

Un percorso interdisciplinare per la ricostruzione degli orizzontamenti lignei delle domus romane

Luca Sbrogiò, Maria Rosa Valluzzi,
Vanessa Centola, Jacopo Bonetto

DBC, Università degli Studi di Padova

Angelo Bertolazzi, Umberto Turrini

DICEA, Università degli Studi di Padova

pagina a fronte

Fig. 10
Pompei, diverse forme
degli alloggiamenti
delle travi nelle
murature ben
squadrate (foto degli
autori, dicembre 2015)

Abstract

In most cases, archaeological excavations provide very little information about buildings' upper parts, such as roof and floors, except for a few peculiar cases, such as Pompeii, Herculaneum and ancient Ostia. Being wood less durable than masonry, our knowledge of the rules and the principles commonly used in Antiquity to design timber structures is still limited to hypothesis. Ancient writers, such as Plinius or Vitruvius, cannot help either, due to the recurrent difficulty of interpreting structural details and technical aspects discussed in their essays. In the paper, an integrated method, able to combine the archaeological data with the architectural knowledge of the Antiquity and the support of engineering analyses, is proposed. Based on limited information already available and through the application of the simplified kinematic approach, unknown geometrical data of the Roman house have been identified through analytical formulas, thus linking a house's floor layout to its elevation. In particular, starting from the linking of the house's floor layout to its elevation, dimensional criteria for timber beams and the roof's pitch in agreement with the archaeological evidence have been defined.

Introduzione

L'immagine delle volumetrie e della configurazione altimetrica degli edifici archeologici d'età romana (e non solo) non è in genere direttamente deducibile dalla conoscenza, per quanto approfondita tramite lo scavo e le altre tecniche d'indagine, dell'impianto delle murature o delle fondazioni.

Nei contesti abitativi la minor qualità costruttiva, intesa in senso di consistenza strutturale, e l'uso esteso di materiali deperibili come il legno comportano, salvo casi eccezionali, una riduzione dell'entità dei resti rinvenibili rispetto a quanto potrebbe restituire un edificio pubblico, in cui è più probabile l'uso di murature massicce e strutture orizzontali altrettanto in muratura, quali volte e cupole.

Di converso, il frequente ritrovamento di complessi residenziali antichi, romani in particolare, impone il confronto con la loro ricostruzione in una situazione di assenza di criteri condivisi che non si limitino all'analogia o



Fig. 1
Inclinazione della
copertura in funzione
della latitudine
secondo una proposta
di Rondelet ripresa
nel trattato di Nicola
Cavalieri San Bertolo
(da Cavalieri San
Bertolo 1832)

NOMI DELLE CITTÀ	latitudini geografiche	INCLINAZIONI DE' COPERTI			
		di soli canali	di tegole maritate	di lastre d'ardesia	di tegole piatte
	<i>gr. min.</i>	<i>gr. min.</i>	<i>gr. min.</i>	<i>gr. min.</i>	<i>gr. min.</i>
Amsterdam	52. 23	28. 55	33. 44	36. 09	38. 33
Berlino	52. 32	29. 04	33. 35	36. 12	38. 46
Bologna	44. 29	21. 01	24. 31	26. 16	28. 01
Bruxelles	50. 51	27. 23	31. 57	34. 14	36. 31
Copenaghen	55. 40	32. 12	37. 34	40. 15	42. 56
Costantinopoli	41. 00	17. 32	20. 17	21. 55	23. 22
Dresda	51. 12	27. 44	32. 21	34. 40	36. 58
Edimburgo	55. 58	32. 30	37. 55	40. 38	43. 20
Firenze	41. 46	18. 18	21. 21	22. 53	24. 24
Genova	44. 25	20. 57	24. 27	26. 11	27. 56
Lisbona	38. 42	15. 14	17. 46	19. 03	20. 19
Londra	51. 31	28. 03	32. 34	35. 04	37. 04
Madrid	40. 25	16. 57	19. 47	21. 11	22. 36
Milano	45. 25	21. 57	25. 37	27. 26	29. 16
Modena	44. 34	21. 06	24. 37	26. 23	28. 08
Monaco	48. 02	24. 34	28. 40	30. 43	32. 45
Mosca	55. 45	32. 17	37. 40	40. 21	43. 03
Napoli	40. 50	17. 22	20. 16	21. 42	23. 09
Palermo	38. 10	14. 42	17. 09	18. 23	19. 36
Parigi	48. 50	25. 22	29. 36	31. 42	33. 49
Piacenza	45. 05	21. 37	25. 13	27. 01	28. 49
Petroburgo	59. 56	36. 28	42. 33	45. 35	48. 37
Roma	41. 54	18. 26	21. 30	23. 01	24. 35
Stoccolm	59. 20	35. 52	41. 51	44. 50	47. 49
Torino	44. 51	21. 23	24. 57	26. 44	28. 31
Varsavia	52. 14	28. 46	33. 34	35. 58	38. 21
Venezia	45. 25	21. 57	25. 37	27. 26	29. 16
Vienna	48. 12	24. 44	28. 51	30. 55	32. 59
Zurigo	47. 28	24. 00	28. 00	30. 00	32. 00

all'imitazione e che non lascino aperti dubbi sulla reale possibilità di applicare determinate soluzioni costruttive al contesto rinvenuto.

Il percorso di conoscenza archeologica può essere pertanto completato grazie al contributo di altre discipline, in particolare, tramite la considerazione delle condizioni strutturali ricorrenti degli orizzontamenti (solai e coperture) e delle murature in elevazione degli edifici antichi (Giuliani, 2006) o, in assenza di informazioni dirette da questi, dell'edilizia storica. Così facendo, i vari frammenti edilizi rinvenuti dallo scavo riacquistano l'unità all'interno di un organismo sottoposto alle sollecitazioni dell'ambiente e dell'uso.

Il coinvolgimento e l'integrazione di competenze proprie dell'archeologia, dell'architettura e dell'ingegneria, qui espresse dai Dipartimenti di Beni Culturali e di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale dell'Università di Padova, sono quindi fondamentali per affrontare un problema che è chiaramente interdisciplinare.

Il tema dell'articolazione in elevato della casa romana può essere allora affrontato nella forma il più possibile completa, nel rispetto delle cono-

scienze archeologiche e con il sostegno, al contempo, degli elementi geometrico-costruttivi necessari e sufficienti per approntare studi numerici di comportamento meccanico. Ciò comporta, sulla base delle conoscenze archeologiche e il soccorso di quelle architettoniche nelle lacune rimaste, l'implementazione delle informazioni in modo gerarchico, dai dati alle ipotesi, all'interno di uno schema, o, più correttamente dal punto di vista ingegneristico, di un *modello*.

Sfruttando il "terreno comune" tra archeologia e ingegneria rappresentato dal modello della casa romana di ambito campano-laziale è stato possibile mettere in luce alcune questioni essenziali cui si cerca di dare risposta con il presente lavoro. Tra esse si possono citare: a) l'individuazione di disposizioni strutturali ricorrenti nei solai e nelle coperture in rapporto alle caratteristiche geometriche dell'edificio; b) la definizione di regole empiriche di dimensionamento strutturale (se esistono) e la loro traduzione in espressioni matematiche riproducibili; c) la ricerca di una relazione (se esiste) tra la configurazione planimetrica dell'edificio e quella altimetrica, in particolare con le altezze delle murature e le inclinazioni delle coperture.

Lo studio infine ha portato alla redazione di apposito software, sviluppato in linguaggio Visual Basic che, sulla base dei dati di configurazione generale dell'edificio e di dettaglio tecnico-costruttivo delle strutture, consente di individuare in modo rapido i termini geometrici indefinibili mediante il solo studio archeologico e comparativo (Sbrogiò, 2016; Centola, 2018).

Conoscenze preliminari

La sistematizzazione di tutti gli elementi, archeologici e costruttivi concorrenti alla formazione del modello, è resa possibile anzitutto dallo spoglio dalle conoscenze acquisite sia nel contesto dell'archeologia che dell'architettura e dell'ingegneria (Sbrogiò, 2016; Centola, 2018).

Nella letteratura archeologica (tra gli altri, Choisy, 1873; Giovannoni, 1925; Lugli, 1957; Ginouvès, 1992; Adam, 1988; Cagnana, 2000; Lancaster, 2005; Giuliani, 2006; Ulrich, 2007; Oleson, 2008; Bianchini, 2010; Malacrino, 2010; Lancaster, 2015; Vitti, 2016), ampio spazio è dedicato alle tecniche di lavorazione della pietra e della muratura e alle modalità di realizzazione delle strutture più complesse e caratteristiche dell'architettura romana quali archi, volte e cupole. Nel campo delle strutture lignee si rilevano, invece, maggiori incertezze (Trevor Hodge, 1960; Mathé, 2017): per colmare i vuoti lasciati dagli scarsi ritrovamenti si fa pertanto ricorso al confronto con tecniche tradizionali ancor oggi esistenti (Adam, 1988) o si attinge direttamente alle fonti letterarie antiche (Plino *N. H.*; Vitruvio, *De Arch.*; Varrone, *De Lingua Lat.*). Ciò comporta notevoli difficoltà di interpretazione della terminologia specifica, in assenza di riferimenti diretti originali (Tampone, 2000; Gros, 2001).

È possibile individuare le maggiori incertezze della trattatistica antica nelle descrizioni delle parti di edificio dove, presumibilmente, le competenze e l'esperienza dei capomastri prevalevano sul contributo dell'architetto. Non a caso, a fronte della descrizione dell'impostazione generale delle

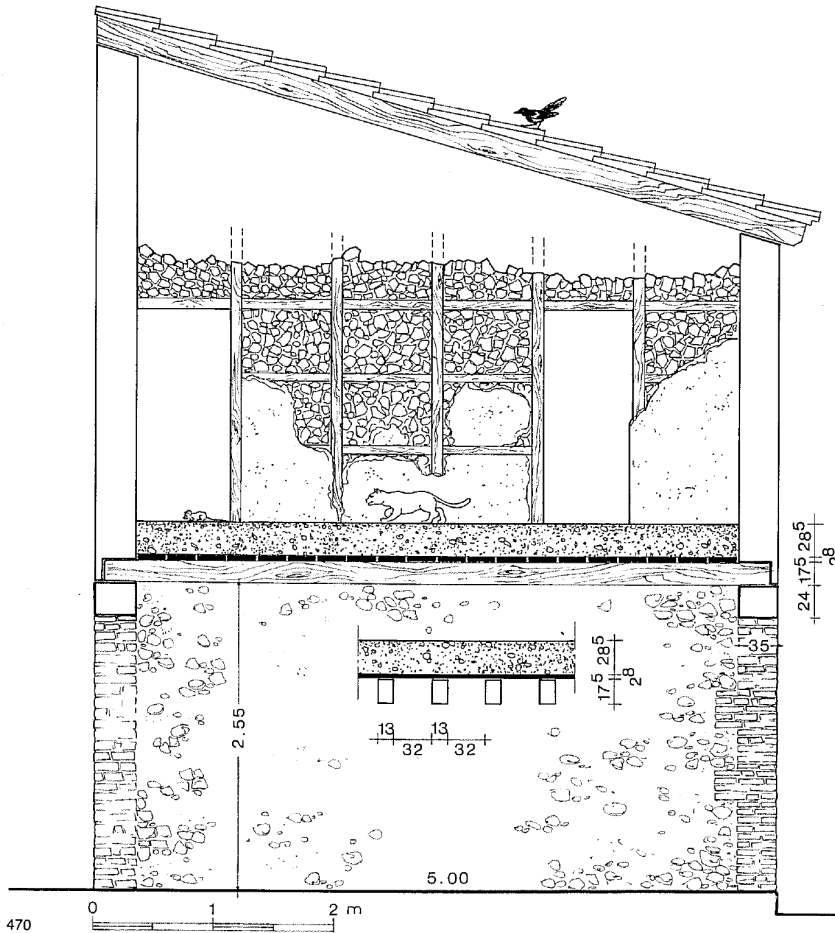
strutture di piano e di copertura di una parte così importante della casa romana di ambito vesuviano come l'atrio, in rapporto alla luce da superare e all'effetto architettonico da ottenere, vengono taciuti aspetti non secondari che scaturiscono dal disegno complessivo, come la questione della pendenza delle falde dell'atrio e la gestione delle loro intersezioni (Pierattini, 2009; Sbrogiò, 2016; Centola, 2018), oppure da questioni di dettaglio, come gli appoggi delle strutture in legno nelle murature (un problema che invece trova spazio già nella trattatistica rinascimentale come in Alberti o nello Scamozzi).

Un'altra lacuna importante emersa dall'analisi della letteratura, in vista di una accurata ricostruzione delle parti fuori terra degli edifici, è relativa all'esistenza di criteri di natura empirica per il dimensionamento delle strutture lignee, ossia per stabilire le dimensioni di una sezione rispetto alla lunghezza della trave e ai carichi che deve sostenere. Relativamente ai tetti mancano, oltre alle dimensioni delle travi, le indicazioni relative alla configurazione generale, come l'inclinazione rispetto alla tipologia dell'orditura, al manto di copertura e all'entità delle precipitazioni. Alcune soluzioni sono deducibili dalla consultazione della manualistica premoderna o, al più tardi, ottocentesca, ma già in quest'ultima si rinvengono considerazioni progettuali basate sui risultati dell'allora nascente scienza delle costruzioni, che difficilmente potevano rientrare tra le conoscenze di un antico costruttore (Milizia, 1781; Cavaliere San Bertolo, 1832; Cantalupi, 1862; Curioni, 1871; Mazzocchi, 1871; Donghi, 1906) al pari di formule che appaiono oggi decisamente deterministiche (Rondelet, 1835) e che forniscono i risultati esposti (vedi Fig. 1).

L'esclusione della trattatistica rinascimentale dall'elenco delle fonti letterarie è voluta, ed è motivata dal fatto che i manuali più recenti, dal Settecento in poi, perdono il riferimento al testo vitruviano e mostrano maggiore interesse al reale, alle regole pratiche di cantiere che si cerca di sistematizzare e validare attraverso la nascente scienza delle costruzioni (De Fino, 2008). È proprio questo momento di passaggio tra l'empiria e il calcolo che, a parere degli autori, fotografa il sapere costruttivo fino ad allora accumulato e rappresenta una fonte di informazione più precisa ed interpretabile secondo schemi e regole generali rispetto agli sforzi di teorizzazione precedenti. Il confronto tra i due gruppi di trattati, prima e dopo le esperienze di Galilei e di Parent, ha tuttavia dimostrato la sostanziale continuità degli aspetti pratici e di dettaglio delle strutture lignee legittimando ulteriormente questa scelta (Sbrogiò, 2016).

Per quanto attiene infine le fonti materiali, in area italiana, la maggior parte delle conoscenze nel campo dei sistemi costruttivi adottati nelle parti in legno degli edifici antichi, quali solai di piano e coperture, proviene dagli studi dedicati alle città archeologiche dell'area vesuviana, le sole, o quasi, dove è possibile rinvenire tracce consistenti delle parti superiori. Tuttavia, è riscontrabile una maggiore attenzione per il dettaglio architettonico o decorativo (aggetti, mensole, gronde, manti di copertura) o per gli elementi di partizione interna (scale, parapetti, soppalchi), rispetto ad una lettura

Fig. 2
 "Sezione tipo" di
 una casa a due
 piani con bottega
 al pianterreno
 ad Ercolano (da
 Adam 1988)



complessiva dei dati in rapporto agli spazi funzionali dell'abitazione, se si eccettuano isolati tentativi (Ulrich, 1996; Adam, 1988; Ulrich, 2007; Ruggieri, 2017).

Ricerche recenti hanno permesso di stabilire anche le essenze lignee impiegate per usi strutturali (Di Pasquale et al., 2012; Moser et al., 2013; Camardo et al., 2015; Moser et al., 2016; Ruggieri, 2017), evidenziando un sostanziale comparabilità con quanto indicato dalla trattatistica e anche dall'esperienza costruttiva italiana successiva, con l'impiego di legno di conifera di provenienza sostanzialmente locale, almeno ad Ercolano.

Tuttavia, è grazie ad un'apposita campagna di censimento nel sito nella città archeologica di Ercolano, condotta in accordo con la *Soprintendenza Speciale dei Beni Archeologici di Pompei Ercolano e Stabia*, che è stato possibile rilevare le forme e le dimensioni delle travi (indirettamente attraverso la misura degli alloggiamenti nelle murature), gli interassi e le luci strutturali, la direzione e la tipologia delle strutture in rapporto alle dimensioni e alla funzione dell'ambiente nell'organizzazione della casa antica. I dati rac-

colti sono stati poi confrontati con le nozioni ricavate dalla manualistica e con le attuali strategie di progetto (Sbrogiò, 2016; Centola, 2018), contribuendo a migliorare l'interpretazione delle scelte operate dagli antichi costruttori ed indirizzando la successiva fase di individuazione del criterio di dimensionamento (cfr. Tab. 4).

L'assetto della casa romana

L'assetto di riferimento della casa romana in ambito peninsulare, assemblato ed ottimizzato in base alle conoscenze preliminari raccolte dalla letteratura storica ed emerse da considerazioni di tipo strutturale, è qui proposto in qualità di strumento di ausilio alla conoscenza archeologica. A tal scopo, è necessario definire in via preliminare una gerarchia delle informazioni di riferimento. Esistono valori noti, i *dati* del problema, estrapolati dallo scavo archeologico; valori variabili entro certi limiti o secondo certe tipologie, i *parametri*, ricavabili dallo studio comparato delle fonti e della letteratura o per analogia con altre strutture; e, da ultimo, le vere e proprie *incognite*, vale a dire tutto ciò che non può essere noto a priori e che dipende dalle prime due classi di informazioni (Tab. 1).

Tab. 1
Classificazione delle
informazioni descrittive
del modello

	Dati	Parametri	Incognite
Geometrie	- Spessore delle pareti - Dimensioni degli ambienti - Altezza delle pareti* - Altezza delle travi di impalcato* - Spaziatura delle travi* - Forma della sezione*	- Spaziatura delle travi* - Altezza delle pareti* - Forma della sezione*	- Inclinazione delle falde di copertura - Altezza delle travi di impalcato*
Tipologia strutturale	- Disposizione orditure*	- Disposizione orditure	
Materiali	- Tipologia muratura	- Tipologia legno strutturale	
Carichi	- Neve - Vento - Peso proprio pareti	- Peso proprio del tetto - Carico di esercizio (aspetti funzionali)	

I termini indicati con * possono essere noti in particolari circostanze di rinvenimento ma nella maggior parte dei casi sono indeterminabili tramite lo scavo archeologico.

Le informazioni qui descritte consentono l'implementazione di modelli semplificati di comportamento meccanico, quale quello per catene cinematiche di corpi rigidi di muratura o "componenti strutturali" (Giuffrè, 1993), considerando che: a) la maggior parte delle informazioni è ricavata da indicazioni a carattere generale di tipo manualistico; b) sono evidenziate le analogie tra singoli casi più che le differenze; c) nel periodo di riferimento dello studio non è compreso il comportamento fisico dei materiali da costruzione (tensioni, deformazioni) ma solo la manifestazione macroscopica di esso (collasso, configurazione deformata); d) le conoscenze

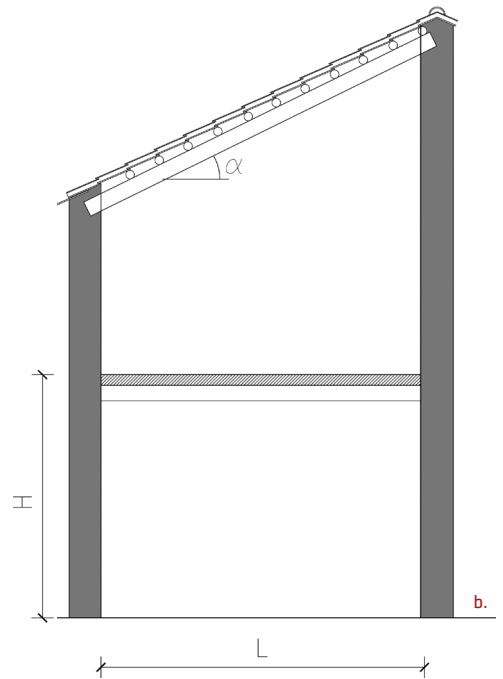
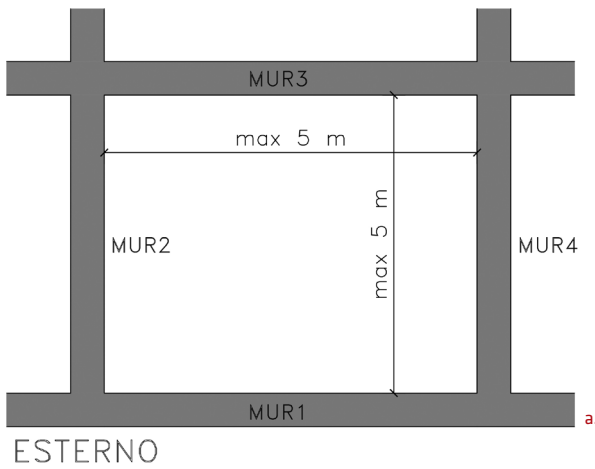


Fig. 3
Schematizzazione in
pianta (a) e sezione
(b) dell'edificio di
Fig. 2 (disegno degli
autori)

in campo statico possono ragionevolmente ritenersi limitate alla statica dei vettori e alla configurazioni di equilibrio dei corpi (Benvenuto, 1981). Il metodo per catene cinematiche richiede dati a macroscale, come quelli deducibili dall'analisi della letteratura, per i tre aspetti di geometrie, materiali e carichi, da combinare in relazioni di equilibrio tra corpi rigidi gestibili anche in modo parametrico. Esso è efficacemente applicato nell'analisi sismica delle costruzioni storiche in muratura (Decreto Min. Infrastrutture 17 gennaio 2018) ma si rivela altrettanto utile per analisi in campo statico, come nel caso in studio e di seguito descritto.

Al fine di rappresentare una casa privata in area vesuviana, l'edificio-modello presenta al più due piani fuori terra, una pianta all'incirca rettangolare, in cui le murature perimetrali sono intersecate a tratti da muri di spina ad esse ortogonali i quali, a loro volta, possono incrociare eventuali pareti interne longitudinali portanti. Con riferimento ad un edificio di tipo residenziale di medio alto livello, le distanze tra le pareti sono tali (5 m circa al massimo) da consentire l'impiego di solai ad orditura prevalentemente monodirezionale secondo la dimensione minore degli ambienti coperti, con calpestio formato da tavolato ligneo e soletta in conglomerato (Centola, 2018). La copertura presenta anch'essa l'orditura semplice di puntoni disposti nella direzione della pendenza e, pertanto, spingenti sulla parete perimetrale d'appoggio, ed è rifinita con un'orditura di correntini ortogonali che reggono il manto di tegole piane e coppi di coperta (Figg. 2-3).

I dati

Gli unici dati effettivamente a disposizione sono quelli determinati o estrapolati dalla conoscenza del sito e dallo scavo archeologico: la posizione geografica, l'impianto murario dell'edificio, le dimensioni degli am-

bienti, lo spessore e il tipo delle murature. La posizione geografica determina le azioni variabili del vento, della neve e del sisma (quest'ultimo non viene qui considerato) che agiscono (agivano) sulla struttura antica, e che è possibile determinare ipotizzando di estendere la validità delle prescrizioni normative attuali (Decreto Min. Infrastrutture 17 gennaio 2018) in assenza di studi specifici. Gli altri dati consentono di definire le geometrie delle strutture e, da queste, i pesi propri, tramite una corrispondenza tra le murature più frequenti nel panorama archeologico antico e le tipologie descritte nella normativa vigente (Circ. Min. Infrastrutture 2 febbraio 2009). La corrispondenza è stata stabilita sulla base delle nuove classificazioni (Ginouvès e Martin, 1985; Giuliani, 2006; Piazza, 2015) sostituite della nomenclatura tradizionale (Lugli, 1957), la quale viene riproposta in Tab. 2.

Tab. 2
Parametri delle murature
di comune ritrovamento
archeologico

Nomenclatura tradizionale	Tipologia muraria	Riferimento Tab. C8A.2.1 DM 2/2/2009	W [kN/mc]	f _m [MPa]
<i>Opus quadratum</i> (tufo)	Muratura a conci di pietra lavorati su tutte le facce	Muratura a conci di pietra tenera	16	1,4
<i>Opus testaceum</i>	Muratura piena in mattoni legati da malta di calce	Muratura in mattoni pieni e malta di calce	18	2,4
<i>Opus testaceum a nucleo e paramento</i>	Muratura piena in mattoni legati da malta di calce con nucleo interno	- - -	18 (*)	5 (*)
<i>Opus incertum</i> (cattiva tessitura)	Muratura in scapoli lapidei sbozzati legati da malta di calce	Muratura in pietrame disordinata	19	1
<i>Opus incertum</i> (buona tessitura)	Muratura in scapoli sbozzati sui paramenti esterni separati da nucleo interno in malta di calce	Muratura a conci sbozzati con paramento di limitato spessore e nucleo interno	20	2
<i>Opus reticulatum</i>	Muratura in elementi piramidali disposti con le basi allineate a 45° sul paramento; nucleo in malta di calce	Muratura in pietra a spacco con buona tessitura	21	2,6
<i>Opus quadratum</i> (calcare)	Muratura a blocchi lapidei squadri	Muratura a blocchi lapidei squadri	22	6

(*) Il dato è ricavato da (Giarvini et al., 2006) poiché una simile tipologia muraria non è presente in normativa; in alternativa è possibile ricorrere alle caratteristiche dell'*opus reticulatum*.

La corrispondenza tra le tipologie murarie antiche e quelle classificate dalla normativa attuale è stabilita su base descrittiva, in assenza di specifiche prove di resistenza sui materiali, pur nella consapevolezza di poter difficilmente assimilare caratteristiche tipologiche differenti in merito, ad esempio, alla compattezza del nucleo interno della muratura romana rispetto

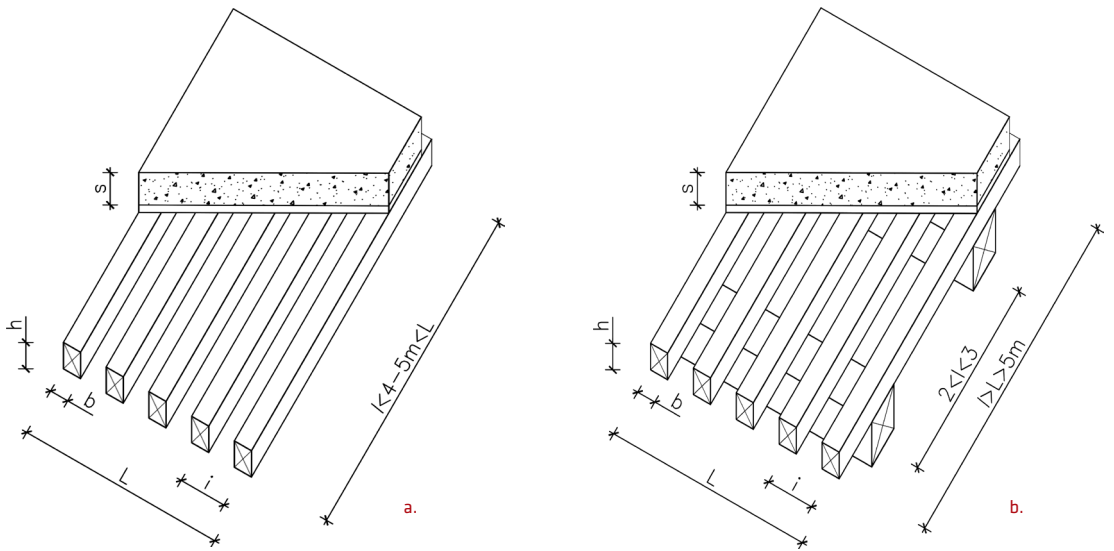


Fig. 4
Possibili
configurazioni
dei solai lignei
tradizionali: orditura
semplice (a) e doppia
(b) (disegno degli
autori)

alle tipologie delle epoche successive (Sbrogiò, 2016). In questa prima schematizzazione, l'opera reticolata può essere assunta ad una muratura in pietra a tessitura irregolare di buona qualità (Giuliano, 2010). Per il tipo di modellazione adottata (cfr. par. 2.3.2) si vedrà che è sufficiente conoscere il solo peso specifico della muratura (dato a "macroscala"), relativamente più facile da determinare rispetto alla sua resistenza a compressione (dato a "microscala").

I parametri

La configurazione dei solai lignei tradizionali (Fig. 4) è influenzata da diversi aspetti: a) le luci strutturali in gioco; b) l'uso e la funzionalità degli ambienti; c) il materiale disponibile; d) le possibilità economiche della committenza; e) il livello di compressione del funzionamento strutturale; nonché f) la trasmissione dei saperi tecnici. Tutto questo limita le possibili disposizioni degli elementi a poche combinazioni, chiaramente riconoscibili nell'edilizia storica italiana e nella manualistica: l'orditura semplice o doppia per i solai, le configurazioni spingenti o non spingenti a singola o doppia orditura nelle coperture (Barbisan e Laner, 1997a; Barbisan e Laner, 1997b; Giordano, 1999; Tampone, 2000). Esistono poi soluzioni meno ordinarie, come le capriate, ma non è possibile affrontare in questa sede l'argomento che, solo recentemente, sembra aver trovato una possibile soluzione (Camardo e Notomista, 2014). Si può affermare tuttavia che, nell'ambito dei limiti geometrici stabiliti dal presente studio, non se ne richiede l'impiego.

Le stesse configurazioni sono riconoscibili anche nelle tracce lasciate a Pompei, Ercolano e Ostia Antica sulle murature (Ulrich, 1996; Adam, 1988; Ulrich, 2007; Ruggieri, 2017) testimoniando la persistenza di modi costruttivi tradizionali tramandati (Adam, 1988) e, di conseguenza, legittiman-

do il confronto tra modalità costruttive postclassiche ed antiche, almeno nell'ambito dell'edilizia privata corrente, salvo i cantieri per committenze di alto rango per i quali è lecito immaginare l'impiego di materiali e soluzioni eccezionali, come attestato anche dalle fonti letterarie (Giuliani, 2006).

Più controversa è l'identificazione di una regola di dimensionamento degli elementi lignei: i manuali tecnici sette-ottocenteschi riportano una prima sistematizzazione delle conoscenze allora disponibili, in un'interessante commistione tra regole pratiche di cantiere e prime codificazioni numeriche, nella quale spicca la nota regola dell'altezza della sezione rapportata alla lunghezza dell'elemento strutturale (cd. "luce"), cfr. Tab. 3.

Tab. 3
Altezza delle travi
rispetto alla luce nella
manualistica storica

	Rondelet	Milizia, Cavalieri	Cantalupi, Curioni	Donghi
Orditura semplice	1/24	1/18	1/24	1/20
Rompitratta	1/18	-	1/18	1/18

Questi rapporti si riscontrano già nella trattatistica rinascimentale, ad ulteriore conferma della permanenza di questi insegnamenti anche a distanza di tanti secoli.

Vi è inoltre il problema della forma della sezione (rettangolare, quadrata, tonda) poiché essa è determinabile tanto sulla base di considerazioni strutturali (efficacia rispetto all'inflessione cfr. Donghi, 1906; Giordano, 1999; Sbrogiò, 2016) quanto sulla disponibilità economica del committente (sfruttamento del materiale): la manualistica tende a riferirsi a sezioni squadrate, ma in sito l'impiego attestato è di gran lunga più variabile (Guidobaldi et al., 2008; Ruggieri, 2017; Centola, 2018). Il confronto tra i dati raccolti in sito (Centola, 2018), i pochi già pubblicati (Ulrich, 1996; Adam, 1988) e le indicazioni dei manuali è stato determinante per proporre un'espressione di dimensionamento adeguata alle ipotesi archeologiche.

In questa formulazione matematica, a differenza di quanto accade per la muratura, rientrano anche proprietà meccaniche a "microscala", come la resistenza a flessione e il modulo elastico, dipendenti per di più dalle condizioni di impiego del legno. Tuttavia, è necessario individuare tali valori in modo da essere adeguati al contesto archeologico, nell'impossibilità di applicare direttamente tanto i valori proposti dalla normativa attuale (UNIEN 338), quanto quelli dedotti dalla trattatistica (cfr. Rondelet, 1835 e Mazzocchi, 1871) poiché non sono chiare le condizioni di prova (che influenzano la resa strutturale) usate in quest'ultima. Ciononostante, alcuni dati presentati proprio dal Mazzocchi consentono di stabilire una corrispondenza tra i parametri di allora e quelli dei legnami massicci attuali di coltivazione italiana e di qualità medio-bassa secondo la UNI 11035 (Fig. 5). I parametri ottocenteschi sono determinabili previa applicazione dei soli coefficienti correttivi relativi alla classe d'uso e alla durata del carico, i quali sono espressione di caratteristiche intrinseche del materiale e possono quindi rappresentare un vincolo indipendentemente dall'epoca del "pro-

getto” (Decreto Min. Infrastrutture 17 gennaio 2018) (Fig. 6). Ovviamente, non avrebbe senso in questo contesto applicare il coefficiente di sicurezza del materiale oggi previsto dalla normativa.

I carichi agenti sui solai, pesi propri e carichi di esercizio, possono essere determinati, i primi in modo parametrico, utilizzando le diverse stratigrafie di pavimentazione ricostruite dal trattato vitruviano (Giuliani, 2006) (Fig.7), oppure riferendosi a rinvenimenti archeologici; i secondi stimati in 150-200 kg/mq, sulla base di un generico uso residenziale, come già suggerito dalla manualistica e prescritto anche dalla normativa oggi vigente (Decreto Min. Infrastrutture 17 gennaio 2018) (Fig. 8).

Le incognite

I valori rimasti ancora incogniti dallo studio precedente corrispondono ad informazioni di natura geometrica del modello e riguardano i solai, nell'aspetto della dimensione delle sezioni, e la copertura, relativamente all'angolo d'inclinazione delle falde.

Dimensionamento delle travi

In termini moderni, il dimensionamento di una sezione strutturale può avvenire rispetto: a) alla resistenza (stato limite ultimo del materiale, cioè la condizione oltre alla quale si verifica la rottura del materiale) o, b) alla deformabilità (stato limite di esercizio, cioè la condizione per cui la deformazione della struttura risulta incompatibile con il suo uso); il legno è tipi-

	Nome dei legnami	Peso al m. ^o c. ^o	Valor medio del coefficiente di elasticità <i>E</i> al c. ^o q. ^o	Valor medio del coefficiente di resistenza <i>R</i> al c. ^o q. ^o
Legnami nazionali	Rovere (<i>quercus robur</i>)	Chil. ^l 1052	Chil. ^l 96589	Chil. ^l 106
	Cerro (<i>quercus cerris</i>)	» 901	» 134815	» 105
	Elce (<i>quercus ilex</i>)	» 985	» 181033	» 161
	Olmo	» 688	» 113967	» 174
	Noce	» 650	» 79964	» 85
	Faggio	» 649	» 112555	» 96
	Frassino	» 673	» 87695	» 83
	Pino di Calabria . . .	» 697	» 103191	» 99
	Somma	Chilog. ^l	909809	Chil. ^l 909
Valor medio generale: »		113726	» 113	
Legnami esteri	Pino di Corsica . . .	Chil. ^l 647	Chil. ^l 133370	Chil. ^l 112
	Abete di Trieste . .	» 467	» 88331	» 64
	Quercia di Stiria . .	» 683	» 75979	» 93
	Abete del Nord . . .	» 483	» 103508	» 65
	Pino dell'Oregon . .	» 601	» 158698	» 121
	Teak	» 615	» 138213	» 106
	Somma	Chilog. ^l	698099	Chil. ^l 561
Valor medio generale: »		116340	» 93	

Fig. 5
Proprietà del
legname a flessione
(da Mazzocchi 1871)

camente un materiale in cui quest'ultima condizione è spesso maggiormente vincolante rispetto alla rottura. A queste esigenze, entrambe note per via empirica alle generazioni di costruttori del passato, va poi aggiunta quella, c), per certi versi ancora più stringente, del risparmio del materiale, cioè del suo massimo sfruttamento. In tale problema di ottimizzazione, cioè di individuazione del minimo costo o del massimo beneficio, assume un ruolo determinante non tanto la singola dimensione della sezione ma la forma, espressa ad esempio dal rapporto ξ tra larghezza e altezza (nell'ipotesi di sezione rettangolare), e il tronco da cui la sezione strutturale viene ricavata (Fig.4).

Con riferimento ad una trave di solaio sollecitata a flessione verticale retta, fissato il diametro del tronco da cui la si ricava è possibile determinare la sezione che: a) massimizza la resistenza (cioè collassa per un carico più elevato); oppure b) minimizza la deformazione (si inflette meno); oppure ancora c) sfrutta meglio la sezione (utilizza meno materiale, cioè ottiene le stesse proprietà di una trave ricavata da un tronco più grande ma sagomata in modo differente). Per le tre condizioni si trova che ξ vale rispettivamente 0,71, 0,58 e 1; cioè la trave a sezione rettangolare più snella (caso b) è più rigida delle altre due (casi a e c), mentre quella quadrata (caso c) sfrutta appieno la sezione circolare. Questi risultati sono ottenibili sia per via analitica (Giordano, 1999; Sbrogiò, 2016) che con una semplice costruzione geometrica sulla sezione del tronco (Donghi, 1906) e sono peraltro confermati dai ritrovamenti archeologici (Ulrich, 1996; Adam, 1988) (Fig. 9).

Nelle abitazioni più povere di Pompei ed Ercolano, costituite da soppalchi sulla bottega sottostante, le travi sono tipicamente quadrate o circolari (Guidobaldi *et al.*, 2008; Ruggieri, 2017), rispondendo al criterio c), mentre nelle abitazioni ordinarie, anche se con qualche eccezione, sono rettangolari (Ulrich, 1996; Adam, 1988; Centola, 2018), oscillando tra i criteri a) e b) (Fig. 10). In altre circostanze, l'adozione di sezioni diverse è attribuita alla variabilità nell'approvvigionamento dei materiali (Menichelli e Scappin, 2011).

Per una trave in semplice appoggio di sezione rettangolare $b \times h$ e di luce strutturale netta l , sottoposta ad un carico lineare uniformemente ripartito r (dipendente in modo parametrico dallo spessore del pacchetto di pavimento e dall'interasse delle travi) è possibile ricavare l'espressione dell'altezza della sezione in funzione del citato rapporto $\xi = b/h$ e di un parametro strutturale di riferimento connesso o alla resistenza a flessione (modulo di resistenza, espressione (1)) o alla deformabilità (momento di inerzia, espressione (2)). La prima espressione è ottenuta scrivendo la legge di Navier in mezzera della trave, per ottenere la massima tensione; la seconda si ricava eguagliando l'abbassamento nello stesso punto intermedio della trave ad un valore limite di riferimento della freccia l/K , come viene illustrato in dettaglio in Appendice 2. Il significato delle lettere è dato in Appendice 1, mentre il pedice "d" indica il valore di progetto della grandezza (ossia moltiplicato per i coefficienti riportati in Fig. 6).

$$1 \quad h = \sqrt{\frac{3r l^2}{4\xi^2 f_d}} \quad 2 \quad h = \sqrt{\frac{5K r l^3}{32\xi^2 E_d}}$$

K è un numero puro intero che rappresenta la massima deformazione verticale ammissibile in mezzeria (cd. freccia) espressa in genere come frazione della luce; tipicamente è compreso tra 250 e 500 (con variazioni di 50), in cui i valori più alti corrispondono ad inflessioni minori e quindi a travi più rigide. Le due formule sono valide anche per sezioni rettangolari ad angoli smussati, entro certi limiti (Giordano 1999), mentre espressioni analoghe possono essere ottenute per le sezioni circolari (Sbrogio, 2016).

Uno studio parametrico delle due espressioni (Sbrogio, 2016; Centola, 2018) ha permesso di accertare che la (1) corrispondente al precedente caso a), restituisce, come previsto, sezioni più piccole della (2), rispondente alla situazione b).

La Tab. 4 riassume e confronta le caratteristiche dimensionali delle tracce di solaio rilevate ad Ercolano (Centola, 2018) con i risultati della citata analisi parametrica delle formule (1) e (2) per una situazione di carico ordinaria sugli orizzontamenti (ambiente residenziale, pavimentazione in battuto di malta di medio spessore). I dati di rilievo comprendono la sezione $b \times h$ delle travi (vengono qui considerate solo le travi rettangolari), il rapporto ξ tra le due misure, il passo i dell'orditura, l'altezza H dal piano di calpestio e infine il rapporto l/h , cioè l'inverso del rapporto normalmente usato per progettare (solo ai fini di una più immediata valutazione). La spaziatura delle travi, relativamente ridotta, fino al limite della stessa larghezza della sezione lignea, è un parametro importante, perché da essa dipende l'entità del carico ripartito agente sulle travi. È evidente la preferenza per la sezione tozza ($\xi_m \approx 0,75$) e di notevole altezza ($l/h < 20$) rispetto alla luce. Le medie pesate sono ottenute rispetto al numero di fori rilevati in ogni ambiente (Tab. 4).

La valutazione numerica tramite la (1) e la (2) è ottenuta considerando i parametri relativi a legno di conifera "Centro-Sud" classe S3 secondo UNI 11035; applicando i coefficienti riduttivi relativi alla classe di servizio 2 (interno non riscaldato) con $K_{mod}=0,6$, $K_{d_{ef}}=2$; carico distribuito lineare sulle travi di 200 kg/m a passo di 40 cm (medio desunto dal rilievo), corrispondente ad una pavimentazione in battuto di malta spessa 20-25 cm (per un totale di 250-300 kg/mq) e carichi accidentali dell'ordine dei 150-200 kg/mq; limite di deformabilità fissato a $K=500$.

L'altezza calcolata, se rapportata alla luce della trave, corrisponde al rapporto altezza-luce di $1/24$ per la (1), mentre la (2) restituisce dimensioni che si avvicinano al rapporto $1/18$. Il confronto (Tab. 4) coi valori da rilievo mette in luce la commistione dei due criteri, cioè l'uso di sezioni relativamente tozze (espressione (1)) ma dimensionate per ridurre all'inflessione (formula (2)), segno del tentativo di ottimizzare l'uso del materiale senza compromettere l'utilizzabilità delle strutture orizzontali.

L'informazione relativa all'altezza di interpiano viene usata in seguito (cfr. par. 2.3.2) nell'espressione (6) per ottenere l'inclinazione della falda di copertura.

		da rilievo								da calcolo			
Insula	Casa	Fori alloggiamento travi conservati	Luce ℓ [m]	b [m]	h [m]	ξ	H [m]	i [m]	ℓ/h	h resistenza [m]	h rigidezza [m]	L/h res	L/h rig
II	Aristide	12	4,8	0,2	0,2	1,00	3,35	0,2	24	0,20 (*)	0,24	24	20
III	Tramezzo di legno	3	3,47	0,15	0,2	0,75	1,45	0,48	17	0,18	0,20 (*)	19	17
III	Tramezzo di legno	7	3,83	0,15	0,2	0,75	3,65	0,22	19	0,19 (*)	0,22	20	18
III	Erma di bronzo	7	2,7	0,10	0,15	0,67	3,5	0,33	18	0,16 (*)	0,17	17	16
III	Erma di bronzo	9	2,14	0,24	0,15	0,63	2,68	0,38	14	0,14	0,15 (*)	16	15
IV	Atrio a mosaico	12	3,13	0,20	0,27	0,75	-	0,48	12	0,17	0,19	19	17
IV	Alcova	5	2,29	0,13	0,15	0,87	1,9	0,35	15	0,13	0,14 (*)	18	16
IV	Alcova	4	2,75	0,15	0,15	1,00	2	0,35	18	0,14 (*)	0,16	20	17
IV	Alcova	10	2,92	0,20	0,2	1,00	2,57	0,29	15	0,14	0,16	20	18
IV	Alcova	10	2,92	0,14	0,15	0,90	2,4		19	0,15 (*)	0,17	19	17
IV	Dei Cervi	8	2,59	0,30	0,21	0,70	3,23	0,26	12	0,15	0,16	17	16
V	Nettuno e Anfritrite	8	2,494	0,10	0,15	0,67	2,45	0,38	17	0,15 (*)	0,16	17	15
V	Del bel Cortile	24	3,92	0,15	0,25	0,60	3,27	0,545	16	0,21	0,23 (*)	19	17
V	Apollo Citaredo	4	4,23	0,15	0,3	0,50	-	0,83	14	0,23	0,26	18	16
V	Bicentenario	10	4,51	0,16	0,3	0,53	3,69	0,45	15	0,24	0,27 (*)	19	17
V	Colonna laterizia	7	5	0,15	0,24	0,63	2,43	0,27	21	0,24 (*)	0,28	21	18
V	Colonna laterizia	4	2,73	0,15	0,2	0,75	2	0,45	14	0,15	0,17 (*)	18	16
V	Del gran portale	6	1,96	0,15	0,15	1,00	1,47	0,25	13	0,11	0,12 (*)	18	16
VI	Colonnato tuscanico	7	2,9	0,20	0,3	0,67	-	0,33	10	0,17	0,18	18	16
VI	Colonnato tuscanico	7	2,84	0,20	0,3	0,67	3,7	0,32	9	0,16	0,18	17	16
VI	Salone nero	5	3,29	0,21	0,16	0,76	1,99	0,3	21	0,17 (*)	0,19	19	17
VI	Salone nero	7	3,29	0,13	0,13	1,00	3,41	0,33	25	0,16 (*)	0,18	21	18
VI	Salone nero	4	3,14	0,20	0,3	0,67	-	0,3	10	0,17	0,19	18	16
VII	Galba	3	2,23	0,06	0,06	1,00	3,7	0,96	37	0,12	0,13	18	17
Or. I	Grananius	32	4,12	0,12	0,2	0,60	4,3	0,43	21	0,22 (*)	0,24	19	17
Or. I	Gemma	9	4,64	0,10	0,15	0,67	3,29	0,45	31	0,23	0,26	21	18
Dec. inf.	Ingresso 12-13	4	2,42	0,20	0,3	0,67	2,95	0,34	8	0,15	0,16	17	15
MEDIA						0,75	2,84	0,40	17			19	17
MEDIA PESATA						0,73	-	-	18				

(*) corrispondenza tra valore misurato e reale (tolleranza +/- 3 cm)

La coesistenza dei due rapporti si spiega pertanto con un doppio criterio dimensionale, in funzione del ruolo strutturale: sezioni più sfruttate (e quindi più piccole) sono impiegate per la semplice orditura, mentre sezioni più generose si adottano per i rompitratta (le travi principali che sorreggono l'orditura semplice nel caso di luci più elevate).

Per l'orditura semplice (Fig. 4) è infatti sufficiente evitare il collasso ed è ammissibile una certa inflessione, per i rompitratta è invece più importante limitare l'inflessione (se la resistenza è già assicurata) per impedire la sconnessione dell'orditura soprastante. Questi ultimi, se si guarda all'edilizia storica, presentano in genere sezione quadrata poiché, essendo di notevole dimensione, cercano di sfruttare al massimo il materiale in accordo con il criterio c) enunciato in apertura di paragrafo.

Non va dimenticata la necessità di riscontro fisico dei risultati della formula, ottenibile dal confronto con le dimensioni dei legni effettivamente disponibili sui mercati, poiché la dimensione delle travi, in termini di lunghezza e sezione, dipende dall'altezza e dal diametro del tronco reale, a loro volta funzione dell'età dell'albero (Bertogliati e Conedera, 2012). Non potendo ipotizzare una disponibilità illimitata di alberi secolari da poter impiegare nelle costruzioni, nella pratica corrente è evidente il limite di 4-5 m per la luce dei solai ordinari, attestato anche dalla manualistica (Mazzocchi, 1871; Donghi, 1906). La Fig. 11 riassume le dimensioni in circolazione prima dell'avvento del legno lamellare.

pagina a fronte

Tab. 4

Rilievo delle sezioni lignee impiegate in alcuni ambienti domestici ad Ercolano (Centola, 2018) confrontate con le misure ottenibili dal calcolo

Fig. 6

Coefficienti correttivi del materiale legno proposti dalla normativa attuale:

- a. K_{mod} rispetto alla durata del tempo di applicazione del carico;
- b. K_{def} rispetto alla classe di esposizione in funzione di temperatura ed umidità medie dell'ambiente, (estratti dalle Tab. 4.4. IV e Tab. 4.4. V del Decreto Min. Infrastrutture 14 gennaio 2008)

materiale	riferimento	classe di servizio	classe di durata del carico				
			permanente	lunga	media	breve	istantanea
legno massiccio	EN 14081-1	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
legno lamellare incolato	EN 14080	2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

materiale	riferimento	classe di servizio		
		1	2	3
legno massiccio	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00

Per legno massiccio posto in opera con umidità prossima al punto di saturazione, e che possa essere soggetto a essiccazione sotto carico, il valore di k_{def} dovrà, in assenza di idonei provvedimenti, essere aumentato a seguito di opportune valutazioni, sommando a i termini della tabella un valore comunque non inferiore a 2,0.

Pendenza del tetto

Di fronte alla necessità archeologica di risalire, a partire dalla configurazione globale dell'edificio, planimetrica ed altimetrica, all'inclinazione della falda di copertura, è sembrato opportuno fare ricorso al ricordato approccio per catene cinematiche. Nel metodo originale, la compagine strutturale, se la qualità muraria lo consente, è scomposta in corpi rigidi sottoposti a forze macroscopiche verticali (pesi delle strutture), stabilizzanti, e orizzontali (sismiche), destabilizzanti, di cui si studiano semplici condizioni di equilibrio rispetto a cerniere o sistemi di cerniere ideali (Fig. 12). Tuttavia,

nelle condizioni esclusivamente statiche dello specifico problema allo studio, poiché l'unica forza ribaltante è quella dovuta alla spinta della copertura, è possibile risalire da questa all'inclinazione della falda da cui ne dipende l'entità.

Il metodo cinematico prevedrebbe di individuare, tra i vari possibili, il meccanismo di collasso con il coefficiente di attivazione minore in quanto quello più probabile: ciò implicherebbe di esplorare un numero consistente di configurazioni possibili degli elementi monolitici in movimento. Ciascuna configurazione cinematica, infine, dovrebbe essere ulteriormente combinata con l'intera gamma di situazioni archeologico-architettoniche ottenibile permutando orditure, pacchetti di finitura e sezioni degli elementi in solai e coperture illustrate in Tabella 1 e ricavate dalle espressioni (1) e (2). Allo scopo di validare la procedura di calcolo qui proposta, si considera solamente la condizione di collasso più gravosa e tale da meglio evidenziare i rapporti tra le forze in gioco, rappresentata dal meccanismo di ribaltamento semplice e monolitico di una parete perimetrale attorno ad una cerniera posta a filo esterno (punto H in Fig. 13) nel quale le diverse situazioni architettoniche (orditura, pacchetto di finitura del solaio, dimensioni degli elementi strutturali) vengono "condensate" nei parametri di carico statico agenti sul sistema, paralleli o ortogonali al piano medio della parete, descritti nella stessa Fig. 13.

L'assunzione di monolitismo della parete dipende dalla buona qualità della malta romana usata per il nucleo delle murature, di cui è stata dimostrata la tenacità, anche a distanza di secoli, e l'affinità coi materiali tipicamente usati per la costruzione delle murature in area campano-laziale quali tufo e mattoni, comprovati sia dall'osservazione in sito (Adam, 1988), sia da analisi in microscopia (Jackson, 2009 e Jackson, 2014). Di converso, si ritiene che il ribaltamento avvenga senza il trascinarsi di "cunei" delle pareti di spina per mantenere un maggior margine di sicurezza.

Fig. 7
Possibili stratigrafie di pavimentazione ricostruite sulla base delle indicazioni vitruviane (da Giuliani 2006)

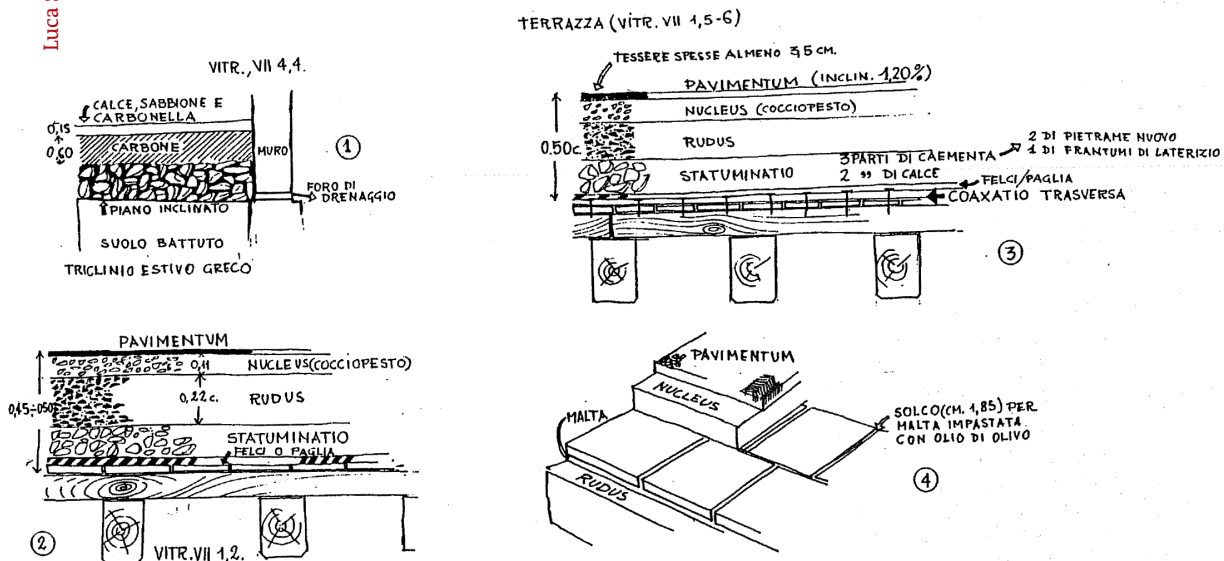


Fig. 8
Carichi di esercizio
impiegati a metà
Ottocento (da
Mazzocchi 1871)

INDICAZIONE DEI LOCALI	PESO PER METRO QUADRATO		VALORE DI P_1	
	dell'orditura del solaio	del sovracarico addizionale		
CASE D'ABITAZIONE				
Camere rustiche a semplice pavimento d'assi	Ch. ¹ 50	Ch. ¹ 150	Ch. ¹ 200	
Camere civili, gabinetti, ecc. . .	» 150	» 100	» 250	
		» 150	» 300	
Sale ordinarie	» 150	» 200	» 350	
Grandi sale	» 150	» 300	» 450	
EDIFICI PUBBLICI				
Uffici, sale ordinarie	» 150	» 200	» 350	
Sale di riunione	» 180	» 320	» 500	
Grandi sale per assemblee . . .	» 180	» 420	» 600	
Magazzini, docks, ecc.	» 50	» 450	» 500	
		» 100	» 900	» 1000

Infine, attraverso uno studio parametrico preliminare gli autori hanno riscontrato la difficoltà nel controllare l'effetto di schiacciamento della muratura con conseguente allontanamento della cerniera dal filo esterno al centro della parete e pertanto si è ritenuto più opportuno considerare la muratura come infinitamente resistente a compressione (condizione ammissibile anche dalla vigente normativa sismica, cfr. Circ. Min. Infrastrutture 2 febbraio 2009).

La spinta orizzontale S dei puntoni, per una striscia verticale di parete profonda 1 m, si può esprimere come (Sbrogìò, 2016):

$$3 \quad S = cpl \operatorname{sen} \alpha$$

La (3) è fisicamente plausibile poiché il modulo di S aumenta da 0° a 45° per poi diminuire fino ai 90° , passando cioè da una trave orizzontale ad un "pilastro" in legno in appoggio alla muratura.

Si è deciso inoltre di esprimere il coefficiente numerico, che da calcolo risulta pari a $1/2$, attraverso il fattore c , per tenere conto della progressiva inflessione delle travi che fa aumentare la spinta col passare del tempo. Il campo di variazione di c è compreso tra $0,5$ (al momento della messa in opera) e 1 (al momento della sostituzione del tetto), ma lo studio parametrico ha dimostrato che il limite superiore può essere convenientemente fissato a $0,75$ (Sbrogìò, 2016). Il carico verticale del tetto all'appoggio sulla parete risulta (Sbrogìò, 2016) (Fig. 14):

$$4 \quad P = pl(1 + \operatorname{sen}^2 \alpha) / 2$$

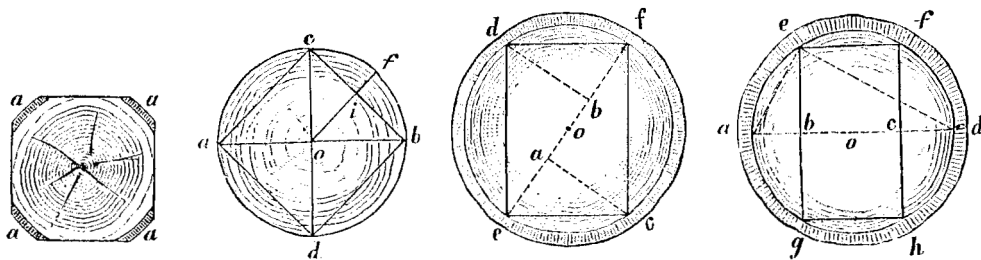


Fig. 9
 Sezioni squadrate ottenibili da un tronco (di diametro costante); da sinistra a destra: sgrossatura del tronco, costruzione per massimo sfruttamento del materiale (caso c); costruzione "a resistenza" (a) e "a rigidezza" (b) (da Donghi 1906)

pertanto, la condizione di equilibrio della parete si può scrivere come:

$$5 \quad SH = Wb + (P+N) d$$

Sostituendo (3) e (4) in (5) si ottiene un'equazione goniometrica non omogenea di secondo grado che, tramite la posizione $Z = [2 Wb + dl (q + p)] / (pl)$ e l'applicazione della relazione fondamentale della goniometria, restituisce:

$$(Z + d) \tan^2 \alpha - 2 c H \tan \alpha + Z = 0$$

la quale ammette soluzioni per:

$$6 \quad \alpha_{1,2} = \arctan \frac{cH \pm \sqrt{c^2 H^2 - Z(Z+d)}}{Z+d}$$

Delle due soluzioni possibili, l'unica che abbia significato fisico si ottiene ponendo il meno al numeratore. La formula si riferisce al caso più generale di un edificio a due piani; per poter considerare il ribaltamento di un solo piano è sufficiente porre N (cioè il carico di superficie q) pari a zero e ridurre coerentemente l'altezza H.

Validazione del metodo

La formula (6) permette di legare le caratteristiche deducibili dalla planimetria dell'edificio (spessore dei muri, dimensioni degli ambienti, tipologia muraria), ad un dato incognito degli alzati (l'inclinazione del tetto) passando attraverso una serie di valori di input archeologici variabili entro certi limiti (pesi della copertura e del solaio, altezza di piano) che fungono da parametri.

Essa esprime il raggiungimento di una condizione limite indesiderabile, rappresentata dal ribaltamento della parete o dall'apertura di lesioni alla base, rispetto alla quale il costruttore antico poteva porsi ad un'adeguata "distanza di sicurezza".

In quanto tale, il risultato va inteso come valore ultimo di uno "spettro" di valori e non "il" valore deterministico di inclinazione della copertura.

Lo studio parametrico della (6), ossia l'applicazione sistematica a casi diversi variando un parametro per volta, ha dimostrato che essa restituisce pendenze comprese tra il 25 e il 45% (angoli tra i 14° e i 24°), corrispondenti ai valori più comuni riscontrati nella pratica edilizia tradizionale (Rondelet, 1835; Mazzocchi, 1871; Barbisan e Laner, 1997b).

Tuttavia, esistono combinazioni di carichi e geometrie, in particolare in presenza di pareti particolarmente spesse (circa 60 cm o 2 piedi antichi), per le quali la (6) non porge un risultato utile, vale a dire: a) l'angolo è superiore o inferiore ai limiti costruttivi del tetto oppure b) non si ha alcun risultato, cioè la parete è stabile per qualsiasi valore della spinta.

Nel primo caso, nonostante sia assicurato il senso fisico del problema (cfr. *supra* formula (3)), non si ha un riscontro con la prassi costruttiva; nel secondo le indicazioni provenienti da sito non sono sufficienti per completare l'analisi. In entrambi i casi si deve ricorrere alle regole del buon costruire proprie della zona e dei materiali adottati per risolvere il problema, cioè, in particolare, individuare l'inclinazione per la quale sia garantito il deflusso dell'acqua secondo la zona climatica, deducendolo ad esempio dalla manualistica (Fig. 15).

Gli intervalli di inclinazione della copertura per spessori di parete compresi tra 30 e 60 cm (1-2 piedi antichi), altezze di interpiano di circa 3 m così come dedotte dalla Tab. 4, spaziatura delle murature parallele ordinaria, tale da consentire di coprire le luci strutturali con una semplice orditura lignea, numero di piani variabile tra uno e due, fissati i materiali e i carichi per condizioni ritenute tipiche per Pompei, sono esposti, parzialmente, nella seguente Tab. 5 (Centola, 2018).



Fig. 10
Pompei, diverse forme degli alloggiamenti delle travi nelle murature: tonde o approssimativamente sgrossate. (foto degli autori, dicembre 2015)

N°	Luce [m]	Spessore muro [cm]	Inclinazione falda (edificio a 1 piano)	Inclinazione falda (edificio a 2 piani)
1	2	30	45° (100%)	18,26° (33%)
2		35	45° (100%)	26,57° (50%)
3		40	45° (100%)	45° (100%)
4		45	45° (100%)	45° (100%)
5		50	45° (100%)	45° (100%)
6	3	30	21,8° (40%)	12,41° (22%)
7		35	34,99° (70%)	17,22° (31%)
8		40	45° (100%)	23,27° (43%)
9		45	45° (100%)	32,62° (64%)
10		50	45° (100%)	45° (100%)
11	4	30	16,17° (29%)	9,65° (7%)
12		35	23,27° (43%)	13,5° (24%)
13		40	36,13° (73%)	17,74° (32%)
14		45	45° (100%)	22,78° (42%)
15		50	45° (100%)	30,11° (58%)
16	5	30	13,5° (24%)	8,58° (15%)
17		35	18,78° (34%)	11,31° (20%)
18		40	25,64° (48%)	14,04° (25%)
19		45	45° (100%)	18,26° (33%)
20		50	45° (100%)	23,27° (43%)

Tab. 5
Alcuni esempi dei valori ultimi di pendenza della falda del tetto in funzione della luce strutturale, spessore della parete e del tipo di muratura (opera incerta senza nucleo) di un edificio a uno o due piani con altezza di interpiano pari a 3 m. Nel caso a due piani è stato ipotizzato un solaio con una preparazione pavimentale spessa 15 cm con peso di volume pari a 1350 kg/mc su un tavolato spesso 2 cm. In corrispondenza di un'inclinazione di 45° non si verifica il ribaltamento (da Centola, 2018)

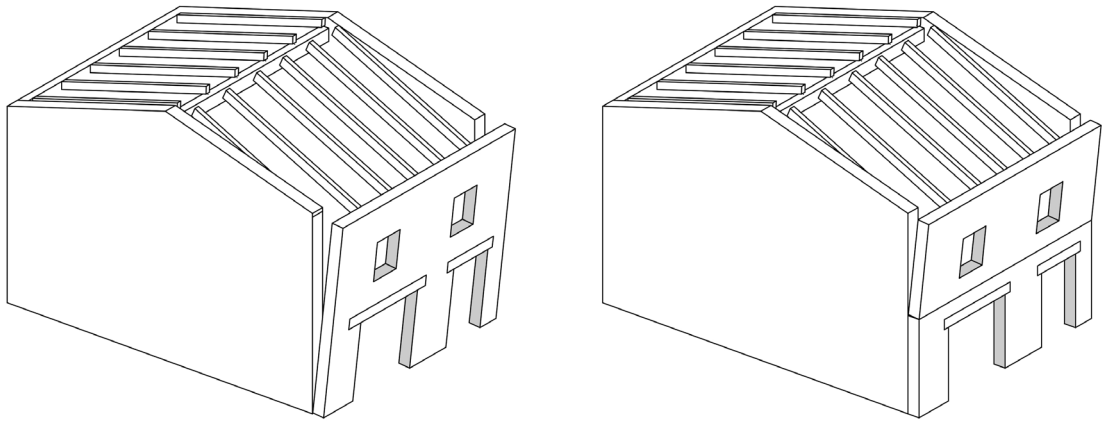
Fig. 11
Dimensioni dei
legnami venduti a
Roma (da Cavalieri
San Bertolo 1832)

classificazione	Denominazioni usuali d'assortimento	lunghezza		larghezza		groscezza		Avvertenze	
		palmi romani	metri	once romane	metri	once romane	metri		
travi di castagno	Corda	50	11,17	"	"	24,0	0,447	Le grossezze assegnate alle travi debbono sussistere a distanza di dieci palmi, o sia met. 2,234 dal piede, cioè dall'estremità più grossa. Le travi che hanno una lunghezza maggiore della tabulare si denotano con l'aggiunto rinforzati. Così corda rinforzata vuol dire una corda più luoga di palmi 50, cioè di met. 11, 17; ec.	
	Cordicella	45	10,05	"	"	18,0	0,335		
	Legnotto	40	8,94	"	"	15,0	0,279		
	Arcareccio	35	7,82	"	"	12,0	0,223		
	Carrareccio	30	6,70	"	"	10,0	0,186		
Colonna d'un palmo	14	3,13	"	"	12,0	0,223			
Colonna di dieci once	14	3,13	"	"	10,0	0,186			
travicelli di castagno	Travicellone	25	5,59	"	"	8,0	0,149		
	Filagnone	24	5,36	"	"	7,0	0,130		
	Filagna di mezzo palmo	20	4,47	"	"	6,0	0,111		
	Filagna di cinque once	20	4,47	"	"	5,0	0,093		
	Palombello	15	3,35	"	"	6,0	0,111		
tavoloni di castagno	Travicello da sedici	16	3,57	"	"	6,0	0,111	Oltre il castagno, di cui è massimo l'uso, i legnami diversi più comunemente usati in Roma sono il pioppo, volgarmente detto al-buccia, l'olmo, il pino, il noce, il pero, il sorbo, ec.	
	Travicello da tredici	13	2,90	"	"	5,0	0,093		
	Travicelletto da sedici	16	3,57	"	"	4,0	0,074		
	Travicelletto da tredici	13	2,90	"	"	3,0	0,056		
	Limoncello	"	"	"	"	3,0	0,056		
Piana da quindici	15	3,35	6,0	0,111	3,0	0,056			
Piana da dodici	12	2,68	6,0	0,111	3,0	0,056			
tavole di castagno	Tavola da soloio	9	2,01	"	"	1,5	0,028		Pel tavolone le dimensioni notate sono le minime che possa avere. Se la lunghezza d'un tavolone è minore di palmi 12 caso si distingue col nome di mozzetta. Il tavolone ricavato dal mezzo d'un fusto dieci mozzareccia; i laterali chiamansi acciatani.
	Regolo da soloio	0	2,01	4,0	0,074	1,0	0,019		
	Tavolone	"	2,68	"	"	6,0	0,111		
tavoloni di legni diversi	Fetta di sei once	"	"	"	"	6,0	0,111		
	Fetta di tre once	"	"	"	"	3,0	0,056		
	Tavola di mezza groscezza	"	"	"	"	3,0	0,056		
	Tavola del sesto	"	"	"	"	2,0	0,037		
tavole di legni diversi	Tavola interzata	"	"	"	"	1,6	0,030		
	Tavola ordinaria	"	"	"	"	1,2	0,022		
	Tavola mezzanella	"	"	"	"	0,6	0,011		

Conclusioni

L'approccio proposto nasce dalla convinzione che, seppur con le dovute specificità, sia possibile unire le conoscenze e gli strumenti propri di diverse discipline, mutuamente rielaborati, al fine di determinare parametri altrimenti non disponibili delle costruzioni antiche o non direttamente correlabili con quanto di esse oggi rimane. Si è cercato in particolare di proporre un modo nuovo di interpretazione dei dati archeologici, guardando con una diversa ottica ai dati già a disposizione, o sfruttando informazioni apparentemente difficili da collegare.

Nel caso qui illustrato, si sono potuti ricostruire i caratteri geometrici dell'impianto tipico delle case romane del Centro-Sud Italia, con particolare riferimento alle dimensioni delle componenti degli orizzontamenti lignei (solai e coperture), validati sulla base del comportamento statico ammissibile dell'edificio e in rispondenza alle previsioni più generali dell'attuale normativa tecnica. Successivamente si è cercato di definire un legame tra la configurazione in pianta e lo sviluppo tridimensionale dell'edificio tramite un approccio volutamente semplificato ma facilmente controllabile e dipendente da poche informazioni.



Nell'attuale fase di validazione è stato possibile ottenere sia un'indicazione di progetto per le travi degli orizzontamenti, sia una ricostruzione volumetrica semplificata dell'edificio.

Le travi risultano a sezione rettangolare tozza ma sovrabbondanti rispetto alle necessità di contenimento dell'inflessione, segno di una precoce intuizione, anche se del tutto empirica, delle principali regole di progettazione di queste strutture. Nella ricostruzione delle volumetrie, si è studiato l'assetto di edifici murari con orizzontamenti lignei, in funzione di murature di spessore compreso tra i 30 e i 60 cm, altezze di interpiano attorno ai 3 m e dimensioni ordinarie degli ambienti coperti con solai ad orditura semplice (4-5 m), che sono state riconosciute essere rappresentative delle condizioni dell'edilizia pompeiana. Per tali dati in ingresso è stata infine determinata un'indicazione di pendenza delle falde di copertura tra il 20 e il 45%, salvo correzioni apportate in funzione della reale capacità di smaltimento delle acque meteoriche in rapporto alle caratteristiche costruttive dei tetti antichi.

Nonostante, in via preliminare, l'applicazione sia riferita ad un ambito specifico dell'edificato antico, l'approccio offre numerose prospettive di estensione sistematica in altri ambiti tipologici e territoriali e di approfondimento di ulteriori tipi costruttivi (lo studio, ad esempio, della capriata nell'antichità), coadiuvato anche dall'implementazione delle formule analitiche nel software dedicato.

È in corso di studio la trasformazione del programma di calcolo in una piattaforma web accessibile da remoto; tale ampliamento consentirà, inoltre, di integrare nuovi contributi per possibili affinamenti alla procedura. Il metodo, si propone esplicitamente come strumento di supporto all'interpretazione dei dati archeologici, ossia di fornire campi di variabilità numerica più che singoli valori deterministici delle grandezze incognite delle stesse e di farlo in modo agevole, anche per chi non possieda una specifica formazione ingegneristica. Le informazioni dedotte sono pertanto in grado di offrire allo studioso una vera e propria gamma di ipotesi plausi-

Fig. 12
Schematizzazione di diversi meccanismi collasso per macroelementi di murature d'ambito (disegno degli autori)

bili, corroborate dall'applicazione di criteri provenienti da altre discipline, aprendo così la possibilità di ulteriori margini di comprensione ed interpretazione della storia antica.

APPENDICE 1 - notazione matematica

Significato dei simboli adottati nelle formule:

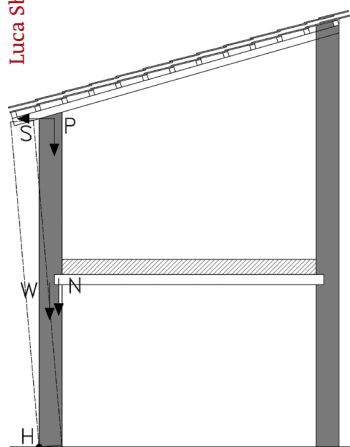
- h* altezza della sezione della trave
- b* larghezza della sezione della trave
- i* spaziatura di travi ad orditura semplice
- I* distanza dei rompitratta nel solaio ad orditura doppia
- s* spessore della pavimentazione nei solai in legno
- r* carico distribuito linearmente su una trave di solaio
- t* spessore della muratura
- b=t/2* braccio del peso proprio
- d=2t/3* braccio dei carichi verticali di solaio e copertura.

Nota: se si assume che le travi di tetti e solai penetrino nella muratura per circa metà dello spessore di quest'ultima, e che all'appoggio si verifichi una distribuzione triangolare del carico di contatto (nulla a filo interno del muro, massima in mezzeria, cfr. Barbisan e Laner, 1997a), la risultante di quest'ultimo cade nel baricentro del triangolo, posto a *t/6* dalla mezzeria e pertanto alla distanza indicata dal filo esterno

l luce strutturale degli elementi

- H* altezza delle murature da un piano di calpestio all'intradosso del piano successivo
- p* carico distribuito superficiale in copertura in direzione globale
- q* carico distribuito superficiale in copertura in direzione globale
- S* spinta orizzontale del tetto
- P* carico verticale del tetto
- N* peso dell'orizzontamento
- W* peso proprio della parete
- ξ rapporto tra i lati di una sezione lignea (*b/h*)
- K* [250; 300; 350; 400; 450; 500], frazione della luce ammissibile in deformazione
- α inclinazione della copertura
- c=1/2* coefficiente relativo alla spinta del solaio in cima alla parete
(valore massimo pari a 0,75, per considerare l'aumento di spinta dovuto alla deformazione delle travi del tetto)
- E* modulo elastico del materiale
- f_d* resistenza a flessione di progetto del materiale (legno)
- f_m* resistenza a compressione (muratura)

Fig. 13
Rappresentazione schematica delle azioni agenti sulla parete nel calcolo del cinematicismo (disegno degli autori)



APPENDICE 2 - ottenimento delle espressioni matematiche

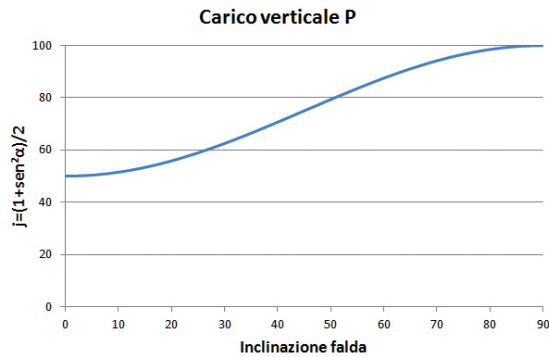
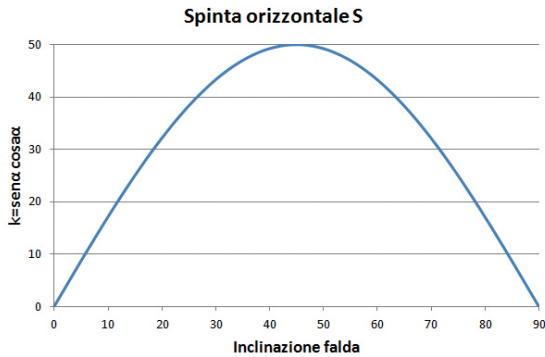
Espressione (1):

Dalla scienza delle costruzioni, il massimo momento sollecitante *M* per una trave in semplice appoggio e caricata in modo uniforme è pari a:

$$7 \quad M = ql^2 / 8$$

Per la legge di Navier risulta che la massima tensione al lembo della sezione della trave inflessa è

$$8 \quad f = M / W$$



Con W modulo di resistenza della sezione rettangolare, pari a $W=bxh^2/6$. Avendo posto $\xi=b/h$ è immediato ottenere $W = \xi h^3/6$. Sostituendo la (7) nella (8) con W espresso in funzione di ξ , si ha:

$$f = \frac{ql^4/8}{\xi h^3/6}$$

Semplificando ed esplicitando h si ottiene la (1).

Espressione (2):

L'abbassamento verticale in mezzeria η della trave posta nelle stesse condizioni di vincolo e di carico descritte in precedenza è espresso dalla:

$$9 \quad \eta = \frac{5ql^4}{384EJ}$$

Dove J è il modulo d'inerzia della sezione, il quale per una sezione rettangolare è pari a $J = bxh^3/12$. Esprimendo nuovamente b come ξxh e η come una frazione della luce della trave (l/K), si ottiene:

$$\frac{l}{K} = \frac{5ql^4}{384E h^4/12}$$

Semplificando dove possibile ed esplicitando h si risale quindi alla (2).

Fig. 14
Graficizzazione delle espressioni (3) e (4) riferite in percentuale alla reazione vincolare della trave orizzontale in semplice appoggio: a. spinta orizzontale S esprimendo la (3) come $\text{cost} \cdot k$, in cui $\text{cost} = c \cdot p \cdot l = 1$ e $k = \text{sen} \alpha \cos \alpha$; b. carico verticale P esprimendo la (4) come $\text{cost} \cdot j$, in cui $\text{cost} = p \cdot l = 1$ e $j = (1 + \text{sen}^2 \alpha) / 2$

Qualità della copertura	Inclinazione del tetto
Tegole cave posate a secco	da 21° a 27°
» murate	» 27 » 31
» piatte ad uncino	» 33 » 45
» maritate (tetto alla romana)	» 20 » 26
» fiamminghe	» 40 » 50
Ardesie	» 33 » 45
Lamine metalliche (rame, zinco, ferro).	» 18 » 21
Paglia, assicelle, tavole	» 40 » 50
Tela incatramata, cartoni, ecc.	» 20 » 25

Fig. 15
Inclinazioni dei tetti suggerite in funzione del manto di copertura del tetto (da Mazzocchi 1832)

Bibliografia

- Adam J.P. 1988, *L'arte di costruire presso i Romani*, a cura di M.P. Guidobaldi, Longanesi, Milano
- Barbisan U., Laner F. 1997a, *I solai in legno. Soluzioni tradizionali, elementi innovativi, esempi di dimensionamento*, Franco Angeli, Milano
- Barbisan U., Laner F. 1997b, *Capriate e tetti in legno. Progetto e recupero*, Franco Angeli, Milano
- Bertogliati M., Conedera M. 2012, *Stima dell'età degli alberi: problemi e validazione dei principali approcci metodologici esistenti all'esempio di dati raccolti al Sud delle Alpi*, «Bollettino della Società ticinese di scienze naturali», C, (1), pp. 25-42
- Benvenuto E. 1981, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Sansoni, Firenze
- Bianchini M. 2010, *Le tecniche edilizie nel mondo antico*, Dedalo, Roma
- Cagnana A. 2000, (a cura di) *Archeologia dei materiali da costruzione*, Mantova
- Camardo D., Casieri M.B., D'Andrea A., Heussner U., Kastenmeiere P., Notomista M. 2015, *Studio dei legni del tetto e del controsoffitto della casa del Rilievo di Telefo ad Ercolano: tracce di lavorazione, tecniche di carpenteria, analisi dendrocronologiche e documentazione archeologica*, «Mitteilungen des Deutschen Archäologischen Instituts Römische Abteilung», CXXI
- Camardo D., Notomista M. 2014, *La scoperta del tetto in legno del Salone dei Marmi della Casa del rilievo di Telefo di Ercolano (Italia)*, in XVIII CIAC: Centro y periferia en el mundo clásico. El hábitat doméstico en el mundo clásico, a cargo de J.M. ÁlvarezMartínez, T. Nogales Barrate, I. Rodà de Llanza, vol. II pp. 1043-1047
- Centola, 2018, *I sistemi di copertura nelle domus di età romana*, tesi di dottorato, tutor Jacopo Bonetto, non pubblicato
- Cantalupi A. 1862, *Istituzioni pratiche elementari sull'arte di costruire le fabbriche civili*, Tipografia Domenico Salvi e comp., Milano
- Cavalieri San Bertolo N. 1832, *Istituzioni di architettura statica ed idraulica*, F.lli Negretti, Mantova
- Choisy A. 1873, *L'art de bâtir chez les Romains*, Ducher et C., Paris
- Curioni G. 1872, *L'arte di fabbricare, ossia corso completo di istituzioni teorico-pratiche*, A. F. Negro, Torino
- De Fino C. (a cura di) 2013, *Il recupero sostenibile dell'edilizia dei primi decenni del ventesimo secolo mediante materiali e tecniche innovative*, Consiglio Regionale della Basilicata
- Di Pasquale G., Allevato E., Moser D., Nello O. 2012, *Wooden resource and timber use in Roman Campania: economical and ecological implications* in Scienze naturali e archeologia, a cura di A. Carrallo, M.R. Senatore., Roma, pp. 129-131
- Donghi D. 1906, *Manuale dell'architettura. Compilato sulla traccia del Baukunde des architekten*, vol. I, parte I, UTET, Torino
- Giavarini C., Samuelli Ferretti A., Santarelli M.L. 2006, *Mechanical Characteristics of Roman 'Opus Caementicium'*, in *Fracture and Failure of Natural Building Stones. Applications in the Restoration of Ancient Monuments*, ed. S.K. Kourkolis
- Ginouévès R., Martin R. 1985, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine, I. Matériaux, techniques et formes du décor*, Collection de l'Ecole française de Rome, 84, Rome-Athènes
- Ginouévès R. 1992, *Dictionnaire méthodique de l'architecture grecque et romaine, II. Eléments constructifs: supports, couvertures, aménagements intérieurs*, Collection de l'Ecole française de Rome, 84, Rome-Athènes
- Giordano G. 1999, *Tecnica delle costruzioni in legno*, Hoepli, Milano
- Giovannoni, G. 1925, *La tecnica della costruzione presso i Romani*, Società editrice d'arte illustrata, Roma
- Giuffrè A. (a cura di) 1993, *Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso Ortigia. Codice di pratica per gli interventi antisismici nel centro storico*, Laterza, Roma
- Giuliani C.F. 2006, *L'edilizia nell'antichità*, La nuova Italia scientifica, Roma, ed. or. 1990

- Giuliano M. 2010, *I materiali da costruzione di Pompei: provenienza, estrazione, tecniche edilizie*, tesi di laurea, rel. A. De Simone, non pubblicato
- Guidobaldi M.P., Camardo D., Esposito E., Tommasino E. 2008, *I solai e gli architravi lignei dell'antica Ercolano*, in *Nuove ricerche archeologiche nell'area vesuviana (scavi 2003-2006)* a cura di P.G. Guzzo, M.P. Guidobaldi, Roma, pp. 558-560
- Gros P. 2001, *Architecture romaine du début du 3. Siècle av. J.-C. à la fin du Haut-Empire. Maisons, palais, villas et tombeaux*, vol. II, Picard, Paris
- Jackson M.D., Logan J.M., Scheetz B.E., Deocampo D.M., Cawood C.G. et al. 2009, *Assessment of material characteristics of ancient concretes*, *Grande Aula, Markets of Trajan, Rome*, «Journal of Archaeological Sciences», XXXVI (11), p. 2481-2492, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.07.011>
- Jackson M.D., Landis E.N., Brune P.F., Vitti M., Chen H. et al. 2014, *Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar*, in *Proceedings of National Academy Society of United States of America*, ed. D.J. Killick, 111 (52), pp. 18484-18489, <https://doi.org/10.1073/pnas.1417456111>
- Lancaster L. 2005, *Concrete vaulted construction in the Imperial Rome: innovations in context*, New York
- Lancaster L. 2015, *Innovative vaulting in the architecture of the Roman Empire, 1st to 4th centuries CE*, New York
- Lugli G. 1957, *La tecnica edilizia romana, con particolare riguardo a Roma e Lazio*, Giovanni Bardi, Roma
- Malacrino C. 2010, *Ingegneria dei greci e dei romani*, Arsenale Editrice, S. Giovanni Lupatoto
- Mathé V. 2017, *Le bois de construction en Grèce du I^{er} au I^{er} siècle avant Jésus-Christ*, «Aedificare. Revue internationale d'histoire de la construction», I (1), pp. 45-62, <http://halshs-01639170>
- Mazzocchi L. 1871, *Trattato su le costruzioni in legno*, Antonio Vallardi, Milano
- Menicali U. 1992, *I materiali dell'edilizia storica. Tecnologia e impiego dei materiali tradizionali*, Roma
- Menichelli C., Scappin L. 2011, *I solai lignei a Venezia*, in *Venezia. Forme della costruzione, forme del dissesto*, a cura di F. Doglioni, G. Mirabella Roberti, Cluva Libreria Editrice, Padova
- Milizia F. 1781, *Principi di architettura civile*, S. Majocchi, Milano
- Moser D., Allevato E., Clarke J.R., Di Pasquale G., Nelle O. 2013, *Archaeobotany at Oplontis: woody remains from the Roman Villa of Poppaea (Naples, Italy)*, «Vegetation History Archaeobotany», XXII (5), pp. 397-408, <https://doi.org/10.1007/s00334-012-0381-z>
- Moser D., Nelle O., Di Pasquale G. 2018, *Timber economy in the Roman Age: charcoal data from the key site of Herculaneum (Naples, Italy)*, «Archaeological and Anthropological Sciences», X (4), pp. 905-921, <https://doi.org/10.1007/s12520-016-0406-0>
- Oleson J.P. 2008, *The Oxford Handbook of Engineering and Technology in the Classical World*, Oxford University Press, Oxford (UK)
- Piazza A. 2015, *Strutture murarie: verso una classificazione tipologica*, tesi di laurea magistrale in Scienze Archeologiche, relatore Jacopo Bonetto, non pubblicato
- Pierattini A. 2009, *Manuale del restauro archeologico di Ercolano: tipi, tecniche costruttive e schede progettuali di indirizzo al restauro dell'edilizia archeologica di Ercolano*, Dedalo, Roma
- Rondelet J.B. 1835, *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*, Trad. it. a cura di B. Soresina, L. Caranenti, Mantova
- Ruggieri N. 2017, *Carpenteria di legno dei tetti e dei solai interpiano a Pompei nel I secolo D.C.*, «Restauro archeologico», XXVI (2), <http://dx.doi.org/10.13128/RA-22204>
- Sbrogiò, 2016, *Il progetto simulato della domus romana. Premesse metodologiche al progetto di una copertura archeologica modulare*, tesi di laurea, relatore M. R.Valluzzi, non pubblicato
- Tampone G. 2000, *Il restauro delle strutture in legno*, Hoepli, Milano
- Trevor Hodge A., *The woodwork of Greek roofs*, Cambridge 1960
- Ulrich R.B. 1996, *Contignatio. Vitruvius and the Campanian Builder*, «American Journal of Archaeology», I
- Ulrich R.B. 2007, *Roman Woodworking*, New Haven and London
- Vitti P. 2016, *Building Roman Greece. Innovation in vaulted construction in the Peloponnese*, Roma 2016

Fonti

De Arch. = Marco Vitruvio Pollione, *De architectura*

N.H = Caio Plinio Cecilio Secondo, *Naturalis Historia*

De Lingua Lat. = Varrone, *De Lingua Latina*

Normativa

Comitato Europeo di Normazione 2009, UNI EN 338:2009, *Legno strutturale - Classi di resistenza*.

Ente Nazionale di Unificazione 2010, UNI 11035-2:2010, *Legno strutturale - Classificazione a vista secondo la resistenza meccanica - parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale*

Ministero delle Infrastrutture, *Aggiornamento delle 'Norme Tecniche per le costruzioni'*, D.M. 17 gennaio 2018

Ministero delle Infrastrutture, *Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove Norme Tecniche per le costruzioni' di cui al D.M. 14 gennaio 2008*, Circ. Min. 617, 2 febbraio 2009.