborazione Dati delle Prove di Conducibilità Termica.*

Temperature	Conducibilità [W/(mK)]		
	Campione 1	Campione 2	Media
20	1,0378	1,0595	1,04868
100	0,9156	0,9369	0,9263
200	0,7886	0,8130	0,8008
300	0,7086	0,7294	0,7190

I valori ottenuti sono stati riportati in un grafico Temperatura-Conducibilità (Figura 4.3).

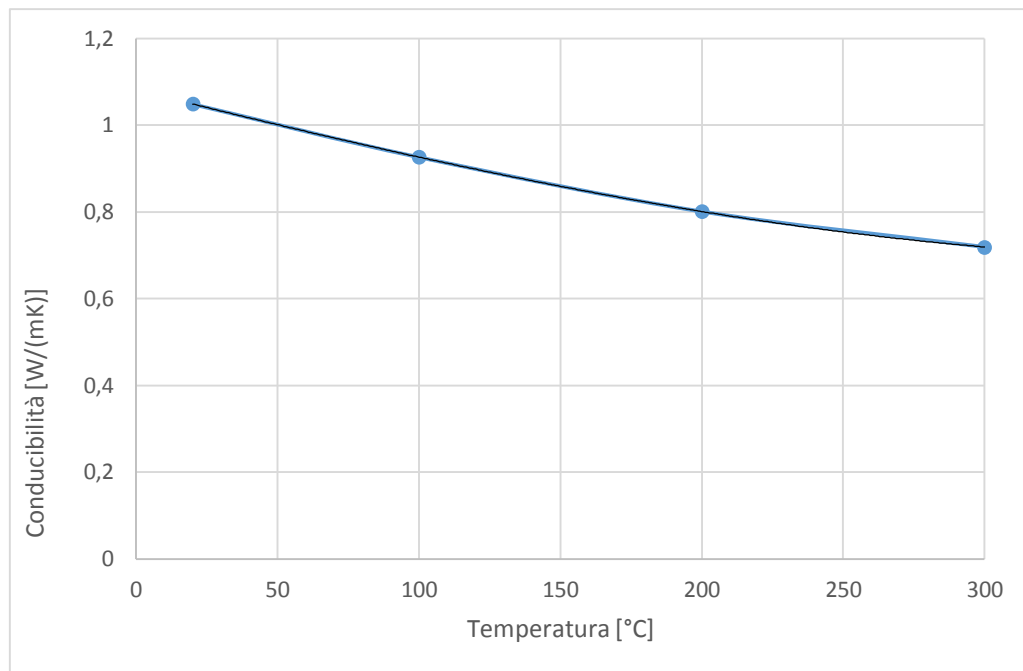


Figura 4.3: *Andamento della Conducibilità in Funzione della Temperatura per la Pietra Leccese.*

La linea di tendenza che meglio descrive i risultati ottenuti è rappresentata perfettamente da una polinomiale di terzo grado, la quale presenta un coefficiente di correlazione pari a 1; tale polinomiale è espressa dalla seguente equazione:

$$\lambda = 2 \cdot 10^{-9} \cdot T^3 + 8 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 - 0,0017 \cdot T + 1,0814$$

In cui λ rappresenta la conducibilità e T la temperatura.

Tale espressione è stata utilizzata per ricavare i valori della conducibilità termica della pietra leccese, a partire dalla temperatura ambiente, fino alla temperatura di 1100°C; i risultati ottenuti hanno evidenziato un decadimento pressoché costante della conducibilità termica all'aumentare della temperatura fino ai 400°C. Successivamente, nell'ipotesi di utilizzare la stessa legge polinomiale per descrivere il fenomeno a temperature più elevate, il valore della conducibilità avrebbe una ripresa, ritornando a quello che aveva a

temperatura ambiente a circa 700°C e arrivando a essere circa il triplo rispetto allo stesso a 1100 °C.

Dall'analisi di tali dati e facendo riferimento allo stato dell'arte (Sciarretta, 2010), è stato scelto di considerare, in sede di analisi numerica, tre andamenti diversi per la conducibilità termica:

- Un andamento costante della conducibilità pari a 1 al quale ci si riferirà nel seguito come “Conducibilità Costante”;
- Un andamento variabile della conducibilità dato dall'equazione della linea di tendenza soprariportata e al quale, nel seguito, ci si riferirà come “Conducibilità Calcolata”
- Un andamento variabile della conducibilità intermedio ai precedenti al quale ci si riferirà, nel seguito, come “Conducibilità Proposta”.

In particolare, la curva di conducibilità proposta segue l'andamento di quella calcolata fino alla temperatura di 700°C oltre la quale tende, gradualmente, a quella di conducibilità costante.

In Figura 4.4 è riportato il grafico che confronta le tre curve di conducibilità.

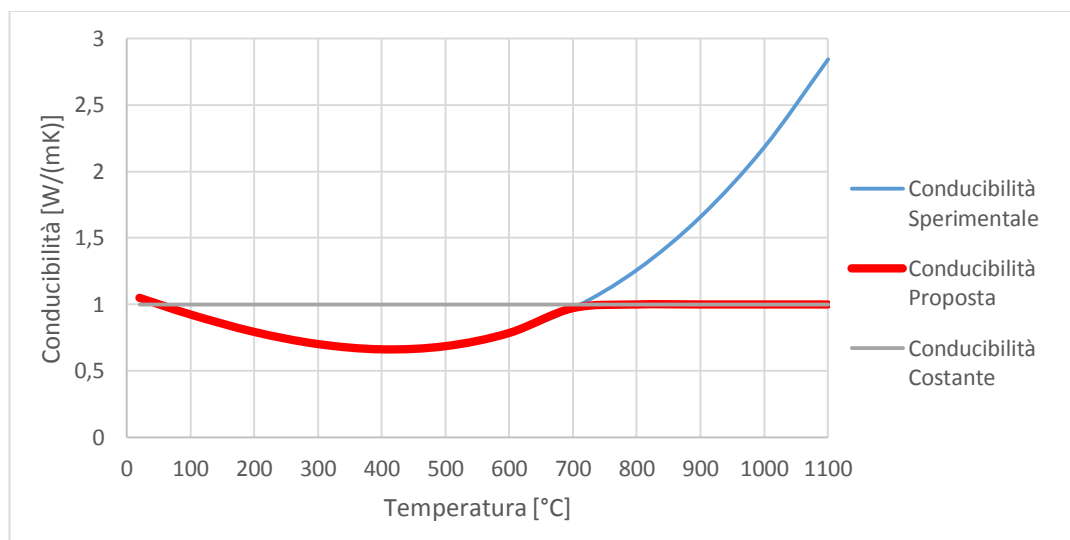


Figura 4.4: Curve di Conducibilità Considerate.

Si precisa che i risultati ottenuti sono il risultato di una prima indagine sperimentale, ragion per cui sono necessari ulteriori studi al fine di convalidarli.

4.2 Calcolo Spessore Minimo della Volta a Botte.

Nota la resistenza di calcolo a compressione della muratura ($f_d = 1,04 \text{ MPa}$), è possibile determinare il carico agente nella condizione a freddo e a caldo. In particolare nel primo caso si fa riferimento alla combinazione generale dello Stato Limite Ultimo:

$$F_d = \gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{G2} G_{k2} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \sum_{j=2}^n \gamma_{Qj} \psi_{0j} Q_{kj}$$

Invece, in presenza di incendio, la combinazione a cui fare riferimento è quella per eventi eccezionali:

$$F_d = G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} Q_{k1} + \psi_{22} Q_{k2} + \dots$$

I risultati ottenuti nel caso di combinazione allo stato limite ultimo in assenza d'incendio sono riportati in Tabella 4.4:

Tabella 4.4: Carichi applicati alla Volta – S.L.U. in Assenza d'Incendio

Tipo di Carico	Valore	Coefficiente	Spessore [m]	Totale [kN/m ²]
Riempimento [kN/m ³]	16	1,3	0,3	6,24
Sottofondo + Pavimento [kN/m ³]	20	1,5	0,08	2,4
Sovraccarico Variabile [kN/m ²]	2	1,5		3
Totale				11,64

In presenza di incendio, invece, si sono ottenuti i risultati riportati in Tabella 4.5:

Tabella 4.5: Carichi applicati alla Volta - Combinazione Eccezionale in Presenza d'Incendio.

Carico:	Valore	Coefficiente	Spessore [m]	Totale [kN/m ²]
Riempimento [kN/m ³]	16	1	0,3	4,8
Peso Specifico Sottofondo [kN/m ³]	20	1	0,08	1,6
Sovraccarico Variabile [kN/m ²]	2	0,3		0,6
Totale				7

Una volta noti i carichi, è stato possibile determinare lo spessore minimo della volta, schematizzata come un arco, con il metodo di Mèry; tale spessore minimo è quello che garantisce la stabilità della volta sotto l'azione dei carichi verticali.

4.2.1 Il raggiungimento della Temperatura di Inefficacia.

L'esigenza di definire lo spessore minimo viene dal fatto che, al fine di tenere in conto il degrado delle proprietà meccaniche del materiale, all'aumentare della temperatura si riduce la sezione dell'elemento strutturale da considerare resistente. Una volta che lo

spessore della sezione resistente si riduce oltre il valore minimo, appare evidente come la volta non sarà più in grado di sostenere i carichi verticali e si avrà il collasso.

L'Eurocodice 6, parte 1.2, fa riferimento a due temperature limite: quella di indebolimento (θ_1) e quella di inefficacia (θ_2). La prima è quella temperatura al di sotto della quale si può considerare una resistenza a compressione per il materiale pari a quella a temperatura ambiente; la seconda è quella temperatura al di sopra della quale si considera nulla la resistenza residua della muratura.

Note queste e nota la distribuzione della temperatura nella sezione, è possibile valutare la sezione ridotta sulla quale effettuare le verifiche.

In particolare l'Eurocodice 6, fornisce dei valori limite di temperatura per blocchi di muratura e malta riportati in Tabella 4.6.

Tabella 4.6: Valori limite di temperatura per muratura (Eurocodice6, parte 1.2).

Masonry units and mortar (surface unprotected) according to 1.1 (2)	Values of constant c	Temperature °C	
		θ_2	θ_1
Clay units with general purpose mortar	c_{cl}	600	100
Calcium silicate units with thin layer mortar	c_{cs}	500	100
Lightweight aggregate units (pumice) with general purpose mortar	c_{la}	400	100
Dense aggregate units with general purpose mortar	c_{da}	500	100
Autoclaved aerated units with thin layer mortar	c_{aac}	700	200

Nel caso in esame, non essendo disponibili dati specifici sulla muratura locale si fa riferimento a blocchi di argilla con malta qualsiasi. Si utilizza quindi una temperatura limite di indebolimento pari a 100°C, ed una temperatura limite di inefficacia pari a 600°C.

Il tempo di resistenza della volta sarà, quindi, compreso tra il tempo necessario a raggiungere la temperatura di indebolimento e quello per raggiungere la temperatura di inefficacia.

4.2.2 Il metodo di Mèry.

Il metodo di Mèry è un metodo di verifica di tipo grafico nel quale l'arco iperstatico è reso isostatico collocando tre cerniere plastiche nelle sezioni di massima sollecitazione flessionale. La situazione considerata è quella in cui si ha l'annullamento degli sforzi di compressione all'estradosso dell'arco nelle sezioni alle reni ed all'intradosso nella sezione di chiave (Figura 4.5). L'annullamento degli sforzi ad un lembo si ha con una distribuzione triangolare degli sforzi; ad una distribuzione triangolare degli sforzi

corrisponde una risultante che passa ad un terzo dell'altezza della sezione dalla parte delle fibre compresse: è in questa posizione che vengono collocate le cerniere plastiche (Figura 4.6). Mèry ha dimostrato che il problema della determinazione del regime statico di un arco può essere risolto utilizzando un poligono di equilibrio a passaggio obbligato per due punti: il terzo medio inferiore nella sezione di imposta e il terzo medio superiore nella sezione in chiave con retta d'azione orizzontale (per arco simmetrico e simmetricamente caricato e vincolato). In questo modo noti i carichi esterni, è possibile ottenere l'andamento della curva delle pressioni.

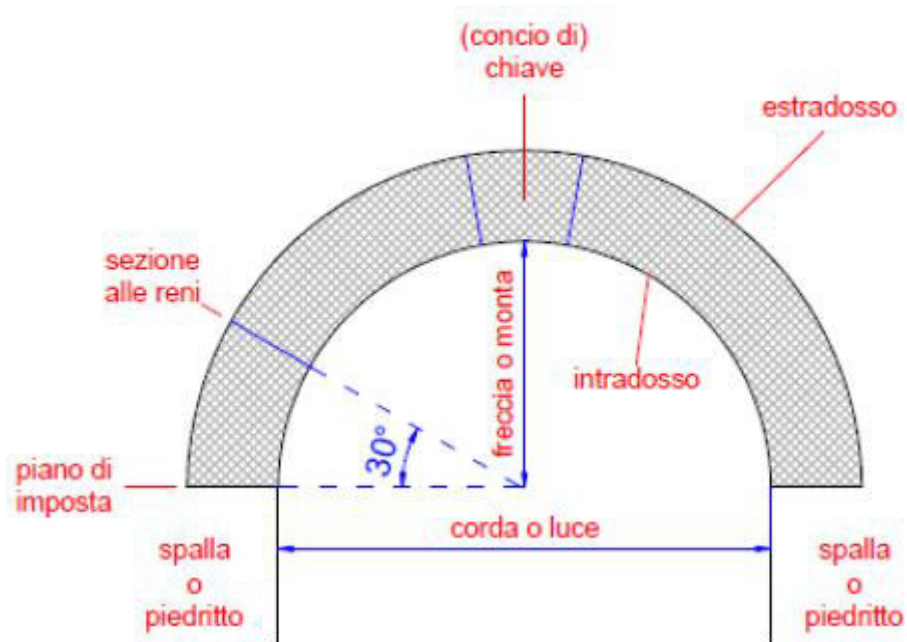


Figura 4.5: Arco a Tutto Sesto.

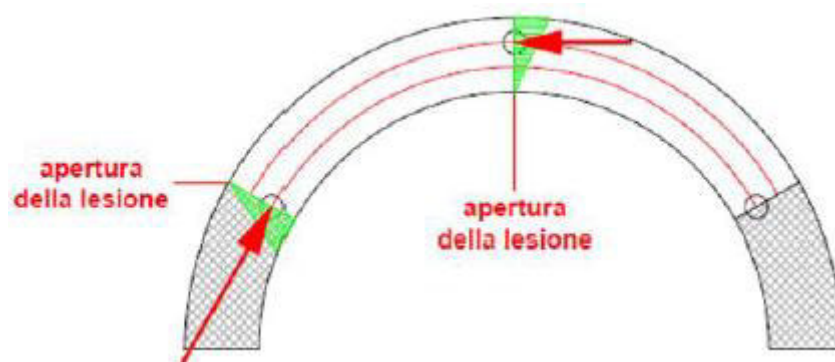


Figura 4.6: Cerniere plastiche nelle sezioni di massima sollecitazione flessionale.

4.2.3 Valore dello Spessore Minimo.

Nel caso in esame, per il calcolo dello spessore minimo è stato utilizzato il software gratuito “ARCO” (dicata.ing.unibs.it/gelfi/software/programmi_studenti.html, 2008, Gelfi P.), che oltre alla curva delle pressioni, fornisce i valori delle sollecitazioni massime. Modellando una volta di spessore via via decrescente e confrontando, per ogni spessore, i valori massimi di sollecitazione con la resistenza attribuita al materiale, è stato individuato lo spessore minimo che garantisce stabilità alla volta. In Figura 4.7, Figura 4.8, Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.12 si riportano i casi dei diversi spessori di volta a botte considerati. In tutte le analisi i carichi applicati sono quelli ottenuti dalla combinazione eccezionale in presenza d’incendio.

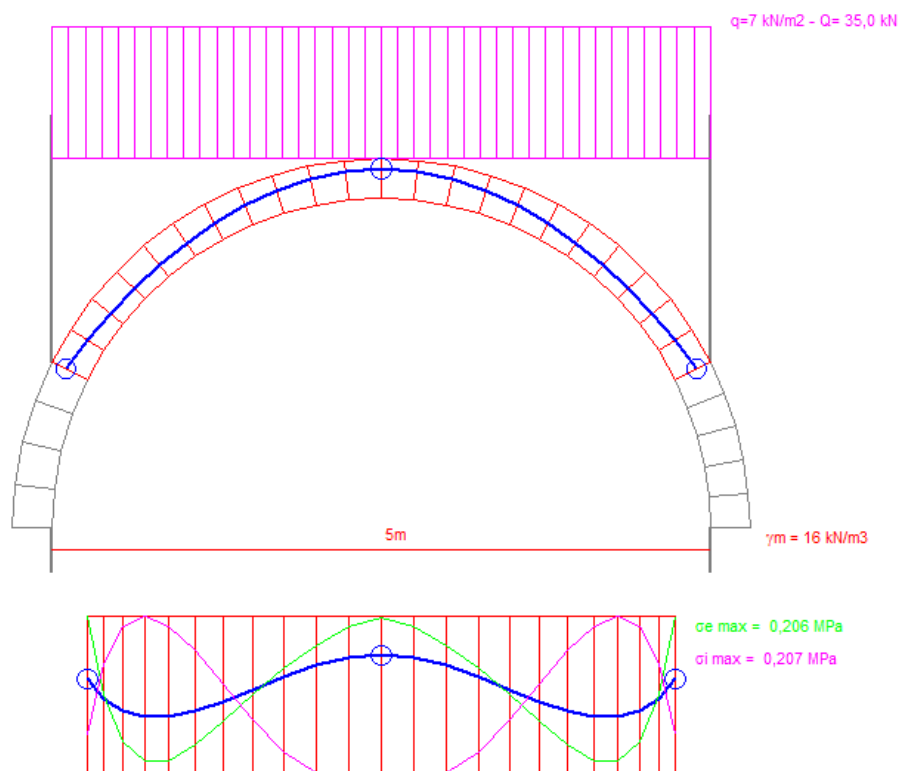


Figura 4.7: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 30 cm.

$$\sigma_{max} = 0,207 \text{ MPa} \leq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

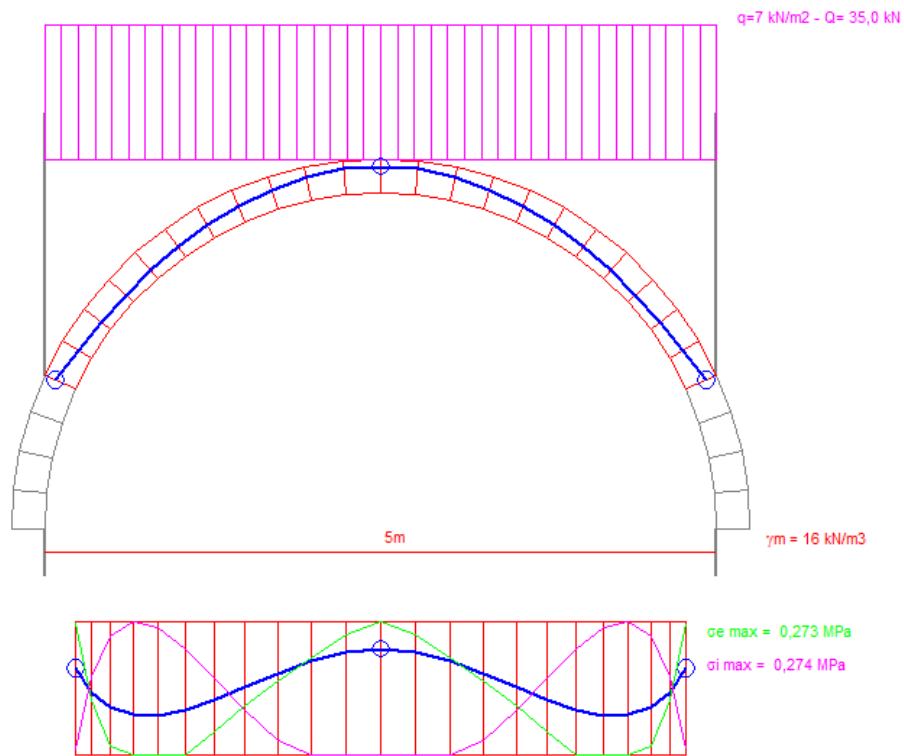


Figura 4.8: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 25 cm.

$$\sigma_{\text{max}} = 0.274 \text{ MPa} \leq f_d = 1.04 \text{ MPa}$$

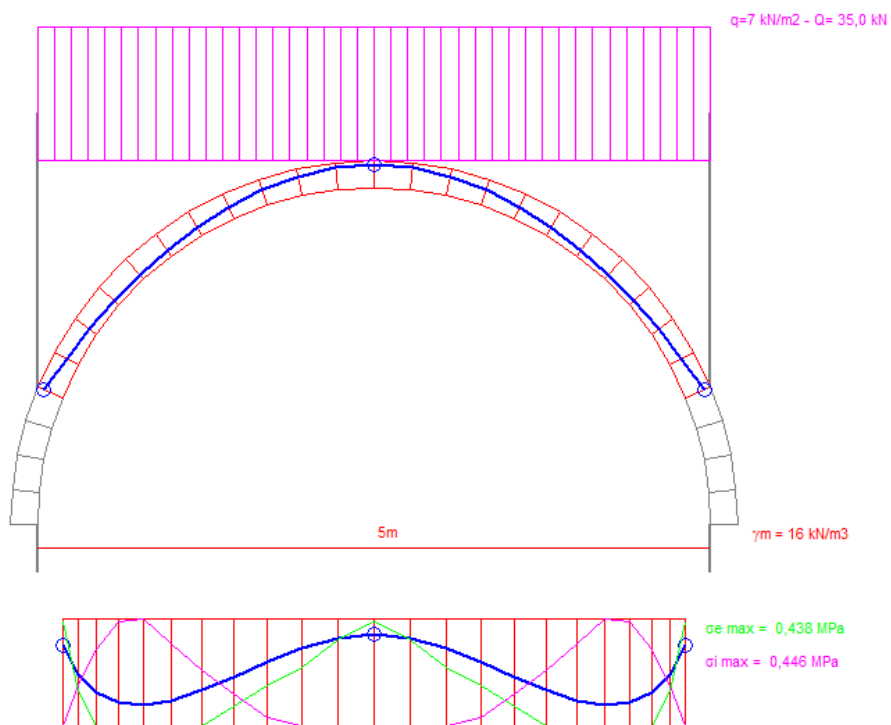


Figura 4.9: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 20 cm.

$$\sigma_{\text{max}} = 0.446 \text{ MPa} \leq f_d = 1.04 \text{ MPa}$$

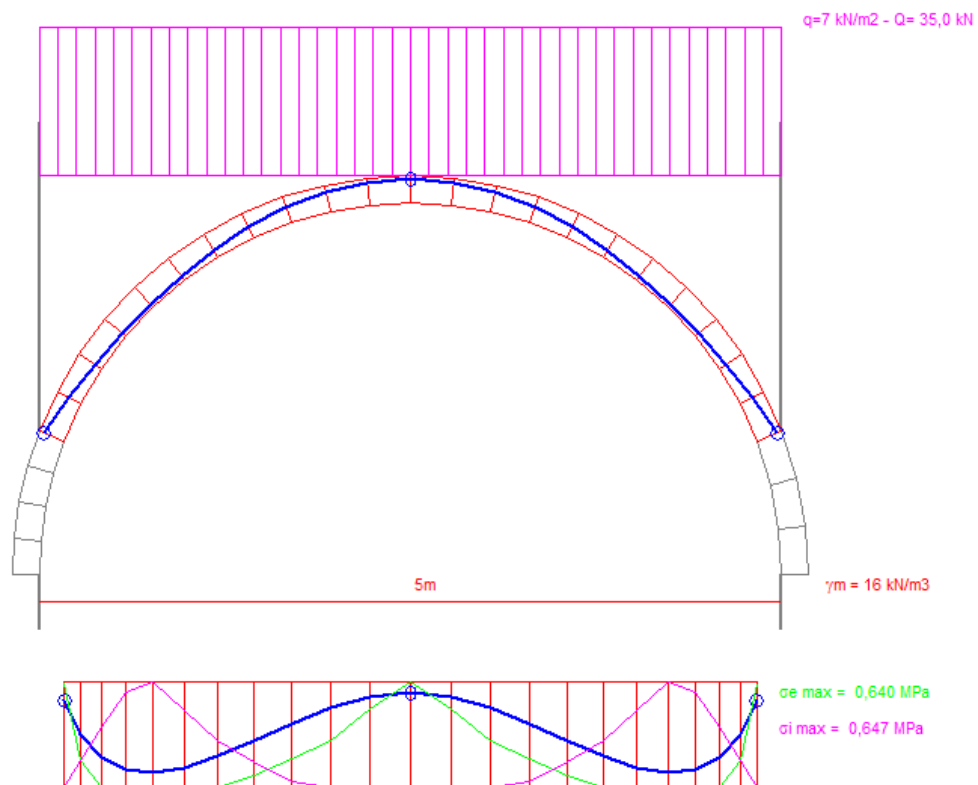


Figura 4.10: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 18 cm.

$$\sigma_{\text{max}} = 0,647 \text{ MPa} \leq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

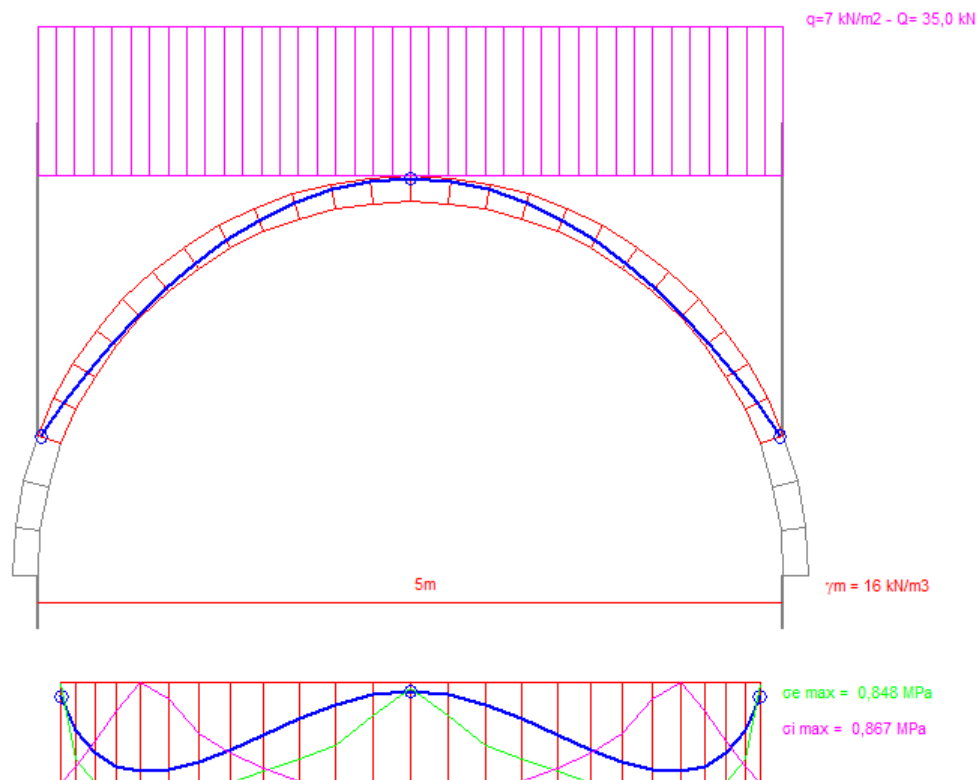


Figura 4.11: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 17 cm.

$$\sigma_{\text{max}} = 0,867 \text{ MPa} \leq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

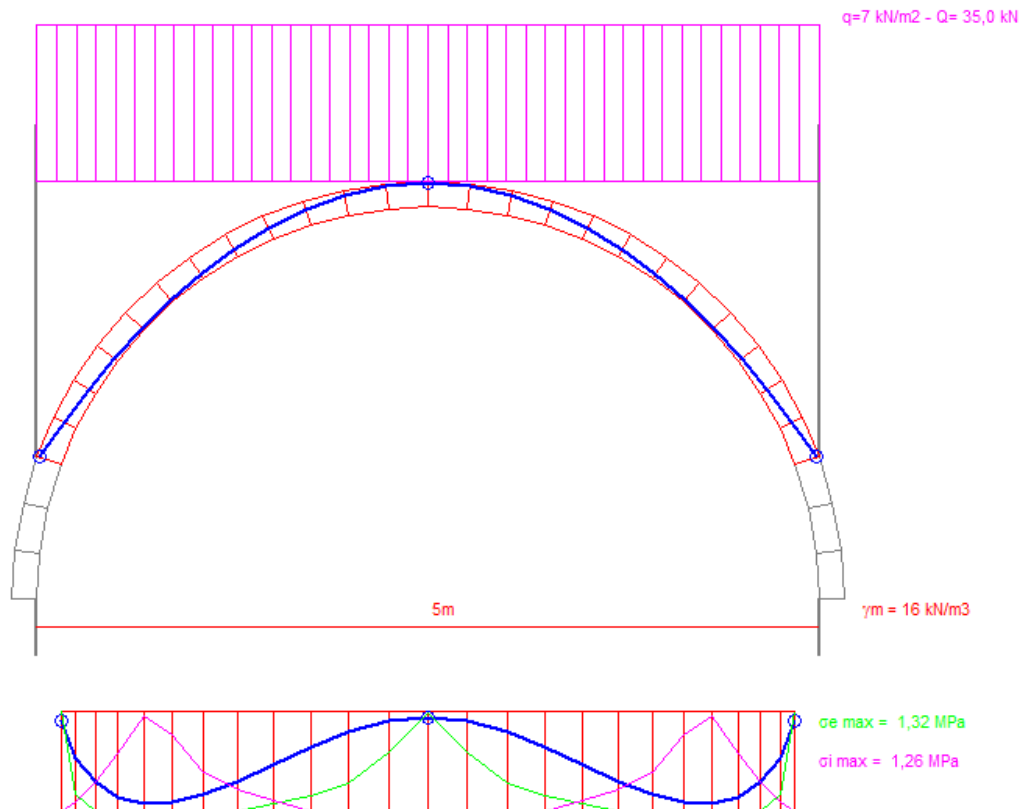


Figura 4.12: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 16 cm.

$$\sigma_{max} = 1,32 \text{ MPa} \geq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

Analizzando le figure appare evidente come per uno spessore effettivo di 16cm la tensione all'interno della volta a botte supera quella di progetto. Pertanto dai risultati ottenuti si evince che lo spessore minimo per la volta in esame è di 17cm.

4.3 Analisi Termiche.

Attraverso il software MIDAS FEA si sono eseguite diverse analisi al fine di ottenere la mappa termica della volta a botte soggetta a carico d'incendio.

In primo luogo si è realizzato il modello strutturale della volta (Figura 4.13) a partire da un semi cilindro di lunghezza pari a 5 m. La struttura è stata modellata realizzando una mesh di elementi solidi prismatici, a sezione quadrata, di lunghezza pari a 10 cm e spessore variabile tra 4 cm e 5 cm.

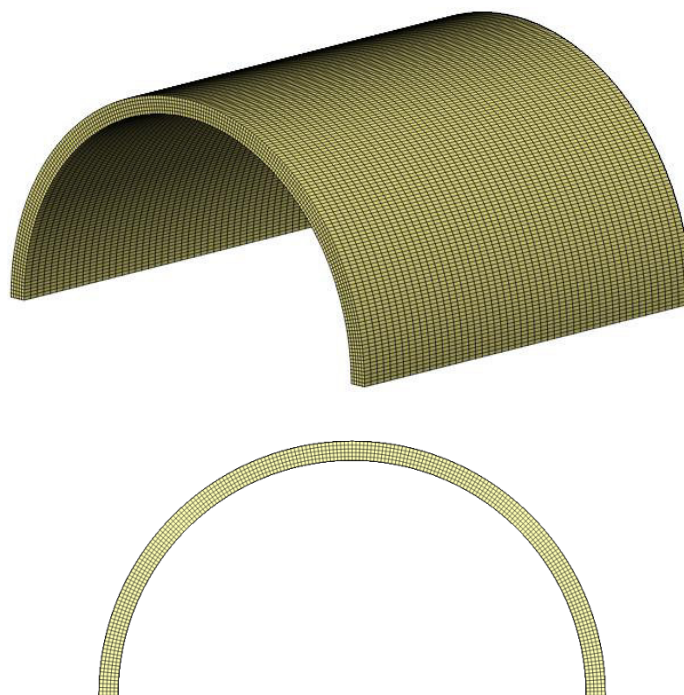


Figura 4.13: Modellazione della Volta a Botte con il Software agli Elementi Finiti.

Per quanto riguarda il materiale, si è creato un modello della pietra leccese considerando le proprietà riportate nei paragrafi precedenti.

Dal punto di vista dei vincoli statici, si sono inseriti degli incastri in corrispondenza dei punti costituenti la base della volta.

Trattandosi di un'analisi puramente termica non è stato necessario considerare i carichi agenti, in quanto l'unico output fornito dal software è rappresentato dalla temperatura.

In corrispondenza della sezione esterna, al fine di modellare la presenza dell'aria, è stato imposto un flusso convettivo, considerando la temperatura esterna pari a 20°C e il coefficiente convettivo pari a 12 W/(m²K), come riportato nell'Eurocodice 6. Tale flusso è stato imposto anche sulla sezione trasversale della volta, in corrispondenza degli estremi, per simulare la presenza della parete verticale di chiusura.

Il carico d'incendio è stato modellato imponendo che la temperatura dei punti della superficie interna della volta aumentasse, in funzione del tempo, seguendo l'andamento della curva standard ISO 834 descritta nei paragrafi precedenti (confronta paragrafo 2.3.1).

La durata delle analisi è stata impostata di 180 minuti e sono stati inseriti degli steps intermedi, allo scopo di ottenere una mappa dettagliata in diversi momenti del tempo

d'incendio. In particolare, gli intervalli considerati sono stati: 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 minuti.

In Figura 4.14 è possibile osservare un esempio di output grafico restituito dal software alla fine dell'analisi termica.

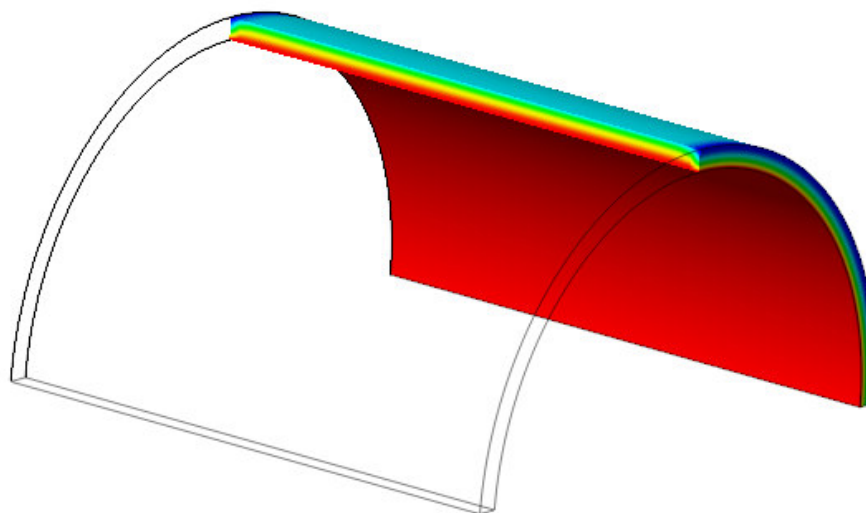


Figura 4.14: *Mappa Termica elaborata dal Software MIDAS FEA – Volta da 20 cm, 180 minuti.*

4.3.1 Influenza dello Spessore.

L'analisi termica presentata nel paragrafo precedente è stata condotta per diverse tipologie di spessore; in particolare, si sono considerati spessori pari a 20 cm, 25 cm, 30 cm.

Il software ha permesso di ottenere i valori di temperatura, al variare del tempo, in tutti i punti della volta, cioè sia quelli sulla superficie interna ed esterna, sia quelli intermedi. Tuttavia, i punti considerati più interessanti, nel contesto del lavoro di tesi, sono quelli in corrispondenza dello spessore minimo di ciascuna volta, calcolato nei paragrafi precedenti. Tale ragionamento, inoltre è stato ripetuto sia nel caso di conducibilità calcolata, sia di conducibilità costante, sia di conducibilità proposta. In Tabella 4.7 sono riportati i valori della temperatura di tali punti, mentre, i grafici che ne rappresentano visivamente gli andamenti sono di quelli di Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17, relativamente ai tre casi considerati.

Tabella 4.7: *Temperatura in Corrispondenza dello Spessore Minimo al Variare dello Spessore – Conducibilità Calcolata, Costante, Proposta.*

Tempo	Conducibilità Calcolata			Conducibilità Costante			Conducibilità Proposta		
	20 cm	25 cm	30 cm	20 cm	25 cm	30 cm	20 cm	25 cm	30 cm
0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
5	259,4	66,7	27,1	234,6	43,6	20,3	259,4	66,7	27,1
10	393,3	143,1	49,6	447,1	160,0	30,9	393,3	143,1	49,6
15	487,2	209,0	79,4	509,8	246,5	90,4	487,2	209,0	79,4
20	559,1	269,1	111,7	577,1	308,9	138,4	559,1	268,8	111,7
30	671,3	379,2	182,3	660,0	412,0	229,1	658,1	369,2	179,5
45	773,1	511,9	286,8	745,8	513,3	330,1	745,2	484,4	272,8
60	839,9	617,2	389,9	800,1	586,2	406,7	802,3	570,5	358,4
90	923,4	757,0	561,6	876,9	684,4	517,8	875,5	679,1	490,2
120	978,0	844,6	685,4	921,2	744,7	591,0	925,7	748,4	581,1
150	1017,2	903,3	771,4	956,2	784,2	640,9	962,1	795,0	644,5
180	1048,4	946,0	833,3	981,2	813,4	676,5	990,8	829,5	689,2

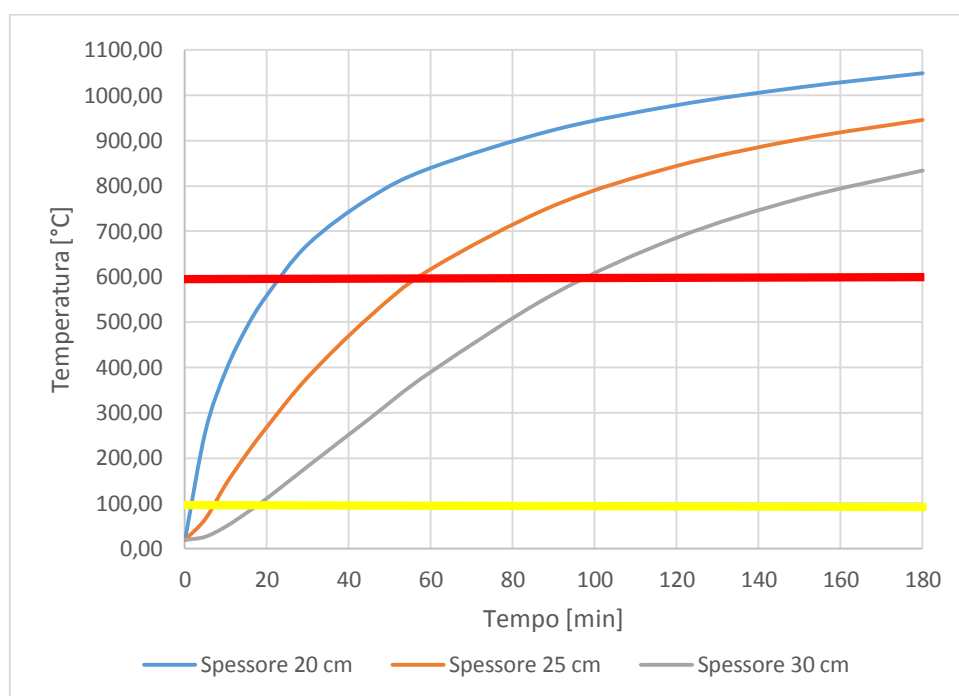


Figura 4.15: *Confronto Temperature in Corrispondenza dello Spessore Minimo – Conducibilità Calcolata.*

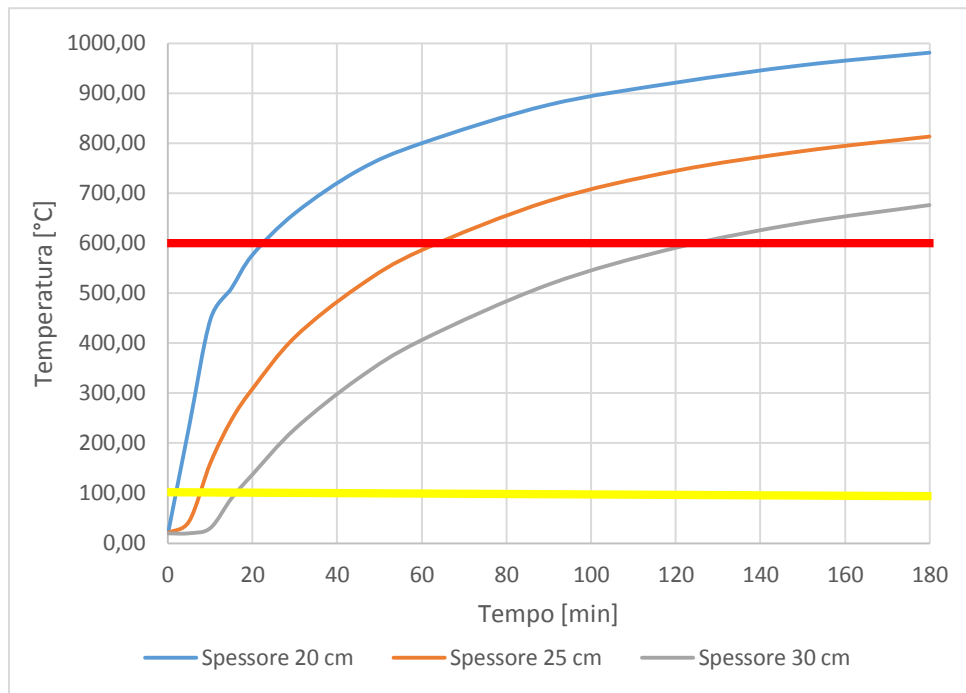


Figura 4.16: *Confronto Temperature in Corrispondenza dello Spessore Minimo – Conducibilità Costante.*

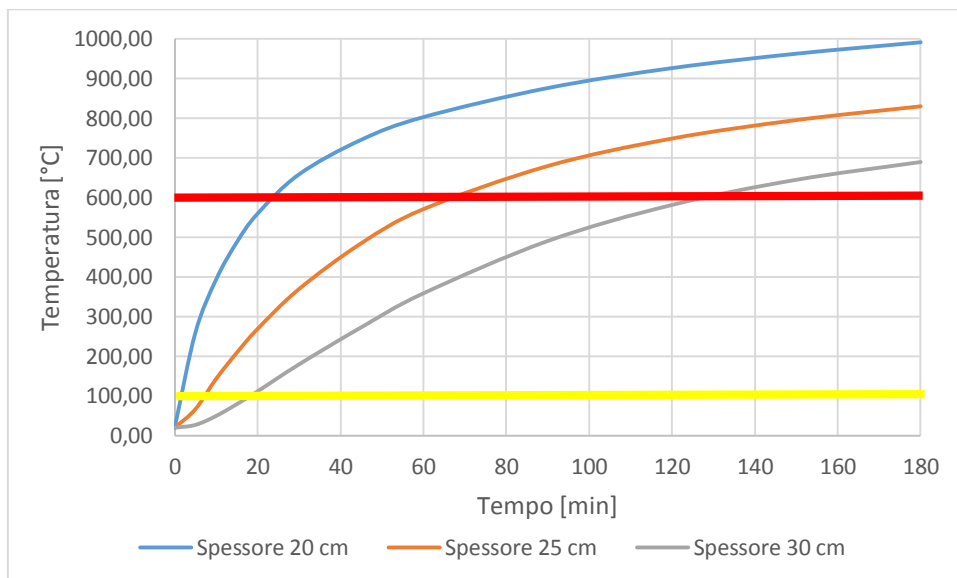


Figura 4.17: *Confronto Temperature in Corrispondenza dello Spessore Minimo – Conducibilità Proposta.*

Si evince, dunque, che lo spessore della volta gioca un ruolo importante sull'andamento della temperatura all'interno della volta e sul tempo che, in corrispondenza dello spessore minimo si raggiungano i valori di temperatura di indebolimento e temperatura di inefficacia. In particolare, tali tempi si allungano sensibilmente all'aumentare dello

spessore. Infatti, mentre per la volta da 20 cm il tempo necessario per il raggiungimento della temperatura di inefficacia è di circa 20 minuti, nel caso di volta da 30 cm tale tempo è compreso tra i 100 minuti e i 120 minuti (a seconda del tipo di conducibilità).

Inoltre, si può affermare che tale comportamento è pressoché indipendente dalla conducibilità termica, in quanto, per tutti e tre i casi considerati, il gap tra le tre curve resta più o meno costante (in particolar modo per conducibilità costante e proposta).

4.3.2 Influenza della Conducibilità Termica.

Al fine di comprendere meglio in che modo la conducibilità termica influenzi l'andamento della temperatura, si sono confrontate, a parità di spessore, le mappe termiche ottenute nei tre diversi casi di conducibilità considerati. Come per l'analisi precedente, gli andamenti di temperatura considerati sono quelli in corrispondenza dello spessore minimo per ciascuno spessore.

In Figura 4.18, Figura 4.19, Figura 4.20 sono riportati i grafici che mostrano tali confronti.

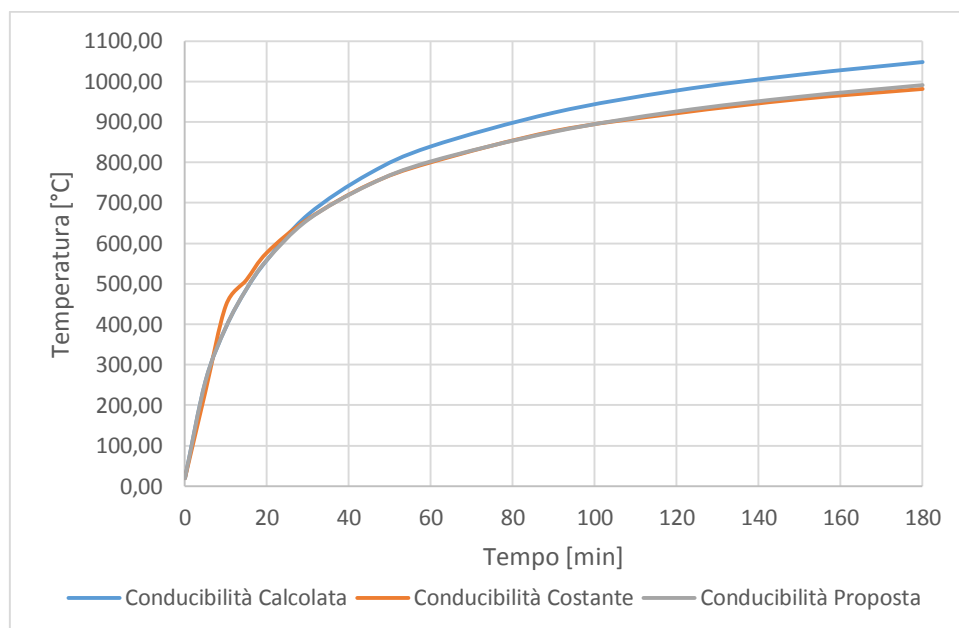


Figura 4.18: *Influenza della Conducibilità sulle Mappe Termiche – Volta da 20 cm.*

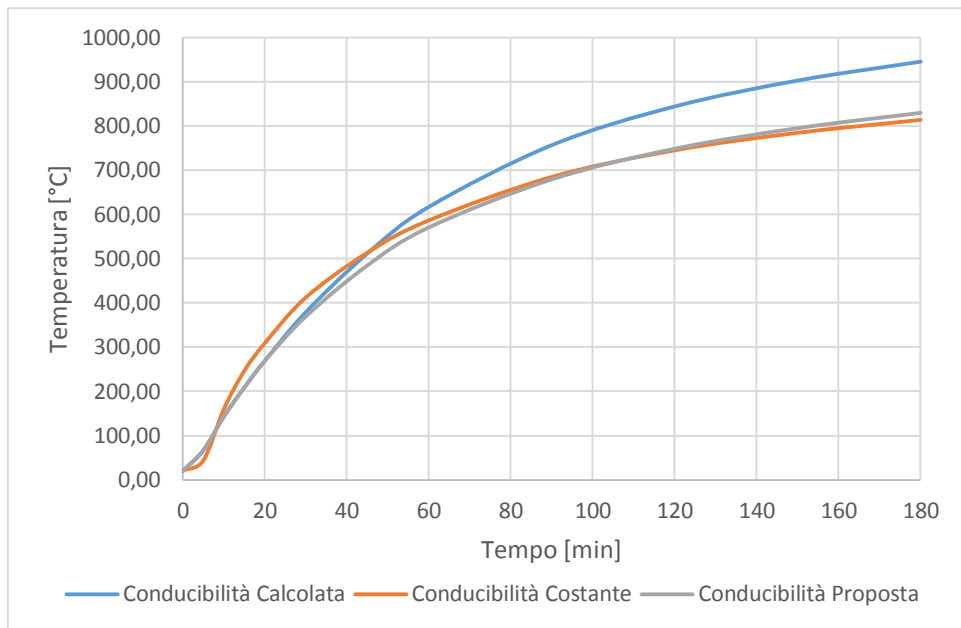


Figura 4.19: *Influenza della Conducibilità sulle Mappe Termiche – Volta da 25 cm.*

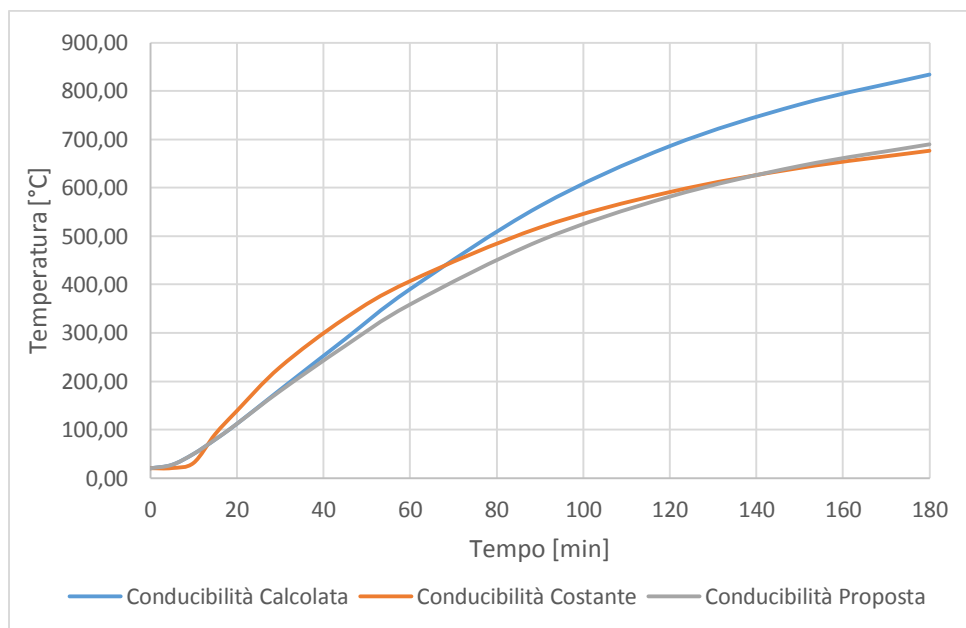


Figura 4.20: *Influenza della Conducibilità sulle Mappe Termiche – Volta da 30 cm.*

Dall'analisi delle figure si evince che la conducibilità considerata influenza sensibilmente la mappa termica ottenuta, soprattutto nel caso di spessori maggiori. Infatti, mentre per la volta da 20 cm le tre curve sono pressoché coincidenti fino a ad un $t=40$ minuti per poi discostarsi per tempi e temperature maggiori, nel caso di volta da 30 cm le differenze si notano già dai primissimi minuti d'incendio. Osservando la curva di temperatura ottenuta per conducibilità calcolata si nota come essa sia a tratti maggiore e a tratti minore di quella ottenuta a conducibilità costante. Infatti, essa, nei primissimi minuti d'incendio, si

mantiene più alta (la temperatura in corrispondenza dello spessore minimo aumenta più in fretta), per poi incrociare prima dei 20 minuti la curva a conducibilità costante e restarne al di sotto (la temperatura in corrispondenza dello spessore minimo aumenta più lentamente). La situazione si ribalta nuovamente a circa 50 minuti: istante in cui la curva a conducibilità calcolata incrocia e supera nuovamente la curva a conducibilità costante, mantenendosi più alta di quest'ultima fino alla fine dell'incendio. A 180 minuti la differenza di temperatura che si ottiene in corrispondenza dello spessore minimo utilizzando l'una o l'altra curva è di oltre 100°C.

Per quanto concerne la curva di temperatura ottenuta considerando il modello di conducibilità proposta, si osserva come essa coincida nel tratto iniziale con la curva a conducibilità calcolata e, nel tratto finale, con quella a conducibilità costante. Tale comportamento intermedio è tanto più accentuato quanto più è sottile lo spessore della volta: infatti, nel caso di volta da 20 cm, tale curva è quasi indistinguibile dalle altre due (Figura 4.18), mentre, nel caso di volta da 30 cm si distingue perfettamente il passaggio di tendenza della curva a conducibilità proposta dall'uno all'altro estremo, nell'intervallo di tempo compreso tra 40 minuti e 120 minuti (Figura 4.20). In tale intervallo, la curva a conducibilità proposta si mantiene più bassa delle altre due fornendo, di fatto, tempi più lunghi per il riscaldamento della volta in corrispondenza dello spessore minimo.

4.3.3 Calcolo dei Tempi di Resistenza.

I risultati delle analisi effettuate hanno permesso di calcolare il tempo necessario per raggiungere i valori pari alla temperatura di indebolimento e alla temperatura di inefficacia (Tabella 4.6), in corrispondenza dello spessore minimo. Tali valori del tempo sono stati riportati negli istogrammi di Figura 4.21 e Figura 4.22, nei quali i dati sono stati ordinati in funzione dello spessore della volta a cui si riferiscono.

In tale analisi non si è fatto riferimento alla conducibilità proposta in quanto, per come è stata modellata, essa fornisce tempi pari a quelli forniti dalla conducibilità calcolata per la temperatura di indebolimento e pari a quelli forniti dalla conducibilità costante per la temperatura di inefficacia.

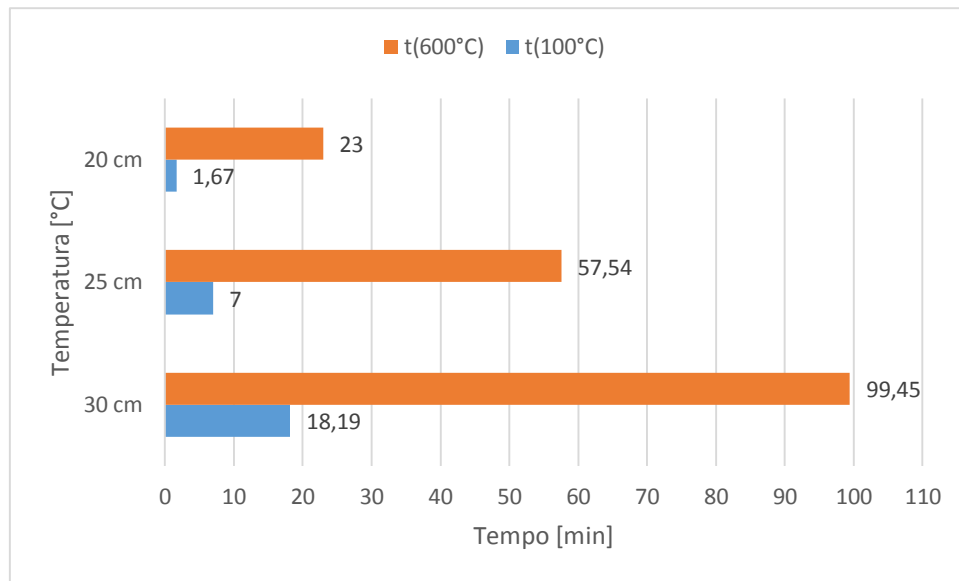


Figura 4.21: Tempi per il Raggiungimento di θ_1 (100°C) e θ_2 (600°C) – Conducibilità Calcolata.

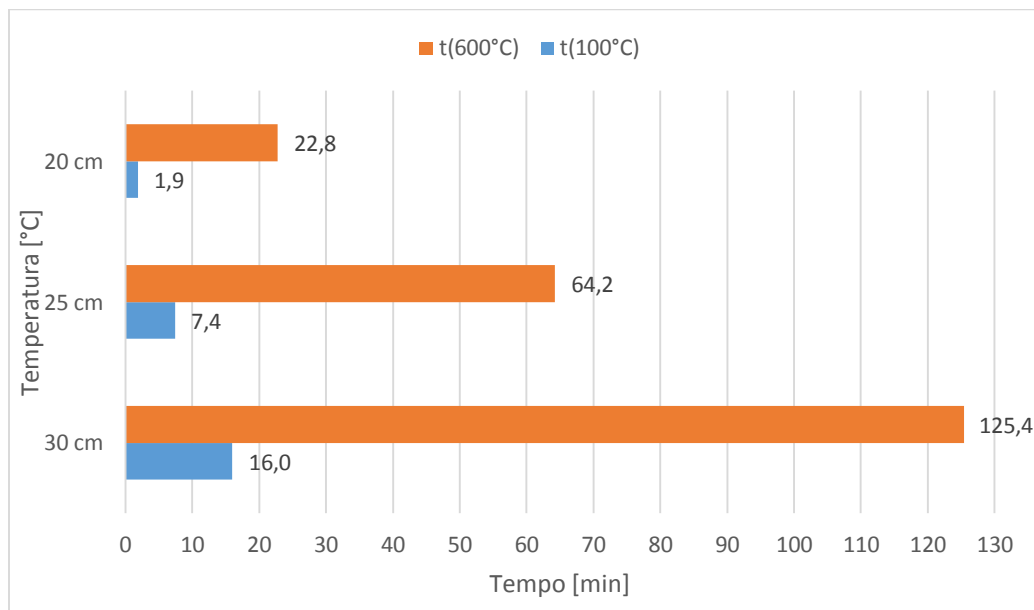


Figura 4.22: Tempi per il Raggiungimento di θ_1 (100°C) e θ_2 (600°C) – Conducibilità Costante.

Dalle Figure si evince che, all'aumentare dello spessore aumenta l'intervallo di tempo tra l'istante in cui si raggiunge la temperatura di indebolimento e quello in cui si raggiunge la temperatura di inefficacia, in corrispondenza dello spessore minimo. Il collasso strutturale della volta non avviene né nel primo né nel secondo, ma ad un istante intermedio tra i due che non è possibile valutare se non conoscendo il valore del parametro c definito nell'Eurocodice 6 e riportato nella Tabella 4.6. Infatti, tale parametro descrive in che modo la resistenza a compressione del materiale costituente si degradi con

l'aumento della temperatura dal valore di indebolimento a quello di inefficacia. Purtroppo, non esistono studi che forniscano i valori di c per la muratura (e in particolare per quella realizzata in pietra leccese) e, per tale ragione, un'analisi di questo tipo non può fornire che l'intervallo di tempo, nella durata dell'incendio, all'interno del quale si avrà la crisi strutturale della volta.

Al fine di valutare meglio l'influenza della conducibilità su tali tempi, è stato elaborato l'istogramma di Figura 4.23, nel quale si confrontano i tempi per il raggiungimento delle diverse temperature, per i diversi spessori di volta, nel caso di conducibilità calcolata e costante.

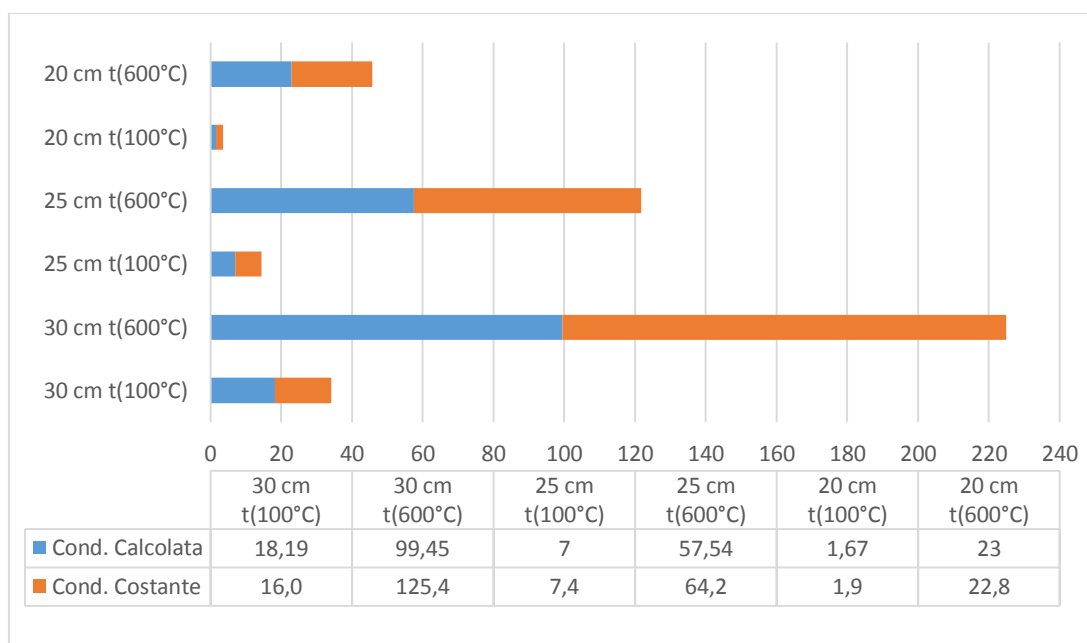


Figura 4.23: Influenza della Conducibilità sui Tempi di Raggiungimento di θ_1 (100°C) e θ_2 (600°C).

L'istogramma mette un'evidenza un'inversione di tendenza sulla distribuzione della temperatura in funzione di spessore e conducibilità. Nel caso di spessore maggiore (30 cm) la temperatura di indebolimento si raggiunge più tardi se si considera la conducibilità calcolata rispetto al caso di conducibilità costante (18,19 minuti invece che 16,0 minuti); invece, accade il contrario con la temperatura di inefficacia che viene raggiunta prima nel caso di conducibilità calcolata (99,45 minuti invece che 125,4 minuti). Nel caso di spessore minore accade il contrario: usare il modello di conducibilità calcolata comporta tempi inferiori per il raggiungimento della temperatura di indebolimento e maggiori per quella di inefficacia rispetto al caso della conducibilità costante (1,67 minuti invece che 1,9 minuti per θ_1 ; 23 minuti invece che 22,8 minuti per θ_2)

4.3.4 Influenza del Bordo.

Osservando le mappe termiche ottenute, come quella di Figura 4.24, si è notato che l'influenza delle condizioni esterne nei pressi del bordo (che sono più accentuate) si risente su una lunghezza minima della volta. Per tale ragione, si sono svolte alcune indagini al fine di quantificare questa influenza.

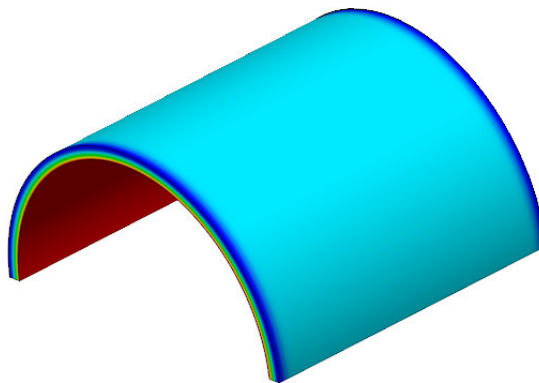


Figura 4.24: *Mappa Termica Volta a Botte – Influenza del Bordo – Spessore 20 cm, 180 minuti.*

In primo luogo, si è verificato se l'influenza del bordo sulla mappatura termica fosse costante per tutta la durata della prova o subisse variazioni. Dalla mappatura termica della volta lungo la sezione longitudinale, Figura 4.25, si nota come, lungo tutta l'estensione della volta, tale influenza sia circoscritta ad una regione ben definita della volta, che si è mantenuta sempre costante. Infatti, la zona alle estremità è caratterizzata da valori di temperatura che sono minimi esattamente in corrispondenza del bordo e che crescono in maniera costante allontanandosi da quest'ultimo, fino ad attestarsi intorno ad un valore costante una volta che ci si trovi ad una determinata distanza.

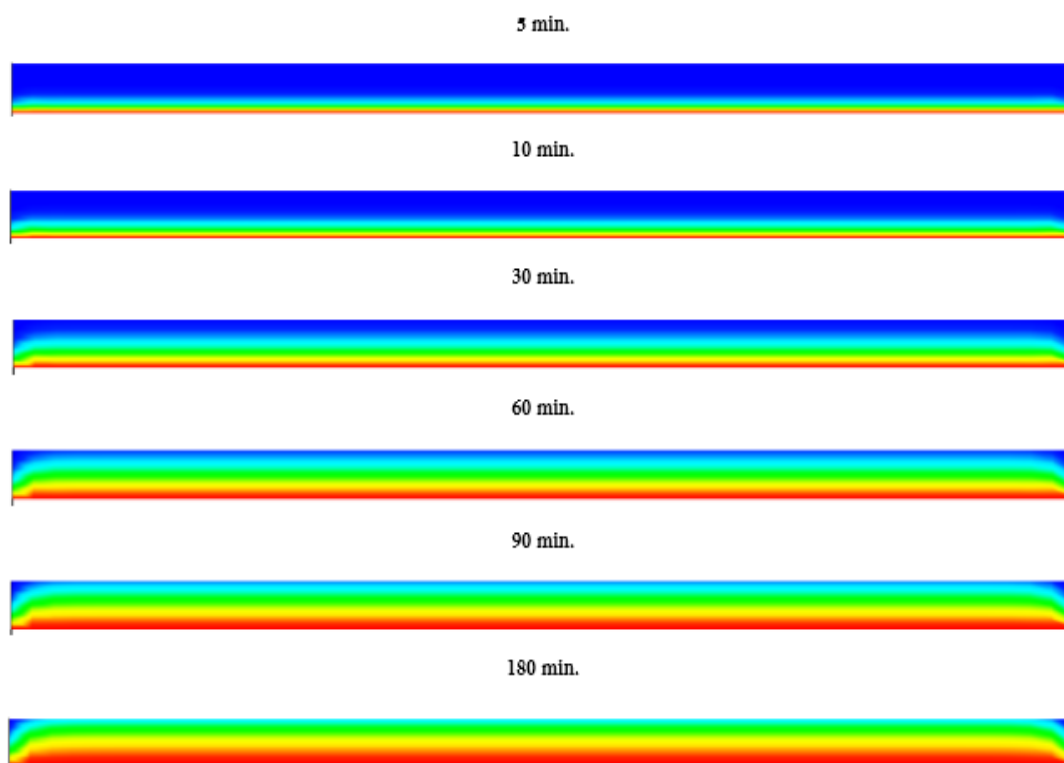


Figura 4.25: *Influenza del Bordo – Sezione Longitudinale della Volta.*

Sul grafico di Figura 4.26 sono riportati gli andamenti della temperatura in funzione della distanza dal bordo, in corrispondenza dello spessore minimo, per diversi istanti dell'incendio. I dati sono quelli relativi alla volta a botte da 20 cm.

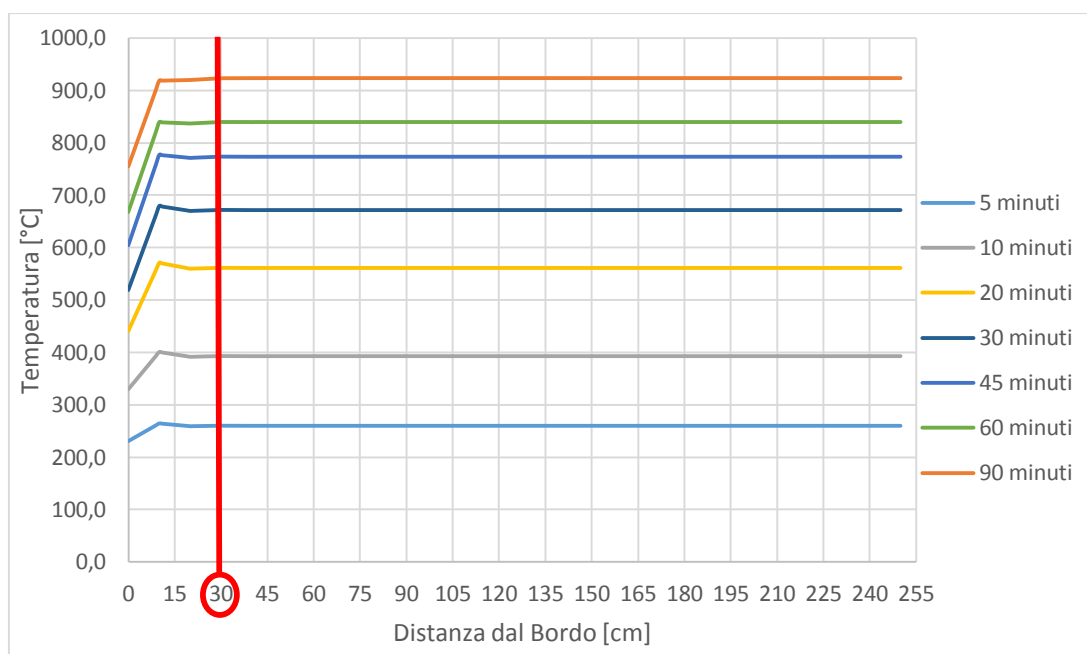


Figura 4.26: *Andamento della Temperatura in funzione della Distanza dal Bordo – Spessore Minimo.*

Gli andamenti di Figura 4.26 evidenzia come il diverso comportamento osservato in corrispondenza del bordo, ad ogni istante dell'incendio, sia riferito sempre la medesima porzione di volta. Nel caso di volta da 20 cm, si ottiene che tale porzione è compresa tra il bordo e 30 cm dallo stesso.

Si è, poi, voluto verificare se l'influenza del bordo subisse variazioni al variare dello spessore della volta. Il grafico di Figura 4.27 riporta gli andamenti della temperatura in funzione della distanza dal bordo, in corrispondenza dello spessore minimo e dopo una durata di 30 minuti, per tutti gli spessori di volta considerati.

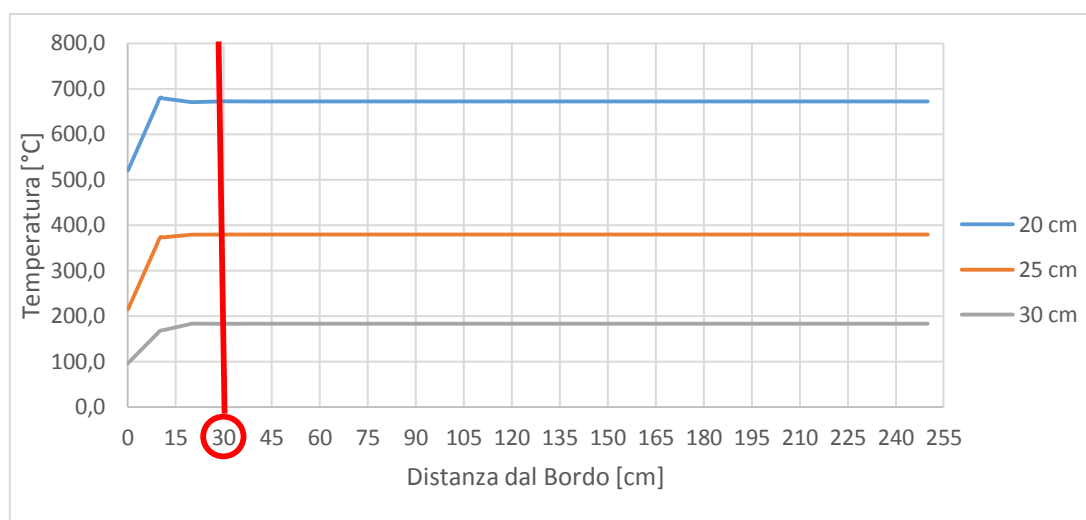


Figura 4.27: Andamento della Temperatura in funzione della Distanza dal Bordo – Influenza Spessore Volta.

Dal grafico si evince che, anche nel caso di spessori diversi, l'influenza del bordo non varia al variare dello spessore della volta.

4.3.5 Influenza della Luce della Volta a Botte.

Al fine di analizzare il comportamento della volta a botte al variare della sua luce, a parità di spessore, sono stati realizzati altri modelli agli elementi finiti da cui si sono ricavate le mappe termiche. In particolare, le ulteriori analisi sono state realizzate su volte a botte di spessore pari a 30 cm e luce di 4,5 m e 4 m. La volontà di effettuare tale tipo di verifica nasce dal fatto che lo spessore minimo che garantisce stabilità alla volta diminuisce al diminuire della luce della stessa, come mostrato nel seguito.

4.3.5.1 Volta a Botte da 4,5 m.

Come prima cosa, è stato calcolato lo spessore minimo che garantisce stabilità alla volta di luce pari a 4,5 m attraverso lo stesso procedimento adottato al paragrafo 4.2.3. In Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30 si riportano i risultati ottenuti.

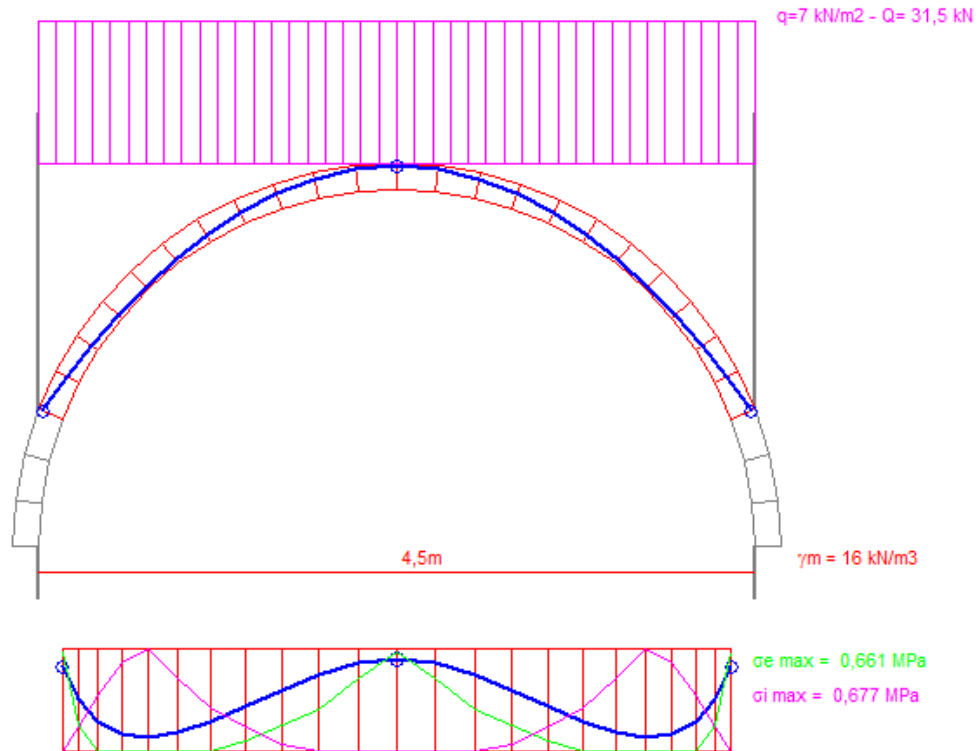


Figura 4.28: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 16 cm.

$$\sigma_{max} = 0,677 \text{ MPa} \leq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

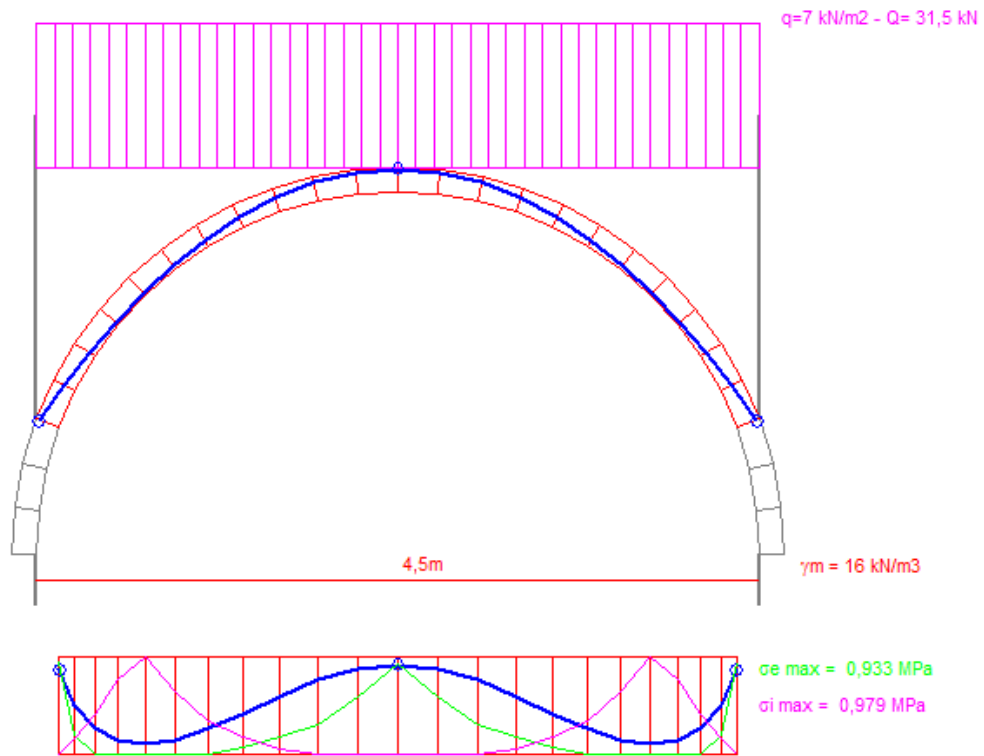


Figura 4.29: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 15 cm.

$$\sigma_{\text{max}} = 0,979 \text{ MPa} \leq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

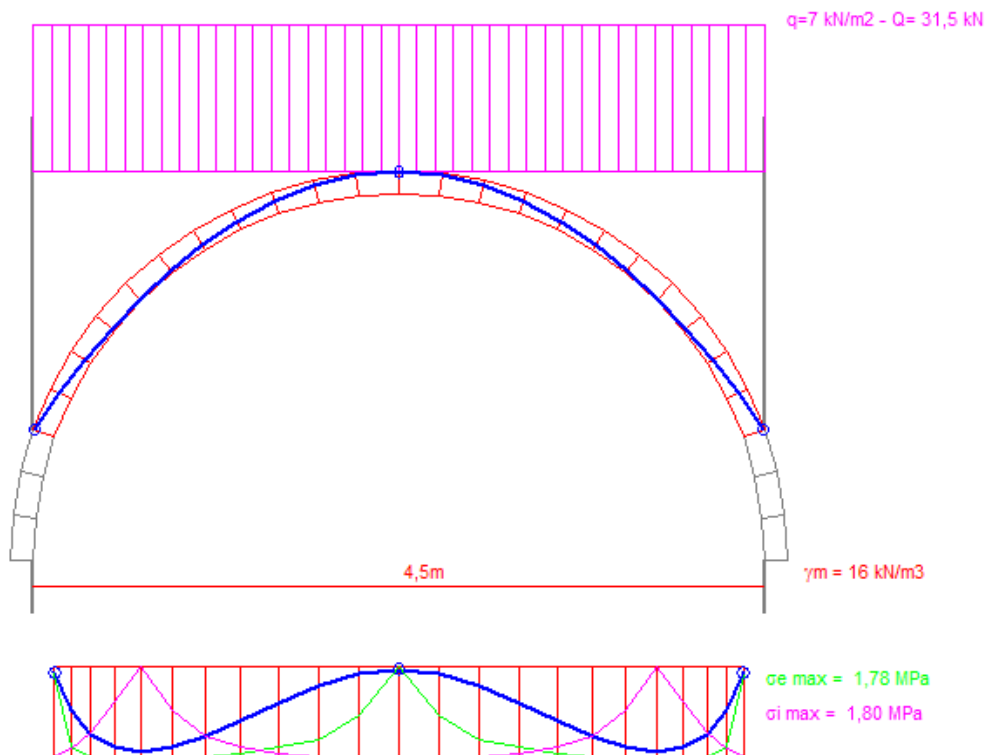


Figura 4.30: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 14 cm.

$$\sigma_{\text{max}} = 1,8 \text{ MPa} \geq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

Per uno spessore di 14 cm la tensione massima all'interno della volta risulta maggiore alla resistenza considerata. Pertanto, si considera uno spessore minimo pari a 15 cm. Effettuando l'analisi termica con il software MIDAS FEA se n'è ottenuta la relativa mappa; in Figura 4.31 si confronta la ISO 834 (corrispondente alla temperatura dei punti sulla superficie interna della volta) con l'andamento della temperatura in corrispondenza dello spessore minimo.

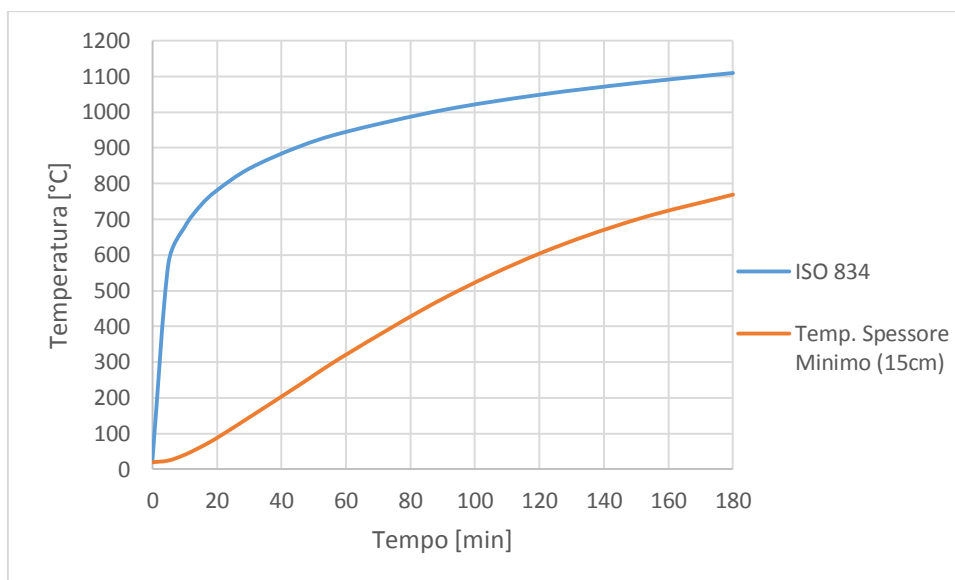


Figura 4.31: Confronto tra Temperatura in corrispondenza dei Punti della Superficie Interna e dello Spessore Minimo della Volta – Luce 4,5 m.

Tale andamento è molto meno brusco rispetto a quello descritto dalla ISO 834 e che corrisponde alla temperatura dei punti all'intradosso della volta.

4.3.5.2 Volta a Botte da 4 m.

Come nel caso precedente, è stato calcolato lo spessore minimo che garantisce stabilità alla volta di luce pari a 4 m attraverso lo stesso procedimento adottato al paragrafo 4.2.3. In Figura 4.32, Figura 4.33, Figura 4.34 si riportano i risultati ottenuti.

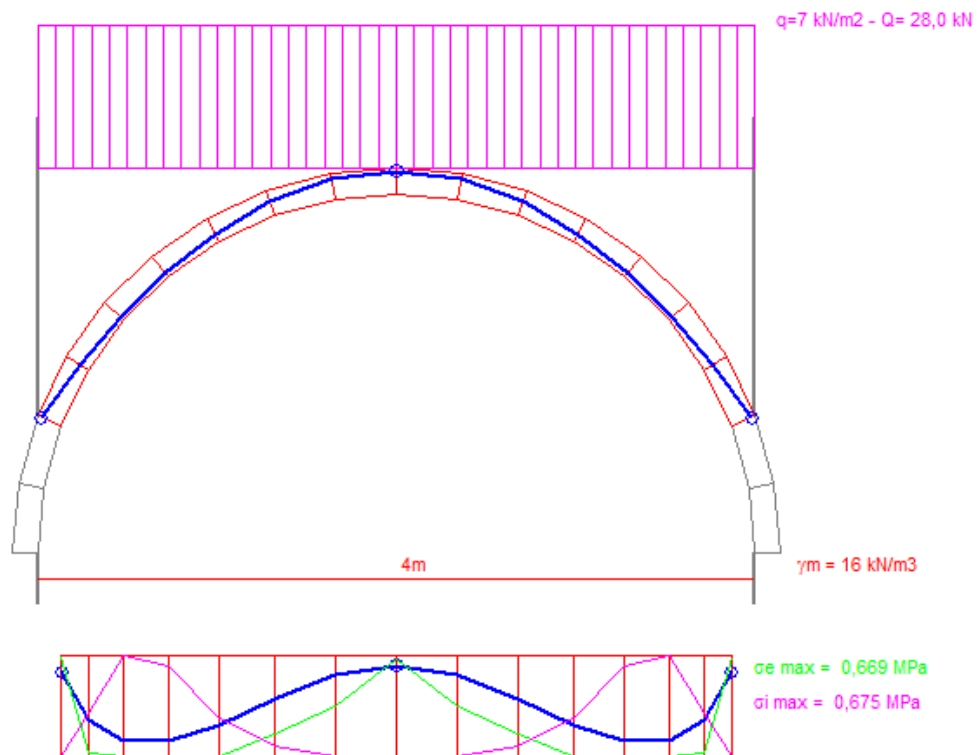


Figura 4.32: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 14 cm.

$$\sigma_{max} = 0,675 \text{ MPa} \leq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

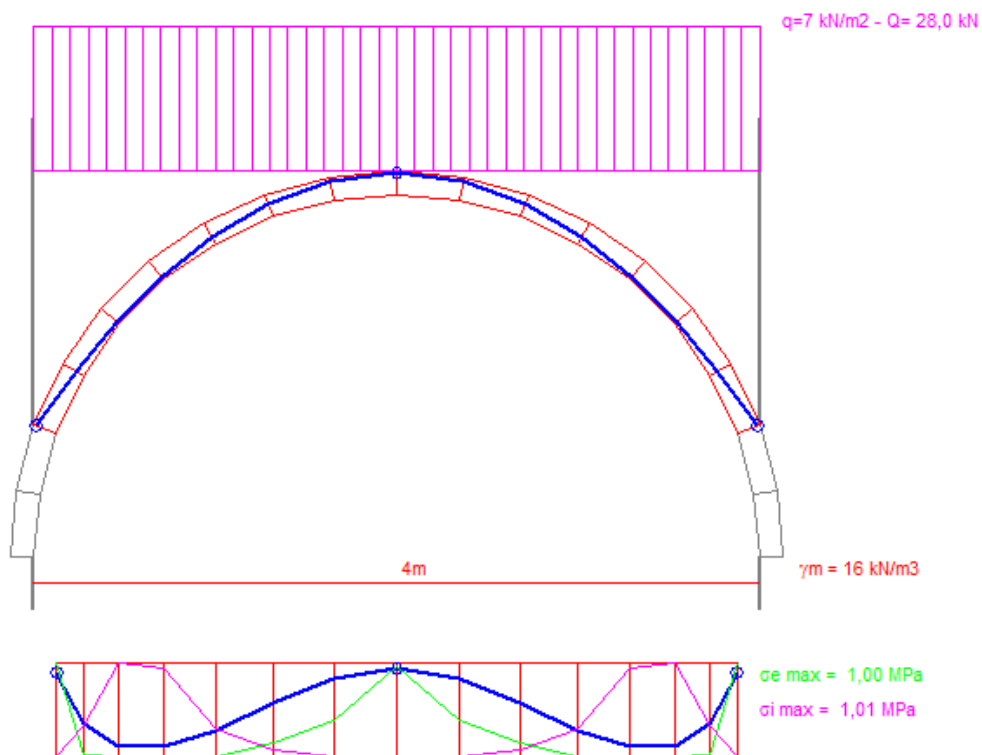


Figura 4.33: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 13 cm.

$$\sigma_{max} = 1,01 \text{ MPa} \leq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

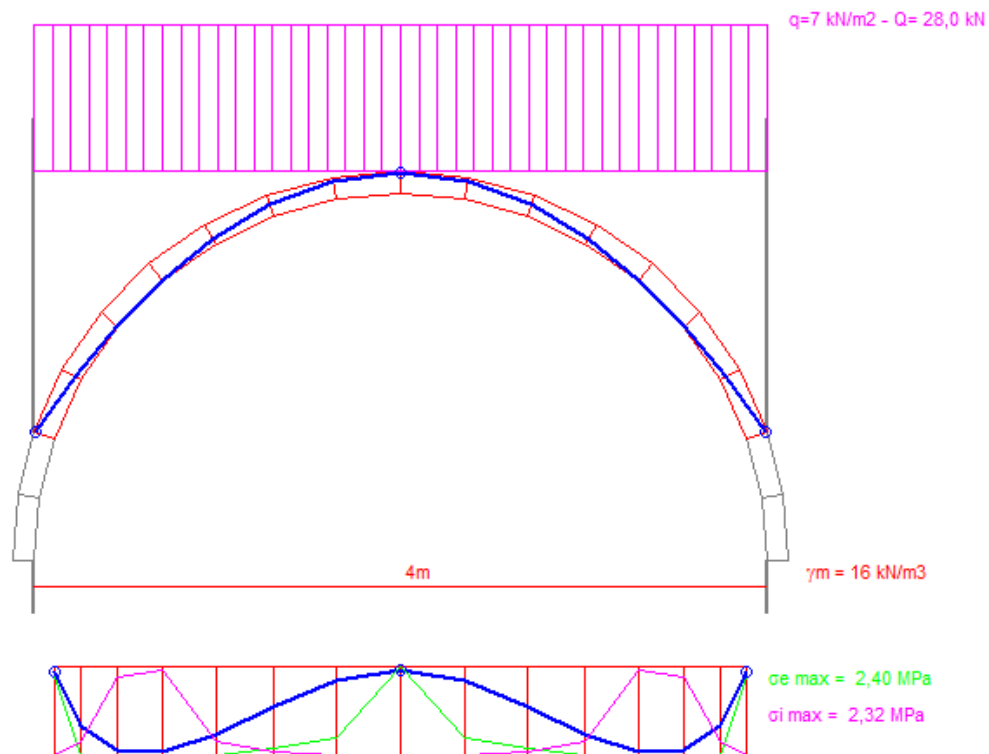


Figura 4.34: Sollecitazione Massima Volta a Botte da 12 cm.

$$\sigma_{max} = 2,4 \text{ MPa} \geq f_d = 1,04 \text{ MPa}$$

Per uno spessore di 12 cm la tensione massima all'interno della volta risulta maggiore alla resistenza considerata. Pertanto, si considera uno spessore minimo pari a 13 cm. Effettuando l'analisi termica con il software MIDAS FEA se n'è ottenuta la relativa mappa; in Figura 4.35 si confronta la ISO 834 (corrispondente alla temperatura dei punti sulla superficie interna della volta) con l'andamento della temperatura in corrispondenza dello spessore minimo. Anche in questo caso, più che nel precedente, tale andamento è molto meno brusco rispetto a quello descritto dalla ISO 834 e che corrisponde alla temperatura dei punti all'intradosso della volta.

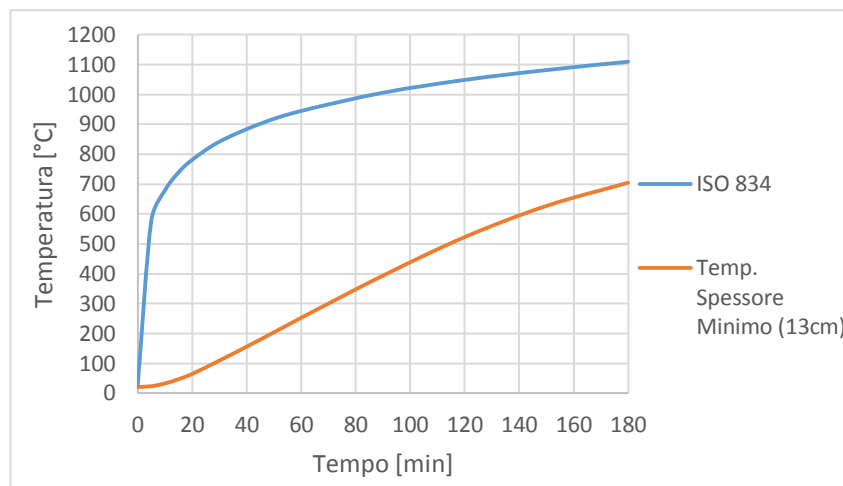


Figura 4.35: *Confronto tra Temperatura in corrispondenza dei Punti della Superficie Interna e dello Spessore Minimo della Volta – Luce 4 m.*

4.3.5.3 Risultati.

In Figura 4.36 si riporta un confronto tra gli andamenti di temperatura, in corrispondenza dello spessore minimo, per tutte le luci considerate nel presente lavoro di tesi.

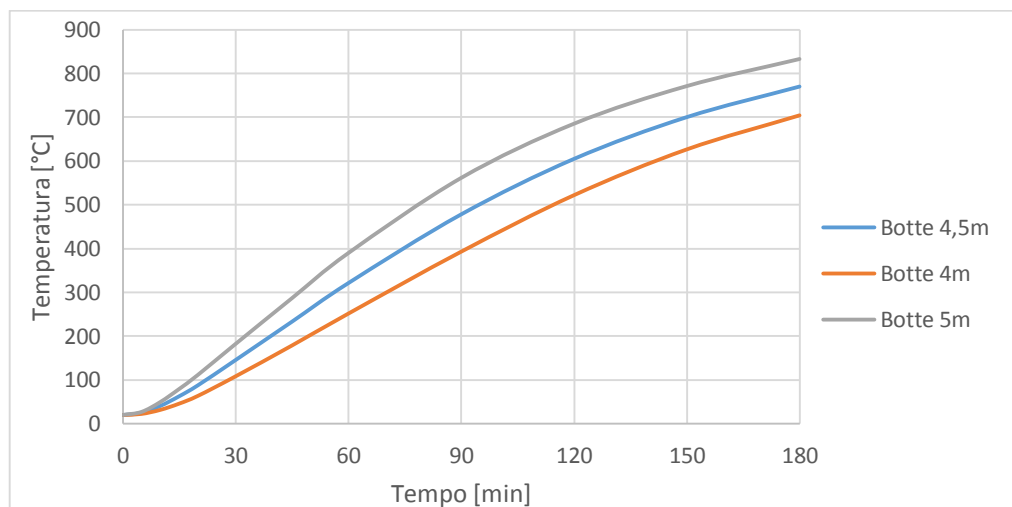


Figura 4.36: *Temperatura in corrispondenza dello Spessore Minimo per diversi Valori di Luce.*

Analizzando la figura 4.36 si nota che la luce della volta a botte è un parametro che influenza in maniera considerevole la soluzione del problema di tali strutture soggette a carico d'incendio. Al fine di quantificarne l'entità, attraverso i dati ottenuti dalla mappatura termica, è stata elaborata la Tabella 4.8 che riporta i tempi necessari per il raggiungimento della temperatura di indebolimento e di inefficacia per volte a botte di spessore pari a 30 cm e luce di 5 m, 4,5 m, e 4 m. L'istogramma riportato in Figura 4.37 rappresenta è una rappresentazione grafica di tale tabella.

Tabella 4.8: Tempi per il Raggiungimento della Temperatura di Indebolimento e di Inefficacia.

Spessore	5 m	4,5 m	4 m
t(100°C) [min.]	18,19	22,13	28,16
t(600°C) [min.]	99,45	119	142,5

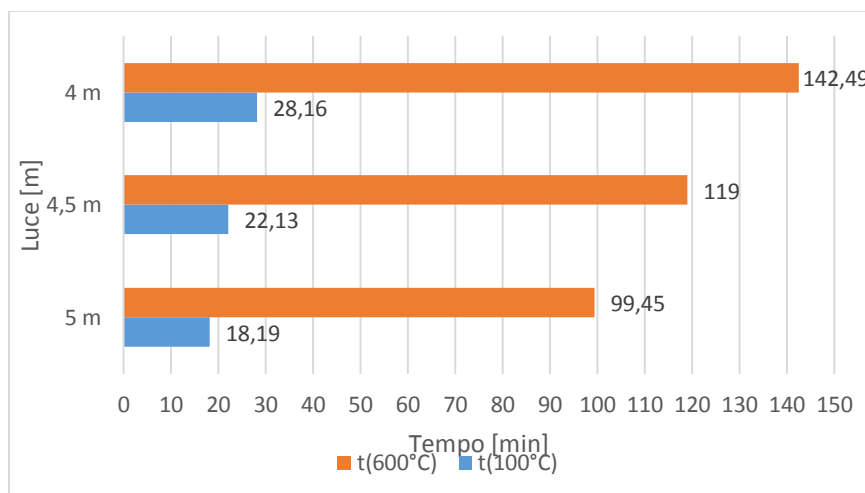


Figura 4.37: Confronto Tempi per il Raggiungimento della Temperatura di Indebolimento e di Inefficacia.

Una riduzione della luce del 20% (da 5 m a 4 m) consente alla volta a botte una tempo di esposizione più lungo all'incendio prima che, in corrispondenza del proprio spessore minimo, si raggiungano le temperature di indebolimento (aumento del 35% circa) e di inefficacia (aumento del 30% circa). Ciò è dovuto al fatto che la riduzione di luce comporta automaticamente una diminuzione dello spessore minimo necessario a garantire la stabilità della volta.

4.4 Confronti

Ulteriori analisi sono state effettuate al fine di confrontare i risultati ottenuti, attraverso la metodologia utilizzata nel presente lavoro di tesi, con quelli ricavati in un precedente lavoro di tesi, (Elia, 2013).

In (Elia, 2013) è stata modellata una volta a botte di luce pari a 4 m e spessore pari a 20 cm, soggetta agli stessi carichi verticali e costituita da materiali aventi le stesse proprietà meccaniche e termiche dei modelli qui presentati tranne che per il caso della conducibilità termica; infatti, si considera un valore di conducibilità pari a $1,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Un'ulteriore differenza con l'approccio utilizzato nel presente lavoro di tesi sta nel fatto in (Elia, 2013) è stato modellato il carico termico dovuto all'incendio come somma di due contributi: un flusso termico di convezione e uno di irraggiamento. Per tale ragione, al fine di effettuare

un'analisi quanto più simile, si è deciso di imporre un andamento della temperatura dei punti interni alla volta non più pari a quello ottenuto dalla ISO 834: se n'è ricavato uno nuovo a partire dai dati estrapolati nel precedente lavoro di tesi.

Tabella 4.9: *ISO 834 e Nuova Curva d'Incendio applicata alla Superficie Interna della Volta.*

Tempo [min]	Curva Ricavata (Elia, 2013) [°C]	ISO 834 [°C]
0	20	20
5	59,8	576
10	108	678
15	153,3	739
20	153,3	781
30	285,5	842
45	398,5	902
60	484,6	945
90	608,8	1006
120	683,1	1049
150	732	1082
180	768	1110

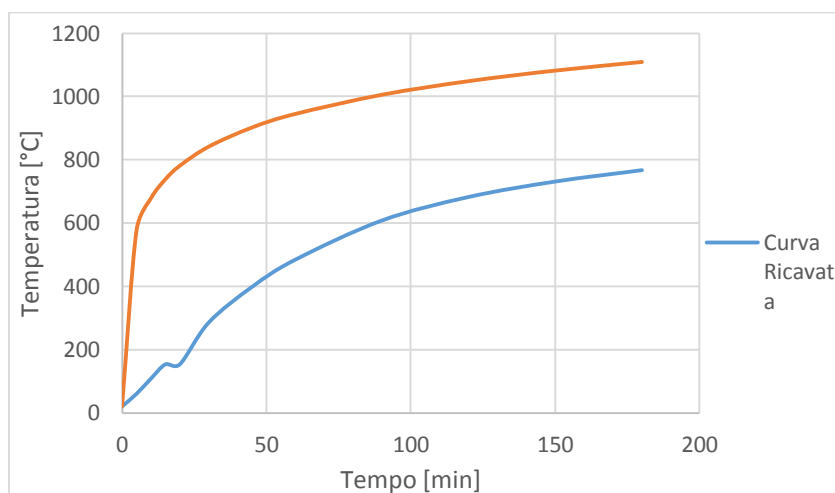


Figura 4.38: *Confronto tra ISO 834 e Nuova Curva d'Incendio applicata alla Superficie Interna della Volta.*

Il confronto che si propone è quello tra i tempi necessari per il raggiungimento della temperatura di inefficacia in corrispondenza dello spessore minimo (che per entrambe è di 13 cm), che in (Elia, 2013) è stato ha stimato pari a 88 minuti.

L'analisi termica, effettuata sia con conducibilità calcolata che con conducibilità costante, ha permesso di ricavare le relative mappe. In Tabella 4.10 si riportano i valori della temperatura, nell'uno e nell'altro caso, in corrispondenza dello spessore minimo.

Tabella 4.10: Valori della Temperatura in Corrispondenza dello Spessore Minimo.

Tempo [min.]	Temperatura Spessore Minimo [°C]	
	Cond. Calcolata	Cond. Costante
0	20,0	20,0
5	76,1	101,9
10	117,4	145,8
15	149,7	182,3
20	178,7	217,3
30	236,8	271,9
45	334,6	384,5
60	433,3	464,5
90	612,0	592,4
120	734,5	672,1
150	814,0	723,8
180	867,4	757,9

I valori appena presentati sono riportati nel grafico di Figura 4.39, nel quale si evidenziano i tempi necessari per il raggiungimento della temperatura di inefficacia, i quali sono riportati, con maggior precisione, anche in Tabella 4.11.

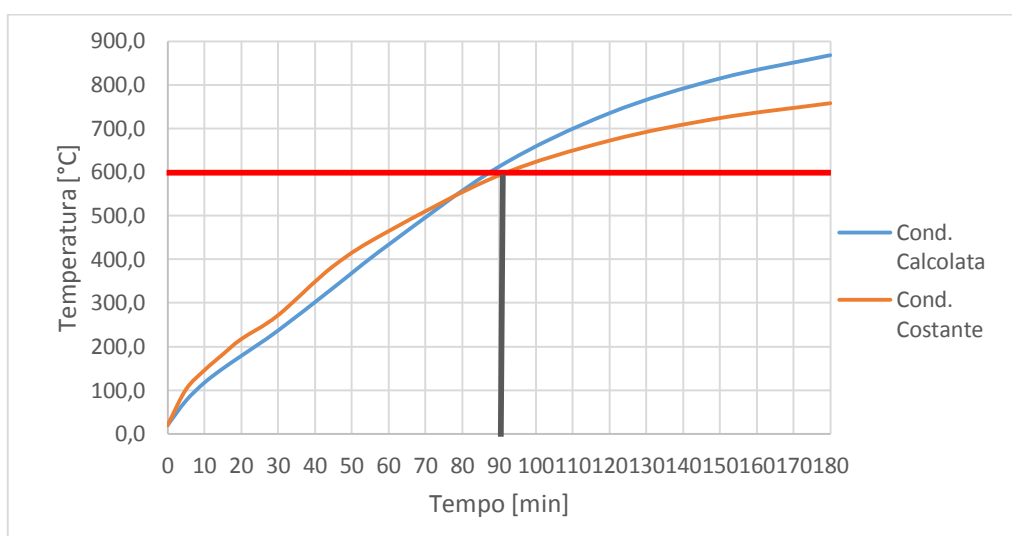


Figura 4.39: Andamento della Temperatura in Corrispondenza dello Spessore Minimo.

Tabella 4.11: Tempi per il Raggiungimento della Temperatura di Inefficacia.

t (600°C) [min.]	
Cond. Calcolata	Cond. Costante
87,98	92,8

Si evince, quindi, che i tempi ottenuti sono coerenti con quello ottenuto in (Elia, 2013).

5 Conclusioni e Sviluppi Futuri.

Allo stato attuale, le normative non forniscono strumenti per la valutazione della resistenza al fuoco di elementi di copertura costituiti da volte in muratura. Per tale ragione, l'obiettivo perseguito nella realizzazione del presente lavoro di tesi è stato di analizzare alcuni aspetti che influenzano la distribuzione della temperatura all'interno delle volte a botte.

Le analisi illustrate, effettuate sui dati dalle mappe termiche elaborate attraverso il software di calcolo MIDAS FEA, hanno permesso di individuare un intervallo all'interno del quale ricade il tempo di resistenza delle volte a botte in muratura in pietra leccese.

In primo luogo, è stata condotta un'indagine sperimentale al fine di valutare la conducibilità termica della pietra leccese. In seguito, sono state valutate le modalità con cui alcuni parametri influenzano la distribuzione della temperatura; tali parametri sono: la conducibilità termica, lo spessore della volta, la distanza dal bordo, la luce della volta. Infine si sono confrontati alcuni dei risultati ottenuti con quelli di un lavoro di tesi precedente condotto da Elia (2013).

Alla luce dei risultati ottenuti dalla misurazione della conducibilità termica della pietra leccese si possono trarre le conclusioni riportate di seguito. La conducibilità termica del materiale a temperatura ambiente (20°C) risulta pari a 1 W/mK. Tale valore subisce un degrado all'aumentare della temperatura fino al valore di circa 0,71 W/mK intorno alla temperatura di 300°C. Le misurazioni non sono andate oltre tale valore, tuttavia, calcolando la linea di tendenza dei risultati ottenuti si è potuto calcolare il valore della conducibilità fino a 1100°C.

In tutte le analisi, dunque, si è scelto di utilizzare tre modelli differenti di tale parametro: un primo andamento costante per tutta la durata dell'incendio e pari a 1 W/mK, un secondo andamento dato alla linea di tendenza calcolata (perfettamente corrispondente ad una polinomiale di terzo grado), un andamento intermedio tra i due precedenti. In particolare, quest'ultimo segue l'andamento del primo, fino a circa 700°C, per poi discostarsene e tendere gradualmente al secondo per temperature maggiori.

Dai risultati ottenuti dall'analisi dell'influenza dello spessore della volta sulla distribuzione di temperatura, all'interno della stessa, si può concludere che: all'aumentare dello spessore aumenta il tempo necessario affinché in corrispondenza dello spessore minimo, che garantisce stabilità alla volta, si raggiunga la temperatura di indebolimento e, successivamente, quella di inefficacia. Ciò avviene perché l'ampiezza dello spessore minimo dipende esclusivamente dal carico verticale applicato. Di fatto, aumentando lo

spessore della volta a botte si allontana dall'esposizione delle fiamme la fibra della volta in corrispondenza dello spessore minimo e ciò si traduce in una migliore prestazione della struttura.

Le analisi dell'influenza della conducibilità del materiale sulla distribuzione di temperatura all'interno della volta hanno permesso di trarre le conclusioni riportate di seguito. La conducibilità considerata influenza sensibilmente la mappa termica ottenuta, soprattutto nel caso di spessori maggiori. Infatti, nel caso di volta da 20 cm, indipendentemente dalla conducibilità considerata, non vi sono sostanziali differenze di temperatura in corrispondenza dello spessore minimo 40 minuti, per poi iniziare ad allontanarsi (quando le temperature sono ormai molto elevate). Invece, nel caso di volta da 30 cm le differenze si notano già dai primissimi minuti d'incendio: osservando la curva di temperatura ottenuta per conducibilità calcolata si nota come essa sia a tratti maggiore e a tratti minore di quella ottenuta a conducibilità costante. Infatti, essa, nei primissimi minuti d'incendio, si mantiene più alta (la temperatura in corrispondenza dello spessore minimo aumenta più in fretta), per poi incrociare prima dei 20 minuti la curva a conducibilità costante e restarne al di sotto (la temperatura in corrispondenza dello spessore minimo aumenta più lentamente). La situazione si inverte nuovamente a circa 50 minuti: istante in cui la curva a conducibilità calcolata incrocia e supera nuovamente la curva a conducibilità costante, mantenendosi più alta di quest'ultima fino alla fine dell'incendio. A 180 minuti la differenza di temperatura che si ottiene in corrispondenza dello spessore minimo utilizzando l'una o l'altra curva è di oltre 100°C.

I risultati che si ottengono dall'utilizzo del modello di conducibilità proposta sono coincidenti con quelli ottenuti con la curva a conducibilità calcolata, durante la prima parte dell'incendio, e con quelli ottenuti considerando la conducibilità costante, nell'ultima parte. Tale comportamento intermedio è tanto più accentuato quanto più è sottile lo spessore della volta.

La validità del modello di conducibilità proposta richiede comunque una validazione attraverso misure sperimentali del parametro a temperature più alte di quelle considerate nella indagine condotta all'interno del presente lavoro di tesi.

I risultati ottenuti dall'analisi dell'influenza della distanza dal bordo sulla distribuzione di temperatura, si possono trarre le conclusioni riportate di seguito. Il bordo rappresenta una zona particolare a causa della maggior superficie esposta alla convezione dell'aria esterna, a temperatura di 20 °C. Ciò si traduce in temperature più basse nei pressi di tale zona. Le analisi condotte hanno avuto l'obiettivo di mostrare l'estensione di questa zona;

in particolare, si è evidenziato che l'influenza del bordo si ripercuote fino ad una distanza massima di 30 cm dallo stesso. Oltre tale valore, il valore della temperatura non risente di alcun effetto e i risultati sono paragonabili a quelli che si otterrebbero nel caso ideale di volta di lunghezza infinita. Considerando che il bordo provoca un abbassamento della temperatura e che in questo tipo di analisi ci si interessa alle temperature più alte (caso critico), si conclude che il problema potrebbe essere studiato attraverso un modello agli elementi finiti bidimensionale e non tridimensionale. Ciò comporterebbe un risparmio in termini di oneri computazionali; inoltre, si potrebbero modellare con più cura elementi che nel modello tridimensionale sono stati trascurati per non allungare i tempi di calcolo (presenza di acqua nella muratura, materiale di riempimento, intonaco, etc.).

Dalle analisi sull'influenza della luce della volta sulla distribuzione di temperatura all'interno della stessa, si possono trarre le seguenti conclusioni: all'aumentare della luce della volta diminuisce il tempo necessario affinché si raggiungano le temperature di indebolimento e di inefficacia in corrispondenza dello spessore minimo. In realtà si tratta di una conseguenza indiretta: infatti, all'aumentare della luce aumenta anche lo spessore minimo necessario a garantire la stabilità della volta. Quindi, una luce maggiore si traduce in una maggiore esposizione alle alte temperature della fibra in corrispondenza dello spessore minimo. In particolare, si è constatato che una riduzione della luce del 20% (da 5 m a 4 m) consente alla volta a botte un tempo di esposizione più lungo all'incendio prima che, in corrispondenza del proprio spessore minimo, si raggiungano le temperature di indebolimento (aumento del 35% circa) e di inefficacia (aumento del 30% circa).

Dal confronto tra i risultati ottenuti con l'approccio seguito nel presente lavoro di tesi e quelli disponibili in letteratura (Elia, 2013 – spessore volta 20 cm, luce volta 4 m, conducibilità pietra 1,7 W/mK) si traggono le conclusioni riportate di seguito. Il tempo necessario al raggiungimento della temperatura di inefficacia nel caso di Elia è stato di 88 minuti. Tal risultato è in linea con quello ottenuto nel presente lavoro: infatti, nel caso di conducibilità calcolata si è ottenuto un tempo pari a 87,98 minuti, mentre, nel caso di conducibilità costante si è ottenuto un tempo di 92,8 minuti. Inoltre, la vicinanza dei risultati per conducibilità tanto diversi è in linea con quanto detto prima sull'influenza di tale parametro e dello spessore della volta: l'influenza della conducibilità è rilevante per grandi spessori di volta, ma non nel caso di spessori nell'ordine dei 20 cm.

Gli sviluppi futuri per la prosecuzione del lavoro iniziato sono molteplici e possono coinvolgere due aspetti: il materiale e il modello agli elementi finiti.

Dal punto di vista del materiale, sarebbe auspicabile intraprendere indagini che tengano in considerazione la presenza della malta ed eventuale i meccanismi di rottura a causa della crisi di quest'ultima. Inoltre, si rende necessaria una ricerca che indaghi sull'effettiva resistenza della muratura in pietra leccese all'aumentare della temperatura. Ciò permetterebbe di calcolare sperimentalmente i valori della temperatura di indebolimento e di inefficacia e, di conseguenza, si avrebbero risultati più realistici. Ancora più utile sarebbe la misura, all'aumentare della temperatura, del decadimento di tutte le proprietà del materiale: sia quelle meccaniche (modulo elastico, coefficiente di Poisson, resistenza a trazione, etc.) che quelle termiche (calore specifico, densità, etc.). Infine, un fattore che potrebbe rivelarsi influente potrebbe essere quello della presenza di acqua all'interno della muratura sotto forma di umidità, che nel presente lavoro è stato trascurato.

Per quanto concerne il modello agli elementi finiti, invece, sarebbe interessante proseguire le analisi sulla modellazione dei carichi permanenti non strutturali, quali l'intonaco il materiale di riempimento. Infine, sarebbe auspicabile anche una modellazione d'incendio come somma dei contributi di due flussi di calore: uno di convezione (a causa dei gas caldi che si sprigionano) e uno di irraggiamento.

APPENDICE A: Misura Sperimentale della Conducibilità Termica.

Si riportano i dati relativi alle misure sperimentali della conducibilità termica (cfr. paragrafo 4.1.1).

Tabella A.1: *Misure di Conducibilità ed Elaborazione dei Dati.*

Temperatura [°C]	Campione1 [W/mK]	Media [W/mK]	Dev. Standard	COV	Campione2 [W/mK]	Media [W/mK]	Dev. Standard	COV
20	1,041	1,0378	0,0085	0,82%	1,049	1,060	0,0069	0,66%
	1,032				1,067			
	1,032				1,063			
	1,033				1,063			
	1,051				1,056			
100	0,915	0,9156	0,0005	0,06%	0,937	0,937	0,0051	0,55%
	0,916				0,929			
	0,915				0,937			
	0,916				0,940			
	0,916				0,941			
200	0,785	0,7886	0,0022	0,28%	0,810	0,813	0,0021	0,26%
	0,788				0,813			
	0,790				0,811			
	0,791				0,815			
	0,790				0,815			
300	0,707	0,7086	0,0008	0,12%	0,727	0,729	0,0020	0,28%
	0,708				0,728			
	0,709				0,730			
	0,709				0,731			
	0,709				0,731			

Tabella A.2: *Andamenti della Conducibilità in Funzione della Temperatura.*

Temperatura [°C]	Conducibilità [W/mK]		
	Conducibilità Calcolata	Conducibilità Costante	Conducibilità Proposta
20	1,050	1	1,050
100	0,924	1	0,924
200	0,792	1	0,792
300	0,700	1	0,700
400	0,660	1	0,660
500	0,684	1	0,684
600	0,784	1	0,784
700	0,972	1	0,972
800	1,260	1	1
900	1,660	1	1
1000	2,184	1	1
1100	2,844	1	1

APPENDICE B: Analisi Termiche.

Si riportano i risultati relativi alle mappe termiche ottenute dalle analisi termiche per i vari casi considerati.

Tabella B.1: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 20 cm; Conducibilità Calcolata.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	470,5	583,1	655,1	707,0	785,1	859,0	910,0	978,5	1025,3	1060,4	1089,5
2	20,0	364,9	488,2	571,1	633,0	728,2	816,0	874,9	950,9	1001,7	1038,8	1068,9
3	20,0	259,4	393,3	487,2	559,1	671,3	773,1	839,9	923,4	978,0	1017,2	1048,4
4	20,0	153,9	298,3	403,3	485,1	614,3	730,1	804,8	895,8	954,4	995,6	1027,9
5	20,0	130,4	254,8	348,8	424,9	551,3	674,9	759,1	861,0	925,0	969,1	1002,9
6	20,0	107,0	211,2	294,3	364,7	488,3	619,8	713,5	826,1	895,7	942,6	977,9
7	20,0	83,5	167,6	239,9	304,5	425,3	564,6	667,8	791,2	866,4	916,1	952,8
8	20,0	60,0	124,0	185,4	244,3	362,2	509,5	622,2	756,3	837,0	889,5	927,8
9	20,0	53,3	108,3	162,5	215,4	323,0	460,8	571,5	711,7	798,5	855,1	895,3
10	20,0	46,5	92,6	139,5	186,5	283,8	412,2	520,7	667,1	760,0	820,6	862,7
11	20,0	39,7	76,8	116,6	157,6	244,6	363,6	470,0	622,5	721,5	786,1	830,1
12	20,0	33,0	61,1	93,7	128,7	205,4	314,9	419,3	577,9	683,0	751,6	797,5
13	20,0	30,8	55,1	83,8	115,3	185,0	285,0	380,4	529,7	633,6	703,7	751,8
14	20,0	28,7	49,0	73,9	101,8	164,6	255,0	341,6	481,5	584,2	655,8	706,0
15	20,0	26,6	43,0	64,0	88,3	144,3	225,1	302,8	433,3	534,8	607,9	660,3
16	20,0	24,4	37,0	54,1	74,8	123,9	195,2	263,9	385,1	485,4	560,0	614,5
17	20,0	23,8	34,9	50,1	68,7	113,1	177,4	238,8	346,3	435,6	502,9	553,2
18	20,0	23,2	32,7	46,2	62,7	102,4	159,6	213,7	307,6	385,8	445,8	491,9
19	20,0	22,6	30,6	42,2	56,7	91,7	141,8	188,5	268,8	336,0	388,6	430,6
20	20,0	22,0	28,5	38,2	50,6	80,9	124,0	163,4	230,0	286,2	331,5	369,3

Tabella B.2: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 20 cm; Conducibilità Costante.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	462,2	601,0	662,6	713,0	781,3	849,9	896,7	963,0	1006,4	1040,1	1067,1
2	20,0	348,4	524,1	586,2	645,1	720,7	797,9	848,4	919,9	963,8	998,1	1024,1
3	20,0	234,6	447,1	509,8	577,1	660,0	745,8	800,1	876,9	921,2	956,2	981,2
4	20,0	120,8	370,2	433,4	509,2	599,3	693,7	751,8	833,8	878,6	914,2	938,3
5	20,0	100,2	309,5	384,4	455,1	551,4	647,5	710,2	792,9	839,5	873,3	898,0
6	20,0	79,5	248,9	335,4	401,1	503,5	601,3	668,6	752,0	800,3	832,4	857,7
7	20,0	58,9	188,2	286,4	347,0	455,5	555,1	627,0	711,1	761,2	791,5	817,5
8	20,0	38,3	127,6	237,4	292,9	407,6	508,8	585,4	670,1	722,1	750,5	777,2
9	20,0	34,5	107,7	203,6	260,0	369,5	473,2	548,0	634,2	683,8	712,8	737,3
10	20,0	30,8	87,8	169,8	227,1	331,4	437,6	510,7	598,3	645,6	675,1	697,4
11	20,0	27,1	67,9	136,0	194,3	293,4	402,0	473,3	562,3	607,3	637,3	657,6
12	20,0	23,3	48,0	102,2	161,4	255,3	366,4	436,0	526,4	569,0	599,6	617,7
13	20,0	22,6	42,7	88,3	141,4	231,4	337,7	405,9	492,4	534,0	562,4	580,2
14	20,0	22,0	37,4	74,4	121,5	207,4	308,9	375,9	458,4	499,0	525,2	542,7
15	20,0	21,3	32,1	60,5	101,6	183,5	280,2	345,9	424,4	464,0	488,1	505,3
16	20,0	20,6	26,8	46,6	81,7	159,5	251,4	315,8	390,3	429,0	450,9	467,8
17	20,0	20,5	25,7	42,6	73,7	145,4	230,6	290,4	359,6	395,3	415,6	431,1
18	20,0	20,4	24,6	38,6	65,6	131,3	209,8	264,9	328,8	361,6	380,3	394,3
19	20,0	20,3	23,4	34,6	57,6	117,2	189,0	239,4	298,1	327,8	345,1	357,6
20	20,0	20,2	22,3	30,6	49,6	103,0	168,2	214,0	267,4	294,1	309,8	320,8

Tabella B.3: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 20 cm; Conducibilità Proposta.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	470,5	583,1	655,1	707,0	780,7	849,7	897,4	962,5	1007,9	1042,0	1070,3
2	20,0	364,9	488,2	571,1	633,0	719,4	797,4	849,9	919,0	966,8	1002,0	1030,5
3	20,0	259,4	393,3	487,2	559,1	658,1	745,2	802,3	875,5	925,7	962,1	990,8
4	20,0	153,9	298,3	403,3	485,1	596,8	692,9	754,8	832,0	884,6	922,1	951,0
5	20,0	130,4	254,8	348,8	424,9	535,9	639,7	708,8	792,3	846,4	884,4	913,2
6	20,0	107,0	211,2	294,3	364,7	475,0	586,4	662,9	752,7	808,2	846,8	875,4
7	20,0	83,5	167,6	239,9	304,5	414,1	533,2	617,0	713,0	770,0	809,2	837,7
8	20,0	60,0	124,0	185,4	244,3	353,2	480,0	571,1	673,3	731,7	771,6	799,9
9	20,0	53,3	108,3	162,5	215,4	315,4	434,9	524,4	630,4	692,6	733,9	762,7
10	20,0	46,5	92,6	139,5	186,5	277,6	389,9	477,7	587,4	653,4	696,2	725,6
11	20,0	39,7	76,8	116,6	157,6	239,8	344,8	431,1	544,4	614,2	658,5	688,4
12	20,0	33,0	61,1	93,7	128,7	202,0	299,7	384,4	501,5	575,0	620,9	651,2
13	20,0	30,8	55,1	83,8	115,3	182,2	271,8	349,9	459,7	530,6	575,8	606,0
14	20,0	28,7	49,0	73,9	101,8	162,3	243,9	315,5	417,8	486,1	530,8	560,8
15	20,0	26,6	43,0	64,0	88,3	142,4	216,0	281,0	376,0	441,7	485,8	515,6
16	20,0	24,4	37,0	54,1	74,8	122,5	188,1	246,5	334,2	397,3	440,8	470,4
17	20,0	23,8	34,9	50,1	68,7	111,9	171,2	223,6	301,7	357,9	396,4	423,2
18	20,0	23,2	32,7	46,2	62,7	101,4	154,2	200,6	269,2	318,4	352,1	375,9
19	20,0	22,6	30,6	42,2	56,7	90,8	137,3	177,7	236,7	279,0	307,8	328,6
20	20,0	22,0	28,5	38,2	50,6	80,2	120,4	154,7	204,2	239,5	263,5	281,4

Tabella B.4: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 25 cm; Conducibilità Calcolata.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	481,3	588,7	656,9	706,8	782,3	856,8	908,3	978,0	1025,8	1061,4	1091,0
2	20,0	387,7	500,4	575,6	633,3	723,3	812,0	872,1	950,2	1002,8	1041,1	1072,2
3	20,0	294,1	412,1	494,4	559,9	664,3	767,3	835,8	922,5	979,8	1020,7	1053,5
4	20,0	200,5	323,8	413,2	486,5	605,3	722,6	799,5	894,8	956,8	1000,3	1034,7
5	20,0	108,0	236,6	332,9	414,0	547,0	678,4	763,7	867,3	934,1	980,2	1016,1
6	20,0	94,1	205,2	291,3	365,3	490,6	622,5	714,5	830,3	904,0	954,4	992,6
7	20,0	80,4	174,1	250,1	317,2	434,9	567,2	665,9	793,6	874,3	928,8	969,3
8	20,0	66,7	143,1	208,9	269,1	379,1	511,9	617,2	757,0	844,6	903,3	946,0
9	20,0	53,0	112,1	167,8	221,0	323,4	456,7	568,6	720,3	814,8	877,7	922,7
10	20,0	39,4	81,4	127,1	173,5	268,3	402,0	520,5	684,1	785,5	852,5	899,7
11	20,0	36,4	72,7	113,0	154,7	241,4	364,9	476,6	639,1	746,0	817,9	868,4
12	20,0	33,5	64,1	99,1	136,1	214,7	328,2	433,2	594,6	706,9	783,7	837,6
13	20,0	30,5	55,6	85,3	117,5	188,1	291,5	389,7	550,0	667,9	749,5	806,7
14	20,0	27,5	47,0	71,4	98,9	161,4	254,8	346,3	505,5	628,9	715,4	775,8
15	20,0	24,6	38,5	57,6	80,6	135,1	218,5	303,4	461,5	590,3	681,6	745,3
16	20,0	23,9	35,9	52,7	73,2	122,9	199,7	277,8	424,2	546,3	636,4	701,2
17	20,0	23,2	33,3	47,8	65,9	110,9	181,1	252,6	387,4	502,9	591,8	657,6
18	20,0	22,5	30,7	43,0	58,6	98,9	162,6	227,4	350,5	459,5	547,1	614,0
19	20,0	21,8	28,2	38,1	51,4	86,8	144,0	202,1	313,6	416,0	502,5	570,4
20	20,0	21,1	25,6	33,3	44,2	75,0	125,6	177,2	277,2	373,1	458,4	527,3
21	20,0	21,0	24,9	31,8	41,5	69,5	115,7	162,7	253,0	339,1	415,5	477,9
22	20,0	20,8	24,2	30,2	38,9	64,2	106,0	148,3	229,0	305,4	373,1	429,1
23	20,0	20,7	23,6	28,7	36,3	58,8	96,2	134,0	205,1	271,7	330,7	380,3
24	20,0	20,5	22,9	27,2	33,7	53,4	86,5	119,6	181,2	238,0	288,3	331,5
25	20,0	20,4	22,2	25,7	31,1	48,1	76,8	105,4	157,5	204,8	246,4	283,3

Tabella B.5: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 25 cm; Conducibilità Costante.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	474,0	601,3	665,6	713,7	782,3	849,5	896,8	963,7	1009,2	1043,5	1071,6
2	20,0	373,2	525,5	593,1	647,2	723,2	797,5	849,2	921,9	969,9	1005,4	1033,7
3	20,0	272,4	449,7	520,5	580,6	664,2	745,5	801,5	880,2	930,6	967,4	995,7
4	20,0	171,6	373,9	448,0	514,1	605,1	693,6	753,9	838,4	891,2	929,3	957,8
5	20,0	72,0	298,9	376,2	448,3	546,7	642,2	706,8	797,1	852,4	891,7	920,3
6	20,0	62,4	252,3	332,7	401,5	501,5	598,9	666,3	759,2	816,2	855,6	884,4
7	20,0	53,0	206,2	289,6	355,2	456,7	556,1	626,2	721,8	780,5	819,9	848,9
8	20,0	43,6	160,0	246,5	308,9	412,0	513,3	586,2	684,4	744,7	784,2	813,4
9	20,0	34,2	113,9	203,4	262,5	367,3	470,4	546,1	647,0	709,0	748,5	777,8
10	20,0	24,9	68,4	160,8	216,8	323,1	428,1	506,5	610,0	673,7	713,3	742,8
11	20,0	24,0	59,9	138,6	192,0	292,2	396,3	473,9	577,7	640,6	680,1	708,7
12	20,0	23,1	51,6	116,6	167,5	261,8	364,8	441,7	545,8	608,0	647,3	675,0
13	20,0	22,2	43,3	94,6	142,9	231,3	333,4	409,5	513,9	575,3	614,5	641,3
14	20,0	21,3	35,0	72,6	118,4	200,8	301,9	377,3	482,0	542,6	581,7	607,6
15	20,0	20,5	26,8	50,9	94,2	170,7	270,8	345,4	450,4	510,4	549,3	574,3
16	20,0	20,4	25,6	45,8	83,0	153,9	248,9	321,5	422,7	481,0	518,1	542,4
17	20,0	20,3	24,4	40,6	72,0	137,3	227,3	297,8	395,3	451,9	487,4	510,8
18	20,0	20,2	23,2	35,5	60,9	120,8	205,6	274,1	367,9	422,8	456,6	479,3
19	20,0	20,1	22,0	30,4	49,9	104,2	184,0	250,4	340,5	393,8	425,8	447,7
20	20,0	20,0	20,9	25,4	38,9	87,8	162,6	227,0	313,5	365,1	395,4	416,6
21	20,0	20,0	20,7	24,5	36,2	80,3	149,8	209,5	290,3	338,1	366,5	386,0
22	20,0	20,0	20,6	23,7	33,5	72,9	137,1	192,2	267,3	311,4	337,9	355,7
23	20,0	20,0	20,4	22,9	30,8	65,5	124,5	174,9	244,4	284,7	309,4	325,5
24	20,0	20,0	20,3	22,0	28,1	58,0	111,8	157,6	221,5	258,1	280,8	295,2
25	20,0	20,0	20,2	21,2	25,5	50,7	99,3	140,5	198,8	231,7	252,6	265,4

Tabella B.6: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 25 cm; Conducibilità Proposta.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	481,3	588,7	656,9	706,6	778,9	849,5	897,7	963,6	1009,6	1044,6	1073,6
2	20,0	387,7	500,4	575,6	633,1	716,5	797,7	850,9	921,6	970,7	1007,7	1037,6
3	20,0	294,1	412,1	494,4	559,6	654,1	745,8	804,1	879,7	931,7	970,7	1001,6
4	20,0	200,5	323,8	413,2	486,0	591,7	693,9	757,3	837,7	892,8	933,7	965,7
5	20,0	108,0	236,6	332,9	413,3	530,0	642,7	711,0	796,3	854,3	897,2	930,1
6	20,0	94,1	205,2	291,3	364,8	476,0	589,5	663,8	756,9	818,7	862,9	896,3
7	20,0	80,4	174,1	250,1	316,8	422,6	537,0	617,1	718,0	783,6	828,9	862,9
8	20,0	66,7	143,1	208,9	268,8	369,2	484,4	570,5	679,1	748,4	795,0	829,5
9	20,0	53,0	112,1	167,8	220,8	315,9	431,9	523,8	640,2	713,2	761,0	796,2
10	20,0	39,4	81,4	127,1	173,4	263,1	380,0	477,7	601,8	678,5	727,5	763,2
11	20,0	36,4	72,7	113,0	154,6	236,9	345,6	438,2	560,9	640,2	692,1	729,1
12	20,0	33,5	64,1	99,1	136,1	211,0	311,6	399,2	520,6	602,3	657,1	695,5
13	20,0	30,5	55,6	85,3	117,5	185,1	277,7	360,2	480,2	564,5	622,2	661,8
14	20,0	27,5	47,0	71,4	98,9	159,2	243,7	321,1	439,8	526,7	587,2	628,1
15	20,0	24,6	38,5	57,6	80,6	133,6	210,2	282,6	399,9	489,3	552,7	594,9
16	20,0	23,9	35,9	52,7	73,2	121,6	192,4	259,5	368,8	453,0	513,5	555,1
17	20,0	23,2	33,3	47,8	65,9	109,8	174,8	236,6	337,9	417,1	474,9	515,7
18	20,0	22,5	30,7	43,0	58,6	98,0	157,2	213,8	307,1	381,2	436,2	476,3
19	20,0	21,8	28,2	38,1	51,4	86,1	139,6	190,9	276,3	345,3	397,6	436,9
20	20,0	21,1	25,6	33,3	44,2	74,5	122,2	168,4	245,9	309,9	359,4	398,0
21	20,0	21,0	24,9	31,8	41,5	69,1	112,7	154,8	225,1	282,8	327,4	362,1
22	20,0	20,8	24,2	30,2	38,9	63,8	103,3	141,4	204,6	256,0	295,7	326,7
23	20,0	20,7	23,6	28,7	36,3	58,5	94,0	128,0	184,0	229,2	264,1	291,2
24	20,0	20,5	22,9	27,2	33,7	53,2	84,6	114,6	163,5	202,4	232,5	255,8
25	20,0	20,4	22,2	25,7	31,1	47,9	75,3	101,3	143,2	176,0	201,2	220,8

Tabella B.7: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 30 cm; Conducibilità Calcolata.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	485,8	604,5	669,6	716,4	784,4	850,8	898,0	964,7	1011,0	1046,0	1074,9
2	20,0	395,7	531,0	600,2	651,7	726,8	799,6	850,9	923,4	973,0	1009,9	1039,8
3	20,0	305,5	457,6	530,8	587,1	669,2	748,4	803,9	882,1	935,0	973,9	1004,7
4	20,0	215,4	384,1	461,5	522,4	611,6	697,2	756,9	840,9	897,0	937,9	969,5
5	20,0	125,2	310,6	392,1	457,8	554,0	646,0	709,8	799,6	859,0	901,9	934,4
6	20,0	35,1	237,1	322,7	393,1	496,5	594,8	662,8	758,3	821,0	865,8	899,3
7	20,0	32,6	203,1	286,1	353,5	455,8	555,2	624,8	723,0	787,5	833,2	867,1
8	20,0	30,2	169,1	249,5	313,9	415,2	515,5	586,8	687,6	754,0	800,5	834,8
9	20,0	27,7	135,0	213,0	274,3	374,6	475,9	548,8	652,3	720,4	767,9	802,6
10	20,0	25,3	101,0	176,4	234,7	334,0	436,3	510,8	616,9	686,9	735,2	770,4
11	20,0	22,9	67,0	139,8	195,1	293,3	396,6	472,8	581,6	653,4	702,6	738,1
12	20,0	20,4	32,9	103,3	155,5	252,7	357,0	434,8	546,3	619,8	669,9	705,9
13	20,0	20,3	30,9	90,4	138,4	229,1	330,1	406,7	517,7	591,0	640,9	676,5
14	20,0	20,3	28,8	77,6	121,3	205,5	303,2	378,7	489,2	562,2	611,8	647,0
15	20,0	20,2	26,8	64,8	104,1	181,9	276,3	350,7	460,7	533,4	582,8	617,5
16	20,0	20,1	24,7	51,9	87,0	158,3	249,4	322,7	432,2	504,6	553,8	588,1
17	20,0	20,1	22,7	39,1	69,9	134,7	222,5	294,7	403,7	475,8	524,7	558,6
18	20,0	20,0	20,6	26,3	52,8	111,1	195,6	266,6	375,2	447,0	495,7	529,2
19	20,0	20,0	20,5	25,3	47,8	100,6	179,8	248,2	353,1	422,8	469,9	502,3
20	20,0	20,0	20,4	24,3	42,8	90,1	164,0	229,7	331,0	398,7	444,1	475,5
21	20,0	20,0	20,3	23,3	37,8	79,6	148,2	211,3	308,9	374,5	418,3	448,7
22	20,0	20,0	20,2	22,3	32,8	69,0	132,4	192,8	286,8	350,3	392,5	421,8
23	20,0	20,0	20,1	21,3	27,9	58,5	116,6	174,3	264,7	326,1	366,8	395,0
24	20,0	20,0	20,0	20,3	22,9	48,0	100,7	155,9	242,6	302,0	341,0	368,2
25	20,0	20,0	20,0	20,3	22,5	44,7	93,4	144,7	225,9	281,4	318,0	343,3
26	20,0	20,0	20,0	20,2	22,0	41,3	86,1	133,6	209,3	260,9	295,0	318,5
27	20,0	20,0	20,0	20,2	21,6	37,9	78,8	122,4	192,6	240,3	272,1	293,7
28	20,0	20,0	20,0	20,1	21,2	34,6	71,5	111,2	176,0	219,7	249,1	268,9
29	20,0	20,0	20,0	20,1	20,7	31,2	64,2	100,1	159,3	199,2	226,1	244,1
30	20,0	20,0	20,0	20,0	20,3	27,9	56,9	88,9	142,6	178,6	203,1	219,3

Tabella B.8: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 30 cm; Conducibilità Costante.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	492,1	596,0	661,5	709,2	782,0	855,6	907,6	977,8	1025,9	1062,0	1092,0
2	20,0	408,2	514,1	583,9	637,4	722,0	809,2	870,1	949,6	1002,9	1042,0	1074,0
3	20,0	324,3	432,1	506,4	565,7	662,0	762,8	832,7	921,4	979,8	1022,1	1055,9
4	20,0	240,5	350,2	428,9	493,9	602,1	716,4	795,3	893,2	956,7	1002,1	1037,9
5	20,0	156,6	268,2	351,4	422,1	542,1	670,0	757,8	865,0	933,7	982,1	1019,9
6	20,0	72,7	186,2	273,8	350,3	482,1	623,6	720,4	836,8	910,6	962,1	1001,9
7	20,0	65,3	164,2	242,8	312,5	435,2	571,9	671,0	797,8	879,7	936,2	978,9
8	20,0	57,9	142,2	211,8	274,7	388,2	520,2	621,6	758,8	848,8	910,3	956,0
9	20,0	50,5	120,2	180,7	236,9	341,3	468,5	572,2	719,8	817,9	884,3	933,1
10	20,0	43,1	98,1	149,7	199,1	294,4	416,8	522,8	680,8	787,0	858,4	910,2
11	20,0	35,6	76,1	118,7	161,4	247,5	365,1	473,4	641,9	756,1	832,5	887,3
12	20,0	28,2	54,1	87,7	123,6	200,6	313,4	423,9	602,9	725,2	806,5	864,4
13	20,0	27,1	49,6	79,4	111,7	182,3	286,8	389,9	561,6	685,4	771,4	833,3
14	20,0	25,9	45,2	71,1	99,8	164,0	260,1	355,9	520,3	645,6	736,3	802,2
15	20,0	24,8	40,7	62,8	87,9	145,7	233,5	321,8	479,0	605,9	701,2	771,0
16	20,0	23,7	36,3	54,5	76,0	127,3	206,8	287,8	437,7	566,1	666,1	739,9
17	20,0	22,5	31,8	46,2	64,1	109,0	180,2	253,7	396,5	526,3	631,1	708,8
18	20,0	21,4	27,4	37,9	52,2	90,7	153,5	219,7	355,2	486,6	596,0	677,7
19	20,0	21,2	26,4	35,6	48,5	83,6	141,7	203,2	329,2	452,1	556,5	636,9
20	20,0	21,0	25,5	33,4	44,7	76,5	129,9	186,7	303,3	417,6	516,9	596,1
21	20,0	20,8	24,5	31,2	40,9	69,3	118,0	170,2	277,3	383,0	477,4	555,4
22	20,0	20,6	23,5	29,0	37,2	62,2	106,2	153,6	251,4	348,5	437,9	514,6
23	20,0	20,4	22,6	26,8	33,4	55,0	94,4	137,1	225,4	314,0	398,4	473,8
24	20,0	20,2	21,6	24,6	29,7	47,9	82,6	120,6	199,5	279,5	358,9	433,0
25	20,0	20,2	21,4	24,0	28,6	45,2	77,2	112,2	184,5	257,5	329,6	396,8
26	20,0	20,2	21,2	23,5	27,6	42,6	71,7	103,7	169,5	235,5	300,2	360,6
27	20,0	20,1	21,0	23,0	26,5	40,0	66,3	95,3	154,6	213,4	270,8	324,3
28	20,0	20,1	20,8	22,5	25,5	37,3	60,9	86,8	139,6	191,4	241,5	288,1
29	20,0	20,1	20,6	22,0	24,5	34,7	55,4	78,3	124,7	169,4	212,1	251,9
30	20,0	20,1	20,4	21,4	23,4	32,0	50,0	69,9	109,7	147,4	182,7	215,6

Tabella B.9: *Temperatura in funzione del Tempo – Spessore 30 cm; Conducibilità Proposta.*

Punto [cm]	Temperatura [°C]											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20,0	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20,0	492,1	596,0	661,5	709,2	779,6	849,5	898,7	964,8	1011,2	1046,5	1076,0
2	20,0	408,2	514,1	583,9	637,4	717,2	797,0	852,4	923,6	973,5	1011,0	1042,0
3	20,0	324,3	432,1	506,4	565,7	654,9	744,5	806,1	882,5	935,7	975,5	1008,0
4	20,0	240,5	350,2	428,9	493,9	592,5	692,0	759,8	841,3	897,9	940,0	974,0
5	20,0	156,6	268,2	351,4	422,1	530,1	639,6	713,6	800,1	860,2	904,6	940,0
6	20,0	72,7	186,2	273,8	350,3	467,7	587,1	667,3	758,9	822,4	869,1	906,1
7	20,0	65,3	164,2	242,8	312,5	422,7	538,8	620,8	720,1	788,2	837,3	875,2
8	20,0	57,9	142,2	211,8	274,7	377,6	490,6	574,4	681,2	754,0	805,6	844,4
9	20,0	50,5	120,2	180,7	236,9	332,6	442,3	528,0	642,4	719,7	773,8	813,6
10	20,0	43,1	98,1	149,7	199,1	287,5	394,1	481,5	603,6	685,5	742,0	782,7
11	20,0	35,6	76,1	118,7	161,4	242,5	345,8	435,1	564,7	651,3	710,3	751,9
12	20,0	28,2	54,1	87,7	123,6	197,5	297,6	388,7	525,9	617,0	678,5	721,1
13	20,0	27,1	49,6	79,4	111,7	179,5	272,7	358,4	490,2	581,1	644,5	689,2
14	20,0	25,9	45,2	71,1	99,8	161,6	247,9	328,1	454,6	545,3	610,4	657,4
15	20,0	24,8	40,7	62,8	87,9	143,7	223,1	297,8	418,9	509,4	576,3	625,5
16	20,0	23,7	36,3	54,5	76,0	125,8	198,3	267,6	383,2	473,5	542,2	593,7
17	20,0	22,5	31,8	46,2	64,1	107,9	173,5	237,3	347,6	437,6	508,1	561,8
18	20,0	21,4	27,4	37,9	52,2	90,0	148,7	207,0	311,9	401,7	474,1	530,0
19	20,0	21,2	26,4	35,6	48,5	83,0	137,4	191,8	290,0	374,3	442,9	496,4
20	20,0	21,0	25,5	33,4	44,7	75,9	126,1	176,6	268,1	347,0	411,7	462,8
21	20,0	20,8	24,5	31,2	40,9	68,8	114,8	161,4	246,2	319,7	380,5	429,2
22	20,0	20,6	23,5	29,0	37,2	61,8	103,5	146,2	224,3	292,3	349,3	395,7
23	20,0	20,4	22,6	26,8	33,4	54,7	92,2	131,0	202,4	265,0	318,1	362,1
24	20,0	20,2	21,6	24,6	29,7	47,7	80,9	115,8	180,5	237,7	286,9	328,5
25	20,0	20,2	21,4	24,0	28,6	45,1	75,6	107,8	167,3	219,7	264,7	302,5
26	20,0	20,2	21,2	23,5	27,6	42,4	70,4	99,8	154,2	201,7	242,4	276,4
27	20,0	20,1	21,0	23,0	26,5	39,8	65,1	91,8	141,0	183,8	220,1	250,4
28	20,0	20,1	20,8	22,5	25,5	37,2	59,8	83,8	127,8	165,8	197,9	224,4
29	20,0	20,1	20,6	22,0	24,5	34,6	54,6	75,8	114,7	147,8	175,6	198,3
30	20,0	20,1	20,4	21,4	23,4	32,0	49,3	67,8	101,5	129,9	153,3	172,3

APPENDICE C: Influenza del Bordo.

Tabelle relative alle analisi sull'influenza del bordo (cfr. paragrafo 4.3.4)

Tabella C.1: *Valori della Temperatura in funzione del Tempo Volta a Botte da 20 cm di spessore.*

Distanza dal Bordo [cm]	Temperatura [°C]						
	5 min.	10 min.	20 min.	30 min.	45 min.	60 min.	90 min.
0	230,0	329,3	440,9	519,6	604,8	667,8	755,2
1	233,4	336,5	453,9	535,5	622,0	685,0	771,5
2	236,8	343,7	467,0	551,4	639,2	702,1	787,9
3	240,2	350,9	480,0	567,3	656,3	719,3	804,2
4	243,6	358,1	493,1	583,3	673,5	736,4	820,5
5	247,0	365,3	506,1	599,2	690,7	753,6	836,8
6	250,4	372,5	519,2	615,1	707,8	770,8	853,1
7	253,8	379,7	532,2	631,0	725,0	787,9	869,4
8	257,2	386,9	545,3	646,9	742,2	805,1	885,8
9	260,5	394,1	558,3	662,9	759,3	822,2	902,1
10	263,9	401,3	571,4	678,8	776,5	839,4	918,4
11	263,4	400,3	570,3	677,9	775,9	839,2	918,5
12	262,9	399,4	569,1	677,0	775,4	838,9	918,7
13	262,3	398,5	568,0	676,0	774,8	838,7	918,8
14	261,8	397,6	566,9	675,1	774,2	838,5	918,9
15	261,3	396,6	565,8	674,2	773,7	838,2	919,1
16	260,8	395,7	564,7	673,3	773,1	838,0	919,2
17	260,2	394,8	563,6	672,4	772,5	837,7	919,4
18	259,7	393,9	562,5	671,4	772,0	837,5	919,5
19	259,2	392,9	561,4	670,5	771,4	837,3	919,6
20	258,6	392,0	560,2	669,6	770,8	837,0	919,8
21	258,7	392,2	560,4	669,8	771,1	837,3	920,1
22	258,8	392,3	560,6	670,0	771,3	837,6	920,4
23	258,9	392,5	560,7	670,2	771,6	837,9	920,8
24	259,0	392,6	560,9	670,4	771,8	838,2	921,1
25	259,1	392,7	561,1	670,6	772,0	838,5	921,4
26	259,2	392,9	561,2	670,8	772,3	838,8	921,8
27	259,3	393,0	561,4	670,9	772,5	839,0	922,1
28	259,4	393,2	561,6	671,1	772,8	839,3	922,5
29	259,5	393,3	561,7	671,3	773,0	839,6	922,8
30	259,6	393,5	561,9	671,5	773,3	839,9	923,1
31	259,5	393,4	561,9	671,5	773,2	839,9	923,1
32	259,5	393,4	561,8	671,4	773,2	839,9	923,2
33	259,5	393,4	561,8	671,4	773,2	839,9	923,2
34	259,5	393,4	561,8	671,4	773,2	839,9	923,2
35	259,5	393,3	561,8	671,4	773,1	839,9	923,2
36	259,5	393,3	561,7	671,3	773,1	839,8	923,2
37	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,8	923,2
38	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,8	923,3

39	259,4	393,2	561,7	671,2	773,0	839,8	923,3
40	259,4	393,2	561,6	671,2	773,0	839,8	923,3
41	259,4	393,2	561,6	671,2	773,0	839,8	923,3
42	259,4	393,2	561,6	671,2	773,0	839,8	923,3
43	259,4	393,2	561,6	671,2	773,0	839,8	923,3
44	259,4	393,2	561,6	671,2	773,0	839,8	923,3
45	259,4	393,2	561,6	671,2	773,0	839,8	923,3
46	259,4	393,3	561,7	671,2	773,0	839,8	923,3
47	259,4	393,3	561,7	671,2	773,0	839,8	923,4
48	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
49	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
50	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
51	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
52	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
53	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
54	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
55	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
56	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
57	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
58	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
59	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
60	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
61	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
62	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
63	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
64	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
65	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,8	923,4
66	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,9	923,4
67	259,4	393,3	561,7	671,3	773,0	839,9	923,4
68	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
69	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
70	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
71	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
72	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
73	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
74	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
75	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
76	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
77	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
78	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
79	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
80	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
81	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
82	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
83	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
84	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
85	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4

227	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
228	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
229	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
230	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
231	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
232	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
233	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
234	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
235	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
236	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
237	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
238	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
239	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
240	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
241	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
242	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
243	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
244	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
245	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
246	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
247	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
248	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
249	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4
250	259,4	393,3	561,7	671,3	773,1	839,9	923,4

Tabella C.2: *Temperatura a 30 minuti in funzione dello Spessore della Volta a Botte.*

Distanza dal Bordo [cm]	Temperatura [°C]		
	Spessore 20 cm	Spessore 25 cm	Spessore 30 cm
0	519,6	213,9	95,4
1	535,5	229,8	102,5
2	551,4	245,6	109,6
3	567,3	261,4	116,7
4	583,3	277,3	123,8
5	599,2	293,1	131,0
6	615,1	309,0	138,1
7	631,0	324,8	145,2
8	646,9	340,6	152,3
9	662,9	356,5	159,4
10	678,8	372,3	166,5
11	677,9	373,0	168,1
12	677,0	373,6	169,7
13	676,0	374,3	171,3
14	675,1	375,0	172,9
15	674,2	375,6	174,5
16	673,3	376,3	176,0

17	672,4	376,9	177,6
18	671,4	377,6	179,2
19	670,5	378,2	180,8
20	669,6	378,9	182,4
21	669,8	378,9	182,4
22	670,0	378,9	182,4
23	670,2	378,9	182,3
24	670,4	379,0	182,3
25	670,6	379,0	182,3
26	670,8	379,0	182,2
27	670,9	379,0	182,2
28	671,1	379,0	182,2
29	671,3	379,1	182,1
30	671,5	379,1	182,1
31	671,5	379,1	182,1
32	671,4	379,1	182,1
33	671,4	379,1	182,2
34	671,4	379,1	182,2
35	671,4	379,1	182,2
36	671,3	379,1	182,2
37	671,3	379,1	182,2
38	671,3	379,1	182,2
39	671,2	379,2	182,3
40	671,2	379,2	182,3
41	671,2	379,2	182,3
42	671,2	379,2	182,3
43	671,2	379,2	182,3
44	671,2	379,2	182,3
45	671,2	379,2	182,3
46	671,2	379,2	182,3
47	671,2	379,1	182,3
48	671,3	379,1	182,3
49	671,3	379,1	182,3
50	671,3	379,1	182,3
51	671,3	379,1	182,3
52	671,3	379,1	182,3
53	671,3	379,1	182,3
54	671,3	379,1	182,3
55	671,3	379,1	182,3
56	671,3	379,1	182,3
57	671,3	379,1	182,3
58	671,3	379,1	182,3
59	671,3	379,1	182,3
60	671,3	379,1	182,3
61	671,3	379,1	182,3
62	671,3	379,1	182,3
63	671,3	379,1	182,3

64	671,3	379,1	182,3
65	671,3	379,1	182,3
66	671,3	379,1	182,3
67	671,3	379,1	182,3
68	671,3	379,1	182,3
69	671,3	379,1	182,3
70	671,3	379,1	182,3
71	671,3	379,1	182,3
72	671,3	379,1	182,3
73	671,3	379,1	182,3
74	671,3	379,1	182,3
75	671,3	379,1	182,3
76	671,3	379,1	182,3
77	671,3	379,1	182,3
78	671,3	379,1	182,3
79	671,3	379,1	182,3
80	671,3	379,1	182,3
81	671,3	379,1	182,3
82	671,3	379,1	182,3
83	671,3	379,1	182,3
84	671,3	379,1	182,3
85	671,3	379,1	182,3
86	671,3	379,1	182,3
87	671,3	379,1	182,3
88	671,3	379,1	182,3
89	671,3	379,1	182,3
90	671,3	379,1	182,3
91	671,3	379,1	182,3
92	671,3	379,1	182,3
93	671,3	379,1	182,3
94	671,3	379,1	182,3
95	671,3	379,1	182,3
96	671,3	379,1	182,3
97	671,3	379,1	182,3
98	671,3	379,1	182,3
99	671,3	379,1	182,3
100	671,3	379,1	182,3
101	671,3	379,1	182,3
102	671,3	379,1	182,3
103	671,3	379,1	182,3
104	671,3	379,1	182,3
105	671,3	379,1	182,3
106	671,3	379,1	182,3
107	671,3	379,1	182,3
108	671,3	379,1	182,3
109	671,3	379,1	182,3
110	671,3	379,1	182,3

111	671,3	379,1	182,3
112	671,3	379,1	182,3
113	671,3	379,1	182,3
114	671,3	379,1	182,3
115	671,3	379,1	182,3
116	671,3	379,1	182,3
117	671,3	379,1	182,3
118	671,3	379,1	182,3
119	671,3	379,1	182,3
120	671,3	379,1	182,3
121	671,3	379,1	182,3
122	671,3	379,1	182,3
123	671,3	379,1	182,3
124	671,3	379,1	182,3
125	671,3	379,1	182,3
126	671,3	379,1	182,3
127	671,3	379,1	182,3
128	671,3	379,1	182,3
129	671,3	379,1	182,3
130	671,3	379,1	182,3
131	671,3	379,1	182,3
132	671,3	379,1	182,3
133	671,3	379,1	182,3
134	671,3	379,1	182,3
135	671,3	379,1	182,3
136	671,3	379,1	182,3
137	671,3	379,1	182,3
138	671,3	379,1	182,3
139	671,3	379,1	182,3
140	671,3	379,1	182,3
141	671,3	379,1	182,3
142	671,3	379,1	182,3
143	671,3	379,1	182,3
144	671,3	379,1	182,3
145	671,3	379,1	182,3
146	671,3	379,1	182,3
147	671,3	379,1	182,3
148	671,3	379,1	182,3
149	671,3	379,1	182,3
150	671,3	379,1	182,3
151	671,3	379,1	182,3
152	671,3	379,1	182,3
153	671,3	379,1	182,3
154	671,3	379,1	182,3
155	671,3	379,1	182,3
156	671,3	379,1	182,3
157	671,3	379,1	182,3

158	671,3	379,1	182,3
159	671,3	379,1	182,3
160	671,3	379,1	182,3
161	671,3	379,1	182,3
162	671,3	379,1	182,3
163	671,3	379,1	182,3
164	671,3	379,1	182,3
165	671,3	379,1	182,3
166	671,3	379,1	182,3
167	671,3	379,1	182,3
168	671,3	379,1	182,3
169	671,3	379,1	182,3
170	671,3	379,1	182,3
171	671,3	379,1	182,3
172	671,3	379,1	182,3
173	671,3	379,1	182,3
174	671,3	379,1	182,3
175	671,3	379,1	182,3
176	671,3	379,1	182,3
177	671,3	379,1	182,3
178	671,3	379,1	182,3
179	671,3	379,1	182,3
180	671,3	379,1	182,3
181	671,3	379,1	182,3
182	671,3	379,1	182,3
183	671,3	379,1	182,3
184	671,3	379,1	182,3
185	671,3	379,1	182,3
186	671,3	379,1	182,3
187	671,3	379,1	182,3
188	671,3	379,1	182,3
189	671,3	379,1	182,3
190	671,3	379,1	182,3
191	671,3	379,1	182,3
192	671,3	379,1	182,3
193	671,3	379,1	182,3
194	671,3	379,1	182,3
195	671,3	379,1	182,3
196	671,3	379,1	182,3
197	671,3	379,1	182,3
198	671,3	379,1	182,3
199	671,3	379,1	182,3
200	671,3	379,1	182,3
201	671,3	379,1	182,3
202	671,3	379,1	182,3
203	671,3	379,1	182,3
204	671,3	379,1	182,3

205	671,3	379,1	182,3
206	671,3	379,1	182,3
207	671,3	379,1	182,3
208	671,3	379,1	182,3
209	671,3	379,1	182,3
210	671,3	379,1	182,3
211	671,3	379,1	182,3
212	671,3	379,1	182,3
213	671,3	379,1	182,3
214	671,3	379,1	182,3
215	671,3	379,1	182,3
216	671,3	379,1	182,3
217	671,3	379,1	182,3
218	671,3	379,1	182,3
219	671,3	379,1	182,3
220	671,3	379,1	182,3
221	671,3	379,1	182,3
222	671,3	379,1	182,3
223	671,3	379,1	182,3
224	671,3	379,1	182,3
225	671,3	379,1	182,3
226	671,3	379,1	182,3
227	671,3	379,1	182,3
228	671,3	379,1	182,3
229	671,3	379,1	182,3
230	671,3	379,1	182,3
231	671,3	379,1	182,3
232	671,3	379,1	182,3
233	671,3	379,1	182,3
234	671,3	379,1	182,3
235	671,3	379,1	182,3
236	671,3	379,1	182,3
237	671,3	379,1	182,3
238	671,3	379,1	182,3
239	671,3	379,1	182,3
240	671,3	379,1	182,3
241	671,3	379,1	182,3
242	671,3	379,1	182,3
243	671,3	379,1	182,3
244	671,3	379,1	182,3
245	671,3	379,1	182,3
246	671,3	379,1	182,3
247	671,3	379,1	182,3
248	671,3	379,1	182,3
249	671,3	379,1	182,3
250	671,3	379,1	182,3

APPENDICE D: Influenza della Luce della Volta a Botte.

Si riportano nel seguito i valori di temperatura, al variare del tempo d'incendio, dei punti all'interno dello spessore delle volte a botte di luce ridotta (cfr. paragrafo 4.3.5).

Tabella D.1: Valori della Temperatura in funzione del Tempo Volta a Botte da 4,5 m di luce.

Punto [cm]	Temperatura [°C] Botte da 4,5 m											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20	492,1	596,0	661,4	709,1	781,9	855,5	907,4	977,7	1025,8	1061,9	1091,9
2	20	408,2	514,0	583,8	637,3	721,8	808,9	869,9	949,4	1002,6	1041,8	1073,8
3	20	324,3	432,0	506,2	565,4	661,7	762,4	832,3	921,1	979,5	1021,8	1055,6
4	20	240,4	350,0	428,6	493,5	601,6	715,9	794,8	892,7	956,3	1001,7	1037,5
5	20	156,5	268,0	351,1	421,7	541,5	669,4	757,2	864,4	933,1	981,6	1019,4
6	20	72,6	186,0	273,5	349,8	481,4	622,8	719,7	836,1	909,9	961,5	1001,3
7	20	65,2	164,0	242,5	312,1	434,5	571,1	670,2	797,0	878,9	935,5	978,2
8	20	57,8	142,0	211,5	274,3	387,6	519,4	620,7	757,9	847,9	909,4	955,2
9	20	50,4	120,0	180,5	236,6	340,8	467,7	571,2	718,8	816,9	883,4	932,2
10	20	43,0	98,0	149,5	198,8	293,9	416,0	521,7	679,7	785,8	857,3	909,2
11	20	35,6	76,0	118,5	161,1	247,0	364,3	472,3	640,6	754,8	831,2	886,2
12	20	28,2	54,0	87,5	123,3	200,1	312,6	422,8	601,5	723,8	805,2	863,1
13	20	27,1	49,6	79,2	111,5	181,8	286,0	388,8	560,2	683,9	770,0	831,9
14	20	25,9	45,1	70,9	99,6	163,6	259,4	354,8	518,9	644,1	734,8	800,6
15	20	24,8	40,7	62,7	87,7	145,3	232,8	320,8	477,6	604,2	699,5	769,4
16	20	23,6	36,2	54,4	75,9	127,0	206,2	286,9	436,3	564,4	664,3	738,1
17	20	22,5	31,8	46,1	64,0	108,8	179,6	252,9	395,1	524,5	629,1	706,8
18	20	21,4	27,4	37,8	52,1	90,5	153,0	218,9	353,8	484,7	593,9	675,6
19	20	21,2	26,4	35,6	48,4	83,4	141,2	202,5	327,9	450,3	554,4	634,8
20	20	21,0	25,4	33,4	44,6	76,3	129,5	186,0	302,0	415,8	514,9	594,0
21	20	20,8	24,5	31,2	40,9	69,1	117,7	169,6	276,2	381,4	475,5	553,2
22	20	20,6	23,5	29,0	37,1	62,0	105,9	153,1	250,3	347,0	436,0	512,3
23	20	20,4	22,5	26,8	33,4	54,9	94,1	136,7	224,5	312,6	396,5	471,5
24	20	20,2	21,6	24,5	29,6	47,8	82,3	120,2	198,6	278,2	357,1	430,7
25	20	20,2	21,4	24,0	28,6	45,1	76,9	111,8	183,7	256,3	327,9	394,7
26	20	20,2	21,2	23,5	27,5	42,5	71,5	103,4	168,8	234,4	298,7	358,7
27	20	20,1	21,0	23,0	26,5	39,9	66,1	94,9	153,9	212,5	269,5	322,7
28	20	20,1	20,8	22,5	25,5	37,2	60,7	86,5	139,0	190,6	240,3	286,6
29	20	20,1	20,6	22,0	24,4	34,6	55,3	78,1	124,2	168,6	211,1	250,6
30	20	20,1	20,4	21,4	23,4	32,0	49,9	69,7	109,3	146,7	181,9	214,6

Tabella D.2: Valori della Temperatura in funzione del Tempo Volta a Botte da 4 m di luce.

Punto [cm]	Temperature Botte da 4 m											
	0 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min
0	20	576,0	678,0	739,0	781,0	842,0	902,0	945,0	1006,0	1049,0	1082,0	1110,0
1	20	491,0	594,8	660,3	708,1	780,9	854,7	906,8	977,2	1025,4	1061,5	1091,5
2	20	407,0	512,8	582,6	636,1	720,7	808,0	869,1	948,7	1002,1	1041,3	1073,3
3	20	323,1	430,7	504,9	564,1	660,5	761,3	831,4	920,3	978,7	1021,1	1055,0
4	20	239,2	348,7	427,3	492,2	600,2	714,6	793,7	891,8	955,4	1000,9	1036,8
5	20	155,3	266,6	349,6	420,2	540,0	667,9	755,9	863,4	932,1	980,7	1018,5
6	20	72,6	185,7	273,0	349,2	480,6	621,9	718,8	835,3	909,1	960,8	1000,5
7	20	65,1	163,5	241,6	311,0	433,1	569,5	668,5	795,5	877,5	934,2	977,0
8	20	57,7	141,5	210,7	273,3	386,2	517,7	618,9	756,2	846,3	908,0	953,9
9	20	50,3	119,5	179,7	235,6	339,4	466,0	569,3	717,0	815,1	881,8	930,7
10	20	42,9	97,5	148,8	197,9	292,5	414,3	519,8	677,7	784,0	855,6	907,6
11	20	35,5	75,6	117,8	160,2	245,7	362,5	470,2	638,4	752,8	829,4	884,4
12	20	28,2	53,9	87,3	123,0	199,5	311,5	421,3	599,7	722,0	803,5	861,6
13	20	27,0	49,4	78,9	111,0	181,0	284,6	386,9	557,9	681,5	767,7	829,7
14	20	25,9	45,0	70,7	99,2	162,8	258,1	353,1	516,6	641,6	732,3	798,3
15	20	24,8	40,6	62,4	87,3	144,6	231,6	319,2	475,3	601,6	696,9	766,8
16	20	23,6	36,1	54,1	75,5	126,4	205,1	285,3	434,0	561,6	661,5	735,4
17	20	22,5	31,7	45,9	63,7	108,1	178,6	251,4	392,7	521,7	626,2	703,9
18	20	21,4	27,3	37,7	52,0	90,2	152,4	218,0	352,0	482,3	591,3	672,9
19	20	21,2	26,4	35,5	48,2	83,0	140,5	201,4	325,9	447,5	551,3	631,5
20	20	21,0	25,4	33,3	44,5	75,9	128,8	185,0	300,1	413,2	511,9	590,7
21	20	20,8	24,4	31,1	40,7	68,8	117,0	168,6	274,4	378,9	472,4	549,8
22	20	20,6	23,5	28,9	37,0	61,7	105,3	152,2	248,6	344,6	433,0	509,0
23	20	20,4	22,5	26,7	33,2	54,6	93,6	135,8	222,9	310,3	393,6	468,1
24	20	20,2	21,6	24,5	29,6	47,6	82,0	119,7	197,5	276,5	354,8	427,9
25	20	20,2	21,4	24,0	28,5	45,0	76,5	111,2	182,5	254,4	325,3	391,6
26	20	20,2	21,2	23,5	27,5	42,3	71,1	102,8	167,7	232,7	296,3	355,8
27	20	20,1	21,0	23,0	26,5	39,7	65,8	94,4	152,9	210,9	267,3	320,1
28	20	20,1	20,8	22,5	25,4	37,1	60,4	86,0	138,1	189,1	238,3	284,3
29	20	20,1	20,6	21,9	24,4	34,5	55,0	77,6	123,3	167,4	209,3	248,5
30	20	20,1	20,4	21,4	23,4	31,9	49,7	69,4	108,7	146,0	180,8	213,3

Bibliografia

- Abrams, M. S. (1979). Behavior of Inorganic Materials in Fire, Design of Buildings for Fire Safety. *ASTM Special Publication (685)*, 14-75. Baltimore: American Society for Testing and Materials.
- Al Nahhas, F., Ami Saada, R., Bonnet, G., & Delmotte, P. (2007). Resistance to fire of walls constituted by hollow blocks: Experiments and thermal modeling. *Applied Thermal Engineering*, 258-267.
- Allen, L. W., & Harmathy, T. Z. (1973). Fire endurance of selected concrete masonry walls. *ACI Journal*, 562-568.
- Anderberg, Y., & Thelandersson, S. (1976). Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures – experimental investigation and material behaviour model. *Bulletin 54, Institution of Technology*. Lund, Sweden.
- Andreini, M., & Sassu, M. (2011). Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action. *Fire Safety Journal*, 440-450.
- BIA. (2008, Marzo). Fire Resistance of brick masonry. Brick Industry Association.
- Bingöl, A. F., & Gül, R. (2008). Effect of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete. *Fire and Materials* 33, 79-88.
- Cartapati, E., & Gabbianelli, M. (2002). Il travertino: l'andamento dei parametri termici alle alte temperature. *Antincendio* 54, 9, 35-42.
- Černý, R., Maděra, J., Poděbradská, J., Toman, J., Drchalova, J., Klečka, T., . . . Rovnaníková, P. (2000). The effect of compressive stress on thermal and hygric properties of Portland cement mortar in wide temperature and moisture ranges. *Cement and Concrete Research*, 1267-1276.
- Colombo, M., Di Prisco, M., & Felicetti, R. (2007). SFRC bending behaviour at high temperatures: an experimental investigation. *Proceedings of FRAMCOS 2007*. Catania.
- Cooke, G. M., Viridi, K. S., & Jeyarupalingam, N. (1996). The thermal bowing of brick walls exposed to fire on one side. *Interflam '96 International Conference*, (pp. 915-919). Cambridge.
- Cruz, C. R. (1961). Elastic properties of concrete at high temperatures. *Portland Cement Association Research Bulletin* 191.
- CSE ANDIL. (1995). Ricerca sperimentale per la determinazione della resistenza al fuoco di varie tipologie di solai e pannelli murari con elementi di laterizio, svolta in

- collaborazione con ANDIL. Roma: AssoLaterizi, Centro Studi ed Esperienze Antincendi.
- D.M. 20 Novembre 1987. (n.d.). *Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento*.
- Dall'Aglio, A. (2011, Dicembre). Certificazioni sulla resistenza al fuoco di strutture portanti facenti parte del complesso edilizio denominato: "Centro Santa Maria ai Servi". Milano.
- Dhanasekar, M., Chandrasekaran, V., & Grubits, S. J. (1994). A numerical model model for the thermal bowing of masonry walls. *10th International Brick Masonry Conference*, (pp. 1093-1102). Calgary.
- Elia, V. (2013). Valutazione della Resistenza al Fuoco di Volte in Muratura. *Tesi di Laurea Magistrale*.
- Fantilli, A. P., Vallini, P., & Demarchis, F. (2009, Ottobre 8-10). I Domini di Interazione di Archi in Muratura Soggetti ad Elevate Temperature. *Atti del "workshop WONDERmasonry 2009."*, 711-720. Lacco Ameno.
- Fu, Y. F., Wong, Y. L., Poon, C. S., Tang, C. A., & Lin, P. (2004). Experimental study of micro/macro crack development and stress-strain relations of cement-based composite materials at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research* 34, 789-797.
- Gnanakrishnan, N., & Lawther, R. (1990). Performance of masonry walls exposed to fire. *Proceedings of the Fifth North American Masonry Conference*, (pp. 901-914). Urbana-Champaign.
- Harmathy, T. Z. (1961). A treatise on theoretical fire endurance rating. *ASTM Special Technical Publication 301*, 10-44.
- Husem, M. (2006). The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Safety Journal* 41, 155-163.
- Khoury, G. A. (2000). Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering Materials*, 2, 429-447.
- Kreith, F. (1975). *Principi di Trasmissione del Calore*. Liguori.
- La Malfa Antonio, L. M. (2008). *Approccio Ingegneristico alla Sicurezza Antincendio*. Legislazione Tecnica s.r.l.
- Li, L. Y., & Purkiss, J. (2005). Stress-strain constitutive equations of concrete material at elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 40, 669-686.

- Li, W., & Guo, Z.-H. (1993). Experimental investigation on strength and deformation of concrete under high temperature. *Chinese Journal of Building Structures* 14, 1,, 8-16.
- Lie, T. (1992). Structural fire protection. American Society of Civil Engineers.
- Nadjai, A., O'Garra, M., Ali, F. A., & Laverty, D. (2003). A numerical model for the behaviour of masonry under elevated temperatures. *Fire and Materials*, 163-182.
- Nguyen, T., Meftah, F., Chammas, R., & Mebarki, A. (2009). The behaviour of masonry walls subjected to fire: modelling and parametric studies in the case of hollow burnt-clay bricks. *Fire Safety Journal* 44, 629-641.
- Sassu, M. (2007). *Guida Eurocodice6 parte 1.2 “ Strutture in muratura”*. Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università di Pisa.
- Sciarretta, F. (2010). Analisi Teorico-Sperimentale del Comportamento Meccanico di Muratura Malta-Mattoni Soggetta ad Alte Temperature. *Tesi di Dottorato*. Università degli Studi di Trento.
- Setti, P. (2008). *La definizione delle azioni sulle costruzioni in caso di incendio: UNI EN 1991-1.2*. Dipartimento Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano.
- Thelandersson, S. (1972). Effect of high temperature on tensile strength of concrete. *Nordisk Betong*.
- UNI 9502. (1989). *Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso*.
- Wu, B., Yuan, J., & Wang, J. Y. (2000). Experimental study on the mechanical properties of HSC after high temperature. *Chinese Journal of Civil Engineering*, 33, 2, 8-15.
- Xiao, J., & König, G. (2004). Study on concrete at high temperature in China – an overview. *Fire Safety Journal* 39, 89-103.
- Xiao, J.-Z., Wang, P., Xie, M., & Li, J. (2003). Experimental study on compressive constitutive relationship of concrete under axial loading and high temperature. *Journal of Tongji University* 31, 2, 186-190.

RINGRAZIAMENTI

Ci sono volute circa 29000 parole prima di arrivare a scrivere quelle presenti nella pagina più importante (non solo l'ultima di questo lavoro, ma l'ultima di un capitolo della mia vita): quella dei ringraziamenti.

Come sempre si dice, *“la lista sarebbe molto lunga”* oppure *“sicuramente sto dimenticando qualche persona”*. Per questa ragione, io mi limiterò a parlare direttamente solo a qualcuno. Se non vi trovate nel seguito ma nel vostro cuore sapete di aver contribuito a tutto ciò, sentitevi comunque ringraziati e perdonatemi se potete.

Grazie Famiglia mia per avermi sostenuto in questi anni, dandomi tutto ciò di cui avevo bisogno per percorrere al meglio questa strada.

Grazie Prof. Ing. Marianovella Leone per la disponibilità, la pazienza, e l'impegno che mi ha dedicato; e questo non solo durante il periodo di tesi, ma per ogni esperienza universitaria in cui ho avuto bisogno del suo aiuto.

Grazie Antonio Francone, collega ma soprattutto Amico. Più cresciamo e più mi rendo conto di quanto sia importante il tempo. Tu mi hai aiutato a recuperarne tanto e di fatto mi hai reso debitore nei tuoi confronti di qualcosa che non potrò mai ripagarti.

Grazie Cosimo Carrozzo. Senza i momenti condivisi durante questo percorso adesso avrei molti più capelli bianchi. O forse sarebbero direttamente caduti.

Grazie Simone Antonucci. L'università sarebbe stata davvero molto più triste senza di te.

Grazie Barbara Cecere. Hai avuto un compito difficile ma l'hai portato a termine alla grande: non avrei potuto avere partner di studi migliore. E se lo uniamo al fatto che non ti sei arrabbiata neanche una volta per i miei ritardi, direi che sono stato proprio fortunato ad incontrarti.

Grazie Claudia Melissa. Mi hai dato la cosa più importante di tutte: il perché. Sei la motivazione a qualunque impresa io intraprenda, piccola o grande che sia. Inoltre, mi ispiri facendomi vedere la persona che vorrei essere. Ma forse sono anche inutili queste parole. Io Ti Amo. Spero sia sufficiente.

Ora mi sento pronto per voltare l'ultima pagina, chiudere questo libro, questo capitolo, questa fase della mia vita o come la si voglia chiamare.

Ora inizia il nuovo.