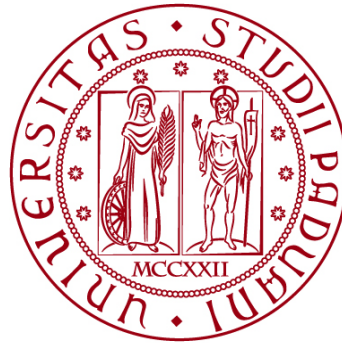


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale a Ciclo Unico in Ingegneria Edile-Architettura



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**INDAGINI STRUTTURALI PER LA CONSERVAZIONE
DELLE CAPRIATE LIGNEE PALLADIANE
DEL CORPO CENTRALE DI VILLA PISANI A STRA**

Relatore:

Chiar.ma Prof.ssa MARIA ROSA VALLUZZI

Correlatori:

Ing. MATTEO SALVALAGGIO

Dott. Ing. FILIPPO CASARIN

Laureando: NICOLA ALTOVITI

1128335

ANNO ACCADEMICO 2021-2022

Alla mia Famiglia.

*«Fate come gli alberi:
cambiate le foglie
e conservate le radici.
Quindi, cambiate le vostre idee
ma conservate i vostri principi.»*

V. Hugo

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. LO STATO DELL'ARTE.....	5
1.1 Il materiale legno	5
1.1.1 Cenni su costituzione e anatomia.....	5
1.1.2 Caratteristiche macroscopiche.....	6
1.1.3 Comportamento igroscopico	7
1.1.4 Biodegradamento	8
1.1.5 Proprietà meccaniche.....	9
1.2 Le norme tecniche di riferimento.....	10
1.2.1 L'evoluzione della normativa italiana.....	10
1.2.2 La normativa vigente inerente al materiale legno.....	12
1.2.3 Indagini di I livello o ispezione visiva	14
1.2.4 Indagini di II livello o strumentali.....	18
1.3 Revisione della letteratura scientifica.....	19
1.3.1 Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics (Ceraldi et al., 2001).....	19
1.3.2 Structural investigation and analyses for the conservation of the 'Arsenale' of Venice (Valluzzi et al., 2002)	20
1.3.3 Analyses for the conservation of the load bearing wooden structures of the Teatro Comunale in Modena (Belletti et al., 2005).....	21
1.3.4 Methodology for the analysis of complex historical wooden structures: a study case (Mazzolani et al., 2005).....	21
1.3.5 Timber roof structures of the "Arsenale" of Venice (Menichelli et al., 2005).....	22
1.3.6 Adeguamento sismico delle capriate lignee: i metodi tradizionali di rinforzo (Parisi et al., 2007)	22
1.3.7 Mechanical characterization of old chestnut beams (Branco et al., 2011).....	23
1.3.8 Restoration of historical timber structures criteria, innovative solutions and case studies (Croatto et al., 2014).....	24
1.3.9 Guidelines for on-site assessment of historic timber structures (Cruz et al., 2015)	25

1.3.10 State-of-the-art technology on conservation of ancient roofs with timber structure (Tampone et al, 2016)	26
1.3.11 Correlazione tra metodi di indagine non invasivi per la qualificazione del legno e prove di caratterizzazione meccanica di componenti strutturali dell'edilizia storica (Scancelli, 2017)	27
1.3.12 Assessment of heritage timber structures: Review of standards, guidelines and procedures (Riggio et al., 2018)	27
1.3.13 The assessment of Italian trusses: survey methodology and typical pathologies (Macchioni et al., 2018).....	28
1.3.14 Conservation of historic timber roof structures of Italian architectural heritage: diagnosis, assessment, and intervention (Bertolini Cestari et al., 2019).....	30
1.3.15 Structural and health assessment of historic timber roofs from the Convent of Christ in Tomar (Verbist et al, 2019)	30
2. LE CAPRIATE LIGNEE	33
2.1 Analisi evolutiva delle capriate lignee	33
2.1.1 Schema statico ed elementi componenti	33
2.1.2 L'evoluzione storica e strutturale	34
2.1.2.1 Capriata a trave.....	36
2.1.2.2 Capriata a nodo aperto.....	37
2.1.2.3 Capriata a nodo chiuso.....	37
2.1.2.4 Capriata apparente	37
2.1.2.5 Capriata spaziale.....	37
2.2 Trattativa storica	38
2.2.1 Il materiale legno	38
2.2.2 Le capriate lignee.....	39
2.2.3 La capriata alla palladiana	42
2.3 Le connessioni di carpenteria.....	43
2.3.1 Meccanismi resistenti e verifiche	46
2.3.2 Principali collegamenti tradizionali	47
2.3.3 Comportamento ed efficienza del collegamento.....	49
3. LO STUDIO DELLE STRUTTURE LIGNEE	51
3.1 Caratteri generali	51
3.1.1 L'oggetto e le finalità dello studio	51
3.1.2 La concezione strutturale e l'ordinamento gerarchico	53
3.1.3 L'ispezione in sito e le prove di indagine.....	54
3.1.3.1 Prova penetrometrica con resistografo.....	56

INDICE

3.1.3.2	Prova penetrometrica con sclerometro da legno	59
3.1.3.3	Prova ultrasonica	60
3.1.3.4	Prova con video-endoscopio	61
3.1.3.5	Prova sonora di percussione	62
3.1.3.6	Prova con punteruolo	62
3.2	Rilievo e rappresentazione	63
3.2.1	Il rilievo geometrico e fotografico	63
3.2.2	Il rilievo del degrado biologico	65
3.2.3	Il rilievo del degrado meccanico	66
3.2.4	La restituzione grafica	68
3.3	Analisi e valutazione della struttura	71
3.3.1	Il modello meccanico del materiale legno	71
3.3.2	Le verifiche secondo le normative vigenti	78
3.3.2.1	Le verifiche agli Stati Limite di Esercizio	81
3.3.2.2	Le verifiche agli Stati Limite Ultimi	82
3.3.2.3	Le verifiche dei collegamenti	89
3.3.2.4	Altre verifiche di resistenza	94
4.	IL CASO-STUDIO DI VILLA PISANI	97
4.1	Il Museo Nazionale di Villa Pisani	97
4.1.1	Inquadramento geografico	98
4.1.2	Inquadramento vincolistico	99
4.1.2.1	Piano di Assetto del Territorio (P.A.T.)	99
4.1.2.2	Piano degli Interventi (P.I.)	102
4.1.3	Inquadramento geologico	104
4.2	Analisi storico-critica	105
4.2.1	Cenni storici costruttivi	105
4.2.2	Interventi di restauro	108
4.2.3	La copertura del corpo centrale	110
4.3	Rilievo in sito degli elementi lignei	112
4.3.1	Rilievo geometrico e fotografico	112
4.3.1.1	'Capriata Tipo A-C'	116
4.3.1.2	'Capriata Tipo-B'	117
4.3.2	Rilievo del degrado biotico	120
4.3.3	Rilievo del degrado meccanico	121
4.3.4	Mappatura delle criticità a seguito del rilievo in sito	122

4.4	Ispezioni e prove d'indagine eseguite.....	124
4.4.1	Indagini di I livello.....	124
4.4.1.1	Definizione delle condizioni di servizio del legname	125
4.4.1.2	Determinazione dell'umidità del legno.....	125
4.4.1.3	Determinazione delle caratteristiche quantificabili	126
4.4.2	Indagini di II livello	127
4.4.2.1	Prove sonore di percussione	127
4.4.2.2	Prove penetrometriche con resistografo	128
4.5	Valutazione dello stato di conservazione.....	130
4.5.1	Analisi ed elaborazione dei dati rilevati.....	130
4.5.1.1	Analisi dimensionale degli elementi lignei	130
4.5.1.2	Analisi dei valori di umidità relativa del legno.....	132
4.5.1.3	Analisi prove resistografiche.....	133
4.5.2	Mappatura dello stato di conservazione.....	136
4.5.3	Restituzione grafica delle prove di indagine	138
5.	ANALISI E MODELLAZIONE NUMERICA	141
5.1	Analisi dei carichi.....	141
5.1.1	Definizione delle azioni.....	141
5.1.1.1	Azioni permanenti.....	141
5.1.1.2	Azioni variabili	142
5.1.1.3	Azioni sismiche	143
5.1.2	Definizione dei carichi gravanti sulle capriate.....	143
5.1.2.1	Orizzontamento di calpestio del sottotetto della 'Zona A-C'	144
5.1.2.2	Copertura inclinata della 'Zona A-C'	145
5.1.2.3	Orizzontamento di calpestio del sottotetto della 'Zona B'	145
5.1.2.4	Copertura inclinata della 'Zona B'	147
5.1.2.5	Sovraccarico da manutenzione (q_H).....	147
5.1.2.6	Azione della neve (q_s)	148
5.1.2.7	Azione del vento (q_w).....	148
5.1.3	Combinazione delle azioni.....	149
5.1.3.1	Combinazione rilevante per la 'Capriata Tipo A-C'	151
5.1.3.2	Combinazione rilevante per la 'Capriata Tipo B'	153
5.2	Analisi agli elementi finiti.....	154
5.2.1	Definizione della geometria strutturale	154
5.2.2	Definizione delle condizioni di vincolo e di carico	155

INDICE

5.2.3	Definizione dei parametri meccanici	156
5.3	Calibrazione del modello.....	157
5.3.1	Analisi Parametriche di Sensitività.....	157
5.3.1.1	'Capriata Tipo A-C'	157
5.3.1.2	'Capriata Tipo B'.....	158
5.3.1.3	Modellazione delle staffe di collegamento.....	159
5.3.1.4	Introduzione dell'ortotropia del materiale.....	160
5.3.2	Validazione dei modelli agli elementi finiti.....	163
5.3.3	Osservazioni e definizione della procedura di analisi.....	165
5.4	Analisi statica lineare.....	166
5.4.1	Analisi delle capriate in condizioni integre.....	167
5.4.1.1	Definizione della geometria strutturale	167
5.4.1.1	Definizione delle condizioni di vincolo e di carico.....	167
5.4.1.2	Definizione dei parametri meccanici	168
5.4.1.3	Parametri di sollecitazione	169
5.4.1.4	Analisi dei risultati in termini di tensioni	172
5.4.1.5	Analisi dei risultati in termini di spostamenti.....	172
5.4.2	Analisi delle capriate in condizioni ammalorate.....	174
5.4.2.1	Descrizione della procedura adottata	174
5.4.2.2	Definizione dei parametri meccanici.....	175
5.4.2.3	Analisi dei risultati in termini di tensioni	184
5.4.2.4	Analisi dei risultati in termini di spostamenti.....	189
5.4.3	Osservazioni e confronto dei risultati.....	196
6.	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE.....	199
6.1	La valutazione delle strutture lignee.....	199
6.2	Verifiche agli Stati Limite di Esercizio	201
6.2.1	Verifiche delle deformazioni.....	202
6.2.1.1	'Capriata Tipo A-C'	202
6.2.1.2	'Capriata Tipo B'.....	203
6.3	Verifiche agli Stati Limite Ultimi.....	206
6.3.1	Verifiche per la 'Capriata Tipo A-C'.....	206
6.3.1.1	Verifiche a trazione.....	206
6.3.1.2	Verifiche a compressione	207
6.3.1.3	Verifiche a taglio.....	209
6.3.2	Verifiche per la 'Capriata Tipo B'	211

INDICE

6.3.2.1	Verifiche a trazione.....	211
6.3.2.2	Verifiche a compressione.....	212
6.3.2.3	Verifiche a taglio.....	216
6.4	Verifiche dei collegamenti.....	217
6.4.1	Verifiche dimensionali.....	218
6.4.1.1	'Capriate Tipo A-C'.....	218
6.4.1.2	'Capriate Tipo B'.....	220
6.4.2	Verifiche tensionali.....	221
6.4.2.1	Unioni a dente semplice.....	221
6.4.2.2	Unioni a dente arretrato.....	223
6.4.2.3	Unioni a 'dardo di Giove'.....	225
6.4.2.4	Unioni chiodate.....	226
6.5	Osservazioni e analisi dei risultati.....	229
7.	CONCLUSIONI.....	231
	BIBLIOGRAFIA.....	235
	RINGRAZIAMENTI.....	241
A.	APPENDICE.....	243
A.1	Elaborati tecnici della copertura.....	243
A.2	Schede di rilievo delle capriate lignee.....	251
A.3	Rapporti prove con trapano resistografico.....	283

INTRODUZIONE

Il recupero delle strutture storiche, inteso come la riabilitazione funzionale e statica dell'edificio nel suo complesso, assume oggi un ruolo fondamentale ai fini della conservazione. Molteplici sono infatti gli interventi eseguiti negli ultimi decenni ma molto vi è ancora da fare e andrebbe fatto a riguardo. La natura delle cause è varia: si va dal degrado naturale dei materiali fino alla mancata manutenzione, o ancora all'adeguamento alle nuove normative tecniche, senza tralasciare l'aspetto sismico.

Il problema esposto assume particolare rilievo nell'ambito delle strutture lignee appartenenti al costruito storico, particolarmente vulnerabili al degrado biologico, oltre che a quello fisico e meccanico. Alle problematiche naturali si aggiungono quelle legate al vero e proprio abbandono e, non da ultimo, la scarsa conoscenza del materiale ligneo, unita all'eccessiva superficialità dei tecnici che nella maggior parte dei casi pongono in essere interventi più invasivi che di recupero o risanamento. Anche l'aspetto normativo appare poco approfondito in tema di strutture lignee antiche, necessitando di ulteriori sforzi per darne un quadro più completo.

Il Museo Nazionale di Villa Pisani a Stra, è parte del ricco patrimonio architettonico e culturale italiano ed è tutelato dalla Soprintendenza ai Beni Culturali del Veneto Orientale, e rappresenta un importante caso-studio in questo ambito vista la presenza di un imponente sistema di copertura a capriate lignee utilizzate anche per il sostegno di controsoffitti di pregio, caratterizzati da stucchi e pitture. In particolare la tesi si concentra sulle capriate lignee della copertura del corpo centrale della villa con la finalità di contribuire all'integrazione delle conoscenze per la conservazione dell'opera stessa, oltre che preservare l'elemento di maggior pregio, ossia l'affresco del salone delle feste, ad opera di Giambattista Tiepolo.

L'obiettivo della tesi è applicare il percorso di conoscenza delle strutture storiche nel caso delle parti in legno degli edifici e valutare la consistenza e le prestazioni strutturali residue del sistema di copertura. La metodologia adottata si svolge attraverso le fasi di ispezione preliminare in sito e di successiva esecuzione del rilievo, sia geometrico che meccanico, dello stato di conservazione delle capriate lignee, integrato da prove di indagine, cui fanno seguito la classificazione strutturale e la modellazione agli elementi finiti, con la finalità di valutare l'effettivo

stato di salute della copertura in generale, unitamente alla volontà di ampliare il livello di conoscenza dell'edificio.

Il lavoro è articolato nei capitoli brevemente riassunti in seguito:

- 1. LO STATO DELL'ARTE:** il primo capitolo introduce lo Stato dell'Arte del materiale ligneo. Viene data rilevanza in particolare, oltre che al materiale e alle sue caratteristiche intrinseche, alla relativa letteratura, nonché alla normativa tecnica, con un focus sugli elementi lignei dell'esistente storico, prerogativa per approcciare il caso-studio.
- 2. LE CAPRIATE LIGNEE:** il secondo capitolo vuole mettere in luce il tema delle capriate lignee dando rilievo all'evoluzione di tale sistema costruttivo, descrivendone la funzione strutturale e le connessioni tra gli elementi costituenti. Particolare attenzione è data alla capriata di tipo palladiano composto, soluzione adottata per la copertura del corpo centrale di Villa Pisani.
- 3. LO STUDIO DELLE STRUTTURE LIGNEE:** il terzo capitolo presenta e descrive le metodologie di studio e analisi delle strutture lignee secondo le normative vigenti e le indicazioni reperite dalla letteratura e dalla bibliografia. Oltre alla mera descrizione delle fasi di rilievo si intende evidenziare quale debba essere il processo conoscitivo da attuarsi per le strutture appartenenti agli edifici esistenti.
- 4. IL CASO-STUDIO DI VILLA PISANI:** il quarto capitolo, interamente dedicato al caso-studio dell'elaborato, presenta e descrive il Museo Nazionale di Villa Pisani a Stra dandone dapprima un inquadramento generale, accompagnato da un'analisi storico-critica del complesso strutturale, con un focus sulla copertura lignea del corpo centrale. Successiva è la descrizione dei rilievi e delle indagini eseguiti *in situ*, cui fanno seguito le prime analisi dei risultati e la valutazione dello stato di conservazione generale delle strutture lignee, appartenenti al sottotetto centrale.
- 5. ANALISI E MODELLAZIONE NUMERICA:** è presentata e descritta nel quinto capitolo la procedura adottata relativamente all'analisi e modellazione numerica delle capriate lignee del caso-studio, eseguita attraverso un approccio agli elementi finiti (FEM) con il software Straus7®. Oltre alla definizione dei carichi ed alla loro combinazione, si è voluto dare ampio spazio alle fasi di definizione dei parametri meccanici del materiale ed alla calibrazione del modello, quest'ultima avvenuta tramite opportune analisi parametriche

di sensitività. La validazione di due modelli FEM specifici per le 'Capriate Tipo' del sottotetto centrale, integrati con i risultati delle indagini strumentali svolte in sito, ha permesso di definire la procedura da adottarsi per l'analisi statica lineare delle capriate, i cui risultati ben rappresentano lo stato di conservazione degli elementi lignei.

- 6. VERIFICHE AGLI STATI LIMITE:** il sesto capitolo tratta esclusivamente le verifiche agli Stati Limite delle capriate del caso-studio. Oltre all'applicazione delle formulazioni riportate nelle Norme Tecniche, ha l'obiettivo di fornire un quadro di valutazione generale della copertura del corpo centrale e di verificare l'efficienza degli elementi e dei collegamenti che hanno manifestato criticità in fase di indagini e di analisi. Sono trattate le principali verifiche agli Stati Limite di Esercizio (SLE) e agli Stati Limite Ultimi (SLU), in considerazione dei difetti e del livello di danno rilevato. Per i collegamenti, in particolare, le verifiche sono state condotte riferendosi alla sezione resistente efficace.
- 7. CONCLUSIONI:** il capitolo sette riepiloga e conclude il lavoro svolto, presenta le principali considerazioni in merito alle indagini svolte in sito e definisce lo stato di salute delle strutture di copertura, indicando per le stesse le principali anomalie e suggerendone gli interventi da eseguirsi al fine della conservazione complessiva dell'opera. Completano l'elaborato i possibili sviluppi futuri a partire dai risultati ottenuti.
- A. APPENDICE:** il capitolo in appendice riporta gli allegati relativi alle indagini condotte per le 31 capriate palladiane del sottotetto del corpo centrale di Villa Pisani e quelli relativi alle 121 prove resistografiche eseguite sui principali elementi lignei.

Il lavoro svolto è relativo alle sole strutture lignee di copertura del corpo centrale di Villa Pisani a Stra e, come riportato dallo stesso titolo, tratta in merito alle indagini strutturali eseguite per la conservazione delle capriate lignee palladiane. Le prove strumentali sono state svolte in collaborazione con il Laboratorio Autorizzato Expin Srl, *spin-off* dell'Università di Padova incaricata dalla Direzione museale al monitoraggio e all'analisi delle strutture di copertura.

Parallelamente è stato condotto un altro elaborato di tesi di laurea (Checchin, 2022) relativo alla valutazione del comportamento sismico del medesimo corpo centrale del caso-studio, che definisce le analisi del contributo dinamico sui meccanismi fuori piano delle murature e dei carichi derivanti dalla copertura.

1. LO STATO DELL'ARTE

Il capitolo introduce lo Stato dell'Arte del materiale ligneo. Viene data rilevanza in particolare, oltre che al materiale e alle sue caratteristiche intrinseche, alla relativa letteratura, nonché alla normativa tecnica, con un focus sugli elementi lignei dell'esistente storico, prerogativa essenziale per approcciare il caso-studio in esame.

1.1 Il materiale legno

Il legno è un materiale naturale di cui l'uomo ha sempre usufruito fin dall'antichità, sia perché facilmente reperibile e sia perché uno dei primi ad essere impiegato in ambito costruttivo. Oggi, a distanza di secoli, è necessario ricordare che «per poter impiegare in modo razionale un certo materiale da costruzione, è necessario conoscerne a fondo le caratteristiche» (Giordano, 1993). La citazione del professor Giordano, luminare della Tecnica delle Costruzioni in legno, diviene ancor più determinante per le strutture lignee appartenenti al costruito storico esistente.

1.1.1 Cenni su costituzione e anatomia

A differenza di molti altri materiali da costruzione, il legno presenta una struttura differenziata che trae origine dall'attività vegetativa degli alberi costituita da elementi vasali disposti in fasci longitudinali, a cui si accompagnano elementi accessori, quali cellule parenchimatiche e fibre di sostegno, che ne assicurano le funzioni vitali tramite il sostegno meccanico e la conduzione della linfa. Attraverso un accrescimento primario e secondario, ossia in altezza ed in diametro, il fusto si sviluppa per mezzo di un'attività cambiale. Prendendo in esame il tronco di un albero è possibile la definizione di tre sezioni anatomiche principali: trasversale, radiale e tangenziale (Fig. 1.1). Procedendo dall'esterno verso l'interno le parti costituenti vedono: la corteccia, parte esterna del tronco formata da cellule morte; il cambio, parte contribuente alla creazione di cellule nuove; l'alburno, di colore chiaro, è la parte fisiologicamente attiva dell'albero; il durame, parte più interna dove le cellule svolgono la sola funzione di sostegno; il midollo, parte centrale del tronco da cui nel primo anno di vita si diramano i raggi midollari.

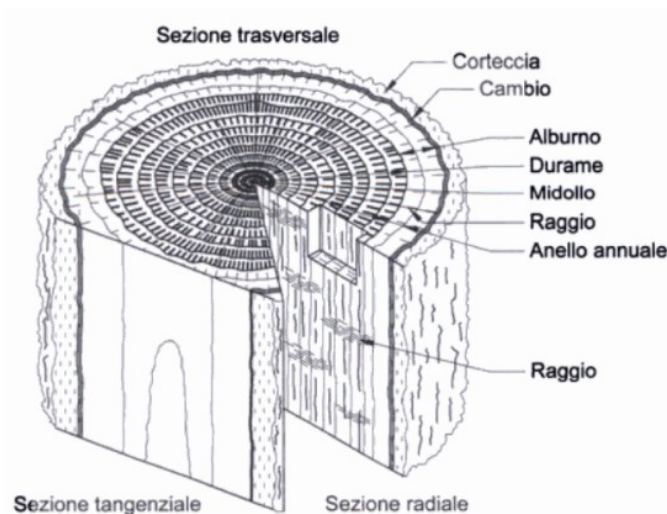


Fig. 1.1: Costituzione del tronco e rappresentazione delle sezioni principali (Piazza et al., 2005).

In natura si distinguono numerose specie legnose appartenenti alle principali categorie delle angiosperme e delle gimnosperme, indicate rispettivamente, nel linguaggio comune, come latifoglie e conifere. Differenze sostanziali si osservano dal punto di vista anatomico, con una maggior specializzazione cellulare nel legno di latifoglia rispetto a quello di conifera. Nelle latifoglie le funzioni di sostegno e di conduzione dei liquidi sono svolte da cellule differenti individuanti rispettivamente vasi e fibre, mentre nelle conifere le funzioni sono svolte contemporaneamente dalle tracheidi. Dal punto di vista ingegneristico il materiale di cui è composta la parete cellulare è assimilabile ad un composito con una matrice, la lignina, in cui sono disposti gli elementi fibrosi ad alta resistenza meccanica, le microfibrille (Piazza, Tomasi, Modena, 2005).

1.1.2 Caratteristiche macroscopiche

Il legno presenta caratteristiche legate all'aspetto del materiale, rilevabili a vista dopo un attento esame (Palanti, 2013). Se per individuarne la specie è necessario l'occhio esperto di tecnici e botanici, vi sono elementi macroscopici di più facile determinazione. Tra i principali vi è il colore, dipendente da fattori legati alle pareti cellulari e dall'attività fisiologica della pianta ma che può variare anche in seguito ad attacchi fungini (§ 1.1.4). In sezione longitudinale sono visibili le caratteristiche legate alla tessitura, che indica le dimensioni degli elementi cellulari componenti i tessuti legnosi, ed alla fibratura, che si riferisce alla direzione con cui gli elementi cellulari sono disposti. In condizioni normali la fibratura è parallela all'asse midollare del fusto ma per diverse ragioni il suo andamento può deviare dalla verticale. L'inclinazione della fibratura è considerata

un difetto del materiale ligneo e nella sua classificazione incide in termini di resistenza.

Altro elemento macroscopico che incide su resistenza ed efficienza è quello legato ai nodi (Fig. 1.3), parti di ramo incluse nel fusto principale dell'albero. Se presenti in numero eccessivo comportano soluzioni di continuità nella tessitura delle fibre e talvolta cavità. Particolarmente penalizzanti sono i gruppi di nodi, causa di deviazioni e variazioni della direzione della fibratura.

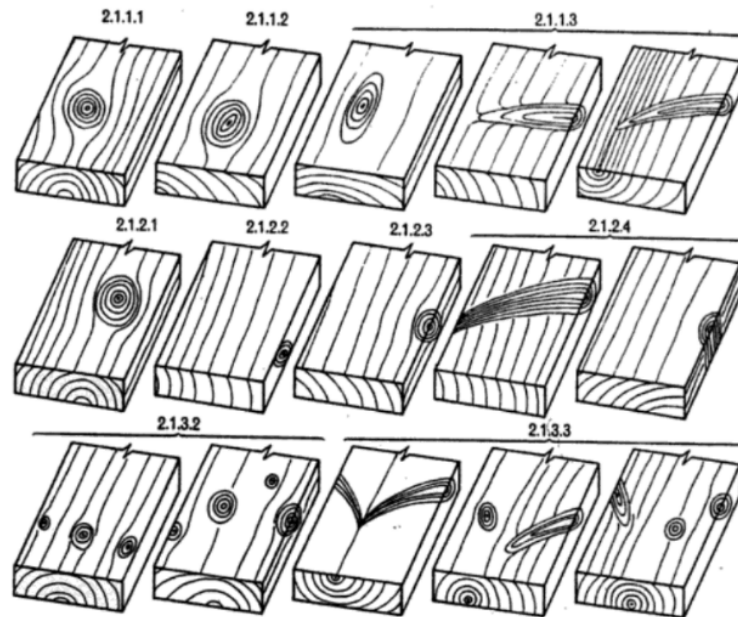


Fig. 1.2: Indicazione schematica dei nodi: rotondo (2.1.1.1), ovale (2.1.1.2), allungato (2.1.1.3), di faccia (2.1.2.1), di bordo (2.1.2.2), di spigolo (2.1.2.3), allungato (2.2.2.4), raggruppati (2.1.3.2), collegati (2.1.3.3) (Giordano, 1993).

1.1.3 Comportamento igroscopico

Sia in natura che nei manufatti il legno mostra una spiccata affinità con l'acqua, può contenerne infatti in quantità variabili a seconda delle circostanze. Tali variazioni sono da collegare sia alla struttura fisica di materiale poroso che alla natura chimica che comporta interazioni dell'acqua con i diversi componenti della parete cellulare.

Il legno si dice avere un'umidità normale quando il rapporto dato dalla relazione [1.1] è pari a 12 in termini percentuali, dove P_i è il peso del legno ad inizio esame e P_0 è il peso del medesimo campione dopo essiccazione in stufa ventilata ad una temperatura di 105 °C.

$$U[\%] = \frac{P_i - P_0}{P_0} \times 100 \quad [1.1]$$

La presenza di acqua si riflette, oltre che sull'evoluzione della massa volumica o della densità, anche sui fenomeni cui il materiale ligneo è soggetto a seguito delle variazioni interne da porre in diretta relazione con le condizioni climatiche. Le variazioni di umidità portano a far sì che

il materiale raggiunga uno stato di equilibrio igroscopico con l'ambiente tramite veri e propri movimenti igroscopici definiti di rigonfiamento e ritiro. Il valore di umidità di equilibrio dipende anche dalla specie legnosa; assume particolare rilievo la citata umidità del 12%, valore che per il legno di conifera è stimato come corrispondente all'equilibrio di un ambiente a 20°C e 65% di umidità relativa, condizione normale per il legno e la sua valutazione in Italia.

Il legno con elevata umidità possiede in genere resistenze inferiori rispetto a quelle del legname ben stagionato, ossia portato alle condizioni prossime a quelle normali. Il problema legato ai tempi di essiccazione era già ben noto storicamente. L'Alberti a riguardo affermava che «Pare che il legname non sia mai seccato a sufficienza, [...] prima di un periodo di tre anni» (Da re aedificatoria, libro II, cap. VI), mentre il Palladio nel primo dei Quattro Libri dell'Architettura scriveva che «...né avanti tre anni [i legnami] saranno ben secchi per l'uso» (libro I, cap. II).

1.1.4 Biodegradamento

La costituzione chimica del legno lo rende vulnerabile ad attacchi ambientali che ne alterano la natura del materiale e delle proprie funzioni meccaniche e ad attacchi distruttivi da parte di organismi viventi che lo utilizzano come nutrimento. In presenza della prima tipologia si è di fronte ad attacchi definiti abiotici, i cui effetti non compromettono in maniera grave le funzioni strutturali dei manufatti lignei ma devono comunque essere tenuti in considerazione, poiché possibile causa di innesco per altre tipologie di degrado. In presenza di funghi e batteri si è invece di fronte ad attacchi biotici, in cui si hanno colonizzazioni vere e proprie delle parti lignee.

Tra tutti gli attacchi biotici, quello fungino è tra i più rilevanti. Può manifestarsi in forme limitate, come nel caso delle muffe che non influenzano le caratteristiche meccaniche ma si limitano ad insediarsi sulla superficie del legno con effetti esteticamente sgradevoli, o in forme più aggressive, come nel caso delle carie che possono portare ad importanti perdite di massa fino all'80% con riduzioni notevoli della sezione resistente e danni gravi (Fig. 1.3).

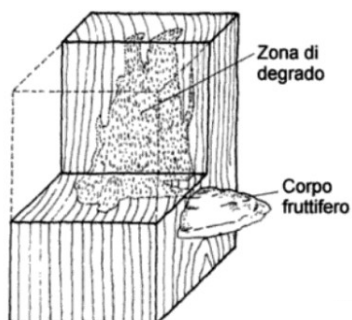


Fig. 1.3: Sezione degradata da attacco biotico da organismi fungini (Piazza et al., 2005).

1.1.5 Proprietà meccaniche

Le prestazioni meccaniche del legno sono legate all'origine naturale del materiale ed alle funzioni dello stesso in natura. La sua organizzazione cellulare è all'origine di una notevole anisotropia delle proprietà meccaniche che si traduce in una marcata differenza di valori di resistenza e rigidità in funzione della fibratura. Il legno, infatti, risulta più resistente e più rigido per sollecitazioni orientate lungo la direzione dell'asse delle fibre e, al contrario, è molto meno efficiente per sollecitazioni ortogonali alla direzione delle fibre. Per carichi orientati lungo la direzione delle fibre, il materiale è molto più debole in compressione, a causa di fenomeni di imbozzamento e collasso locale delle pareti cellulari, con valori di rottura pari a circa la metà di quelli di trazione. È bene sottolineare che il comportamento in (Fig. 1.4) si riferisce al legno netto, cioè privo di quegli elementi fisiologici della pianta, che negli elementi in dimensione normale utilizzo vengono considerati, dal punto di vista strutturale, come difetti. Tali irregolarità come nodi, fessurazioni, deviazioni di fibratura o cipollature, possono far variare in modo considerevole le caratteristiche di resistenza dell'elemento ligneo, innescando prematuramente una rottura di tipo fragile (Piazza et al, 2005).

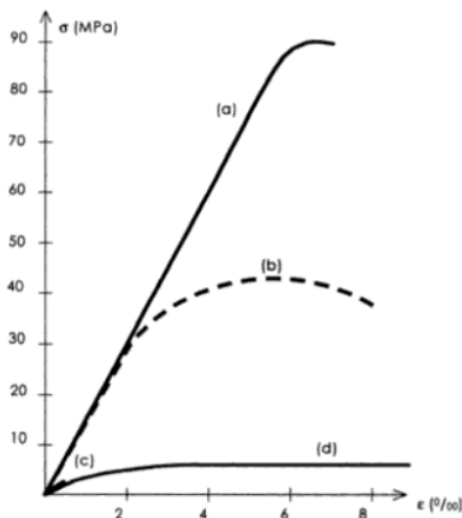


Fig. 1.4: Curve tipiche tensione-deformazione per legno netto di conifera, per tensioni di trazione (a) e compressione (b) parallele alle fibre, per trazione (c) e compressione (d) ortogonali alla direzione delle fibre (Piazza et al., 2005).

Per sollecitazioni parallele alla fibratura, il legno presenta un'ottima efficienza strutturale, se paragonato ad altri materiali da costruzione. Un possibile criterio per definire tale efficienza è basato sul rapporto tra un parametro di resistenza f del materiale e la sua massa volumica ρ : si osserva come il valore di tale rapporto sia simile a quello dell'acciaio e sia circa cinque volte quello del calcestruzzo armato e come a parità di resistenza sia possibile alleggerire una struttura,

utilizzando elementi lignei. Altrettanto significativo è il rapporto tra il modulo di elasticità E e lo stesso parametro f , che assume valori pari a circa un terzo di quelli presentati dal calcestruzzo e paragonabili a quelli dell'acciaio. (Tab. 1.1)

Tab. 1.1: Efficienza statica di differenti materiali strutturali.

Materiale	f/ρ	f/E
Legno netto	~183.000	~147
Calcestruzzo	~10.400	~1.200
Acciaio	~55.000	~480

Le proprietà meccaniche di resistenza e di deformabilità del legno sono altresì influenzate dalla durata del carico e soprattutto dal contenuto d'acqua. Nel caso di variazioni del contenuto d'acqua al di sopra del punto di saturazione delle fibre l'acqua libera che riempie i vuoti capillari non ha effetti sulle proprietà meccaniche; sotto il punto di saturazione invece le caratteristiche meccaniche sono influenzate in maniera netta dall'umidità (Fig. 1.5).

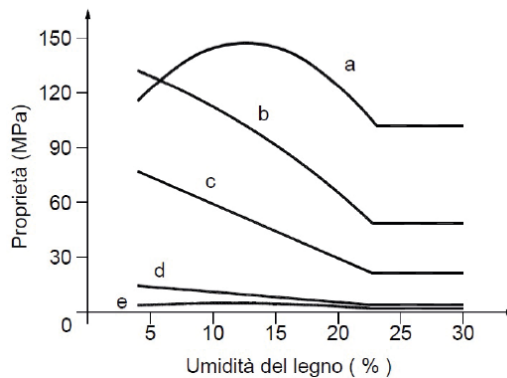


Fig. 1.5: Influenza dell'umidità sulle proprietà meccaniche: resistenza a trazione parallela alle fibre (a), resistenza a flessione (b), resistenza a compressione parallela alle fibre (c), resistenza a compressione ortogonale alle fibre (d), resistenza a trazione ortogonale alla fibratura (e) (Piazza et al., 2005).

1.2 Le norme tecniche di riferimento

1.2.1 L'evoluzione della normativa italiana

A differenza che per muratura, acciaio e calcestruzzo, la normativa tecnica italiana inerente il legno come materiale ad uso strutturale ha avuto un'evoluzione del tutto controversa, passando dagli inizi del Novecento ai giorni nostri attraverso indicazioni che offrono un'interessante chiave di lettura per comprendere la storia della considerazione che il legno strutturale ha avuto nel nostro Paese, dove, in meno di trent'anni dal 1935 al 1962, si è letteralmente visto ribaltarsi il ruolo delle costruzioni in legno, come sintetizzato in Tabella 1.2.

Tab. 1.2: Evoluzione del quadro normativo nazionale inerente al materiale legno.

Anno	Provvedimento
1909	Il R.D. n.193 promulgato a seguito del terremoto di Messina cita la "muratura animata", costituita da intelaiature in legno riempite da muratura, come il più tipico ed efficace sistema antisismico, ed il solo ammesso per edifici multipiano (la muratura ordinaria è ammessa solo per edifici ad un piano).
1916-1935	Vari decreti forniscono istruzioni relative ai "nuovi sistemi costruttivi" (cemento armato e strutture metalliche), considerati come alternativa a quelli tradizionali.
1962	La Legge n. 1684 prescrive che le "costruzioni in legname" sono ammissibili solo previo "motivato nulla osta" del Genio Civile. Il termine "struttura di legname" fa pensare a costruzioni tipo baracche o capanne costituite da materiale "legname grezzo".
1974	La Legge n. 64, ancora vigente, richiede l'emanazione di specifiche regole tecniche per i vari materiali.
1996	Il D.M.LL.PP. 16/01/1996 n.11951 "Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche" parla al punto C1 di struttura in legno restituendo al legno la dignità di materiale strutturale al pari degli altri materiali. Vengono adottati, con D.M.LL.PP. 09/1/1996, gli Eurocodici 2 e 3 per le costruzioni in c.a. e in acciaio nonostante siano ancora norme sperimentali (ENV), e vengono rilasciati dal Ministero i relativi Documenti di Applicazione Nazionale (NAD), aventi la funzione di interfacciare il codice europeo con la norma italiana. L'Eurocodice 5, anch'esso pronto come ENV, non riceve analogo trattamento, ma inizia presso il Ministero LL.PP. il lavoro di una specifica commissione incaricata della redazione delle "Norme tecniche Italiane per la progettazione, esecuzione e collaudo delle costruzioni di legno" (in acronimo "N.I.CO.LE"), una versione semplificata ed italianizzata dell'EC5.
2002	La bozza di "N.I.CO.LE" è pronta e, acquisito il parere favorevole del CNR, è in votazione al Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici in attesa di essere pubblicata come Decreto Ministeriale. Essa risulta un sotto-insieme dell'EC5, con riferimento al metodo di verifica agli stati limite.
2003	L'OPCM n.3274 cita gli edifici a struttura di legno tra i sistemi costruttivi ammessi in zona sismica, elimina le limitazioni in altezza per le strutture "interamente realizzate in legno lamellare" (rinnovando il pregiudizio verso il legno massiccio strutturale largamente usato in Europa, Nordamerica e Giappone), inizia a fare riferimento ai principi dell'Eurocodice 8, ma non fissa regole di calcolo specifiche per le strutture di legno. Anzi, nel Capitolo 9 "Edifici con struttura di legno" le subordina alla "emanazione delle corrispondenti norme relative alle combinazioni di carico non sismiche".
2004	Viene istituito presso il Consiglio Superiore LL.PP. il Gruppo di Lavoro Annessi Tecnici Nazionali.
2005	L'OPCM n. 3431 colma finalmente il vuoto normativo: viene introdotto nel Capitolo 9 un breve testo che riprende i principi degli Eurocodici 8 e 5. L'aspetto più importante è presente nel "campo di applicazione": le prescrizioni sono da intendere quali integrazioni delle regole di "pertinenti prescrizioni tecnico-normative italiane, quando disponibili".
2006	Viene costituita una commissione del CNR per la redazione di "Istruzioni per la progettazione, esecuzione e controllo delle strutture in legno", il cui documento finale è il CNR-DT 206/2007.

2008-2009	Le NTC del 14.01.2008 e la relativa Circolare n. 617 del 02.02.2009 per la prima volta trattano le diverse tipologie di costruzioni civili e industriali in funzione del materiale considerando anche il legno, anche per le verifiche, ma con un richiamo all'EC5 per le specifiche sulle strutture in legno.
2018-2019	Il D.M. del 17/01/2018 e la relativa Circolare n. 7 del 21/01/2019 hanno allineato le precedenti Norme Tecniche con le direttive europee ed integrato il documento "NI.CO.LE." con le istruzioni del CNR aggiornate del DT 206-R1/2018. L'EC5 rimane un "documento di comprovata validità" cui riferirsi per quanto non direttamente riportato in Normativa.

Parallelamente, si ritiene doveroso evidenziare come, anche l'evoluzione delle norme in materia di prevenzione sismica, abbiano in parte influito, oltre che sulla messa in sicurezza globale dell'edificio, sulle singole componenti realizzate in materiale ligneo.

Nella Circolare Ministero dei Lavori Pubblici 10 aprile 1997 n. 65 si citava, in merito alle coperture: «I tetti devono essere resi non spingenti. (...) Nel caso di tetti in legno si deve garantire anche una adeguata connessione fra i diversi elementi costituenti l'orditura». Ulteriori chiarimenti furono introdotti dal documento approvato dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel novembre 1997 in merito alle Istruzioni generali per la redazione di progetti di restauro nei beni architettonici di valore storico-artistico in zona sismica:

...omissis...

Ove i tetti presentino orditure spingenti, come nel caso di puntoni inclinati privi di semi catene in piano, la spinta deve essere compensata. È in linea generale opportuno il mantenimento dei tetti in legno (...) in generale, vanno il più possibile sviluppati i collegamenti e le connessioni reciproche tra la parte terminale della muratura e le orditure e gli impalcati del tetto, ricercando le configurazioni e le tecniche compatibili con le diverse culture costruttive locali.

1.2.2 La normativa vigente inerente al materiale legno

Ai fini di una più chiara ed esaustiva interpretazione dei capitoli relativi alle analisi delle strutture lignee del caso studio oggetto del presente elaborato, si riportano alcune disposizioni vigenti, inerenti al materiale legno, consultate e attuate:

- CNR-DT 206-R1:2018 *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno*;
- UNI 11035-1:2010 *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 1: Terminologia e misurazione delle caratteristiche*;
- UNI 11035-2:2010 *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale*;
- UNI 11035-3:2010 *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 3: Travi Uso Fiume e Uso Trieste*;

- UNI 11118:2004 *Beni culturali - Manufatti lignei - Criteri per l'identificazione delle specie legnose;*
- UNI 11119:2004 *Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera;*
- UNI EN 335:2013 *Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Classi di utilizzo;*
- UNI EN 338:2016 *Legno strutturale - Classi di resistenza;*
- UNI EN 17121:2019 *Conservazione del patrimonio culturale - Strutture storiche in legno - Linee guida per la valutazione in situ di strutture in legno portanti;*
- UNI EN 1995-1-1:2005 *Euro-Codice 5 - Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici.*

In merito alla caratterizzazione del materiale, per gli elementi in legno, la Circolare 21 gennaio 2019, n.7/C.S.LL.PP. integra e definisce che «per la definizione della specie legnosa si può fare riferimento alla norma UNI 11118 e, per la valutazione dello stato di conservazione e del profilo resistente degli elementi in opera, alla norma UNI 11119» (MIT 2019).

Si possono distinguere, in relazione al loro grado di approfondimento, tre livelli di prova:

- Prove limitate: si tratta di indagini basate principalmente su esami visivi delle superfici, che comprendano almeno tre facce e una testata di ogni elemento dell'orditura primaria e secondaria e che prevedano limitati controlli degli elementi costruttivi e delle connessioni; sono previste rimozioni locali dello strato di protezione per procedere a una valutazione dello stato di conservazione, ad esempio in accordo alla norma UNI 11119.
- Prove estese: si tratta di indagini visive diffuse sulle superfici degli elementi, accompagnate da alcuni controlli strumentali di supporto, nonché sulle condizioni dei collegamenti. Sono previste rimozioni locali dello strato di protezione per procedere a una valutazione dello stato di conservazione, ad esempio in accordo alla norma UNI 11119. Come controlli strumentali, son almeno da prevedere alcuni controlli dell'umidità del materiale in zone specificatamente individuate come particolarmente sensibili.
- Prove esaustive: si tratta di indagini visive diffuse e sistematiche, accompagnate da approfondimenti strumentali, eventualmente di tipo risistografico. Si prevedono analisi per l'identificazione della specie, la misura dell'umidità nel materiale e nelle zone di interfaccia con i materiali diversi e l'analisi dei collegamenti, con valutazione

dei fenomeni di degrado degli elementi di connessione. Tali analisi possono anche richiedere attività di laboratorio. È opportuno l'impiego di tecniche non distruttive o parzialmente invasive per valutare caratteristiche meccaniche del materiale o individuare zone degradate.

Sulla base degli approfondimenti, possono essere individuati i livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile ed i conseguenti metodi di analisi ammessi, unitamente ai valori dei fattori di confidenza. Per le costruzioni in legno la Circolare evidenzia come «data la possibile variabilità del materiale soprattutto per il costruito storico, è opportuno estendere l'indagine ai singoli elementi, soprattutto per valutare il degrado biotico e abiotico» e ancora ribadisce come sia «opportuno verificare le condizioni delle estremità delle strutture lignee, in particolare quando a contatto con altro materiale» (MIT 2019).

1.2.3 Indagini di I livello o ispezione visiva

Attraverso un esame ad occhio nudo è possibile classificare un elemento ligneo ed assegnare allo stesso delle proprietà meccaniche senza effettuare alcuna tipologia di prova distruttiva. La norma UNI 11119 «stabilisce obiettivi, procedure e requisiti per la diagnosi dello stato di conservazione e la stima della resistenza e della rigidezza di elementi lignei in opera nelle strutture portanti di edifici compresi nell'ambito dei beni culturali, attraverso l'ispezione in situ e l'impiego di tecniche e metodologie di prova non distruttive». Oltre al procedimento per l'ispezione, la norma specifica le caratteristiche di classificazione, basate sui principali difetti che l'elemento ligneo può presentare — tipologie e gruppi di nodi, lesioni, fessurazioni, inclinazione della fibratura e smussi — rientranti in tre categorie a seconda dei limiti indicati (Fig. 1.6-1.7).

CARATTERISTICA		CATEGORIA IN OPERA		
		I	II	III
Smussi		≤1/8	≤1/5	≤1/3
Lesioni varie Cretti da gelo Cipollature		assenti	assenti	ammissibili, purché in misura limitata
Nodi singoli		≤1/5 ≤50 mm	≤1/3 ≤70 mm	≤1/2
Gruppi di nodi		≤2/5	≤2/3	≤3/4
Inclinazione della fibratura (pendenza %)	in sezione radiale	≤1/14 (~7%)	≤1/8 (~12%)	≤1/5 (20%)
	in sezione tangenziale	≤1/10 (10%)	≤1/5 (20%)	≤1/3 (~33%)
Fessurazioni radiali da ritiro		ammissibili, purché non passanti		

Fig. 1.6: Regole di classificazione per elementi strutturali lignei in opera (Prospetto 1, UNI 11119:2004).

Smussi	Il minore dei due rapporti tra le dimensioni dei cateti dello smusso e la dimensione del lato corrispondente della sezione efficace.
Nodi singoli	Il rapporto fra il diametro minimo del nodo e la dimensione del lato della sezione efficace su cui compare.
Gruppi di nodi	Il rapporto fra la somma dei diametri minimi dei nodi compresi in un tratto di 150 mm e la dimensione del lato della sezione efficace su cui compare.
Inclinazione della fibratura	L'inclinazione delle fessurazioni da ritiro rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, misurata sulle facce delle membrature, in zone distanti da nodi o da altre caratteristiche che possano comportare forti deviazioni localizzate della fibratura (per esempio a causa di nodi); la base minima di misura per la determinazione di questo parametro è pari a 150 mm, misurati parallelamente alla dimensione maggiore dell'elemento.

Fig. 1.7: Modalità di misurazione delle caratteristiche quantificabili sugli elementi strutturali in opera (Prospetto 2, UNI 11119:2004).

Gli elementi di carattere generale, comuni per tutte le specie definiscono:

- **Categoria I:** legname sano, immune da alterazioni cromatiche e da imperfezioni o guasti provocati da insetti o funghi. Esclusione di tasche di resina e di canastro, di cipollature e di qualsiasi altra lesione. Fibratura regolare avente deviazione massima delle fibre rispetto all'asse longitudinale del pezzo di circa il 10%; nodi aderenti con diametro non superiore a 1/5 della dimensione minima della sezione ed in ogni caso non superiore a 5 cm; frequenza dei nodi tale che in 15 cm di lunghezza della zona più nodosa la somma dei diametri dei vari nodi non oltrepassi i 2/5 della larghezza della sezione.
- **Categoria II:** legname sano, immune da perforazioni e guasti provocati da insetti o funghi, con tolleranza di lievi alterazioni cromatiche. Esclusione di canastro esteso, di cipollature e altre lesioni, con tolleranza di tasche di resina con spessore non superiore a 3 mm. Andamento delle fibre avente deviazione massima pari a circa il 20% rispetto all'asse longitudinale del pezzo; nodi aderenti aventi un diametro non superiore ad 1/3 della dimensione minima di sezione ed in ogni caso non superiore a 7 cm; frequenza dei nodi tale che in 15 cm di lunghezza della zona più nodosa la somma dei diametri dei vari nodi non superi 2/3 della larghezza della sezione. Tolleranza di lievi fessurazioni alle estremità e, nel caso di segati a spigolo vivo, di smussi non superanti 1/20 della dimensione che ne è affetta.
- **Categoria III:** legname sano, immune da perforazioni o guasti provocati da insetti o funghi, con tolleranza di alterazioni cromatiche. Esclusione di cipollature e altre lesioni estese. Andamento delle fibre avente deviazione massima di non oltre il 33% rispetto all'asse longitudinale del pezzo; nodi aderenti per almeno 2/3 del totale, con diametro non superiore ad 1/3 della dimensione minima di sezione; frequenza dei nodi tale che in 15 cm di lunghezza della zona più nodosa la somma dei diametri dei vari nodi non oltrepassi

3/4 della larghezza di sezione. Tolleranza di fessurazioni alle estremità e, nel caso di segati a spigolo vivo, di smussi non superanti 1/10 della dimensione che ne è affetta.

L'aspetto relativo agli smussi risulta un parametro discriminante per la classificazione, soprattutto per elementi lignei relativi al costruito storico esistente, per i quali non è raro imbattersi in travi o aste aventi smussi rilevanti, ricadenti nella famiglia delle travi uso Fiume e uso Trieste, normate dalla UNI 11035-3:2010 ma non sempre applicabile agli elementi in opera.

Per sopperire a tale problematica, è possibile far riferimento a quanto indicato nelle recenti istruzioni del Consiglio Nazionale delle Ricerche in cui si afferma che «in assenza di specifiche prescrizioni, per quanto riguarda la classificazione del materiale, si potrà fare riferimento a quanto previsto per gli elementi a sezione rettangolare, senza considerare le prescrizioni sugli smussi e sulla variazione della sezione trasversale, purché nel calcolo si tenga conto dell'effettiva geometria delle sezioni trasversali» (CNR-DT 206-R1:2018).

Specie	Categoria in opera	Tensioni massime (N/mm ²)					
		compressione		flessione statica	trazione parallela alla fibratura ¹⁾	taglio (parallelo alla fibratura)	modulo di elasticità a flessione
		parallela alla fibratura	perpendicolare alla fibratura				
Abete bianco (Abies alba Mill.)	I	11	2,0	11,5	11	0,9	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,8	12 000
	III	7	2,0	7,5	6	0,7	11 000
Abete rosso (Picea abies Karst.)	I	10	2,0	11	11	1,0	12 500
	II	8	2,0	9	9	0,9	11 500
	III	6	2,0	7	6	0,8	10 500
Larice (Larix spp.)	I	12	2,5	13	12	1,1	15 500
	II	10	2,2	11	9,5	1,0	14 500
	III	7,5	2,0	8,5	7	0,9	13 500
Pini (Pinus spp.)	I	11	2,0	12	11	1,0	13 000
	II	9	2,0	10	9	0,9	12 000
	III	7	2,0	8	6	0,8	11 000
Castagno (Castanea sativa Mill.)	I	11	2,0	12	11	0,8	10 000
	II	9	2,0	10	9	0,7	9 000
	III	7	2,0	8	6	0,6	8 000
Pioppo (Populus spp.)	I	10	1,5	10,5	9	0,6	9 000
	II	8	1,5	8,5	7	0,5	8 000
	III	6	1,5	6,5	4,5	0,4	7 000
Quercia (Quercus spp.)	I	12	3,0	13	12	1,2	13 500
	II	10	2,5	11	10	1,0	12 500
	III	7,5	2,2	8,5	7	0,9	11 500

Fig. 1.8: Tensioni massime e moduli di elasticità a flessione per elementi strutturali in opera (Prospetto 3, UNI 11119:2004).

Sulla base delle caratteristiche descritte dalla UNI 11119 è possibile definire, per elementi lignei di diverse specie legnose e categorie classificati a vista, le tensioni massime ed i valori medi di modulo elastico E a flessione (Fig. 1.8), secondo i valori tratti dal testo Tecnica delle Costruzioni in Legno del prof. Giordano, ancora oggi un utile riferimento da integrarsi alle Norme Tecniche.

Trattandosi di tensioni ammissibili è immediato osservare come manchi una correlazione tra gli elementi classificati secondo la norma UNI 11119:2004 e la più recente norma UNI EN 338:2016, le cui classi di resistenza fanno riferimento ai valori caratteristici da impiegarsi nei metodi di progetto e verifica agli Stati Limite (Fig. 1.9). A riguardo, esiste in bibliografia un tentativo di correlazione tra i due approcci (Fig. 1.10), ritenuto «cautelativo in termini di correlazione in funzione di considerazioni relative ai beni di interesse culturale» (Aveta e Monaco, 2007).

Appare evidente come la correlazione proposta sia da valutarsi evitando un approccio di tipo sistematico e meccanico che andrebbe a standardizzare dei parametri meccanici che, per natura dello stesso materiale, sono da considerarsi a seconda delle specifiche caratteristiche, a prescindere dalla specie legnosa. La stessa norma UNI EN 338 è stata aggiornata nel 2016 e i relativi valori medi del modulo elastico parallelo alle fibre $E_{0,mean}$ sono ad oggi in fase di classificazione.

Valori di resistenza modulo elastico e massa volumica		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Resistenze (MPa)													
Flessione	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Trazione parallela alla fibratura	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	21	24	27	30
Trazione perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compressione parallela alla fibratura	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	26	27	29
Compressione perpendicolare alla fibratura	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2
Taglio	f_{vk}	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4
Modulo elastico (GPa)													
Modulo elastico medio parallelo alle fibre	$E_{0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Modulo elastico caratteristico parallelo alle fibre	$E_{0,05}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7
Modulo elastico medio perpendicolare alle fibre	$E_{90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53
Modulo di taglio medio	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00
Massa volumica (kg/m³)													
Massa volumica caratteristica	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460
Massa volumica media	ρ_m	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Fig. 1.9: Classi di resistenza secondo la norma UNI EN 338:2016 (Zan, 2018).

Specie legnosa	Categoria UNI 11119:2004	Classe UNI EN 338:2004
Abete bianco	I	C24
	II	C22
	III	C16
Abete rosso	I	C24
	II	C20
	III	C16
Larice	I	C30
	II	C24
	III	C18
Pino	I	C27
	II	C22
	III	C18
Pioppo	I	C24
	II	C18
	III	C14
Quercia	I	D40
	II e III	D30
Castagno	I	D40
	II e III	D30

Fig. 1.10: Correlazione tra le categorie della UNI 11119:2004 e le classi della UNI EN 338:2004 (Aveta e Monaco, 2007).

1.2.4 Indagini di II livello o strumentali

Sono effettuate tramite l'uso di strumentazioni atte a rilevare lo stato di salute interno e la qualità degli elementi lignei ispezionati per mezzo di prove non distruttive o debolmente invasive. Sono eseguite nelle parti non accessibili dove l'analisi visiva non è sufficiente per la valutazione dello stato di conservazione dell'elemento. Il numero delle prove da condurre non è definibile a priori in quanto è dipendente dalla dimensione dello stesso elemento ligneo, dalla sua accessibilità, dall'entità presunta del degrado e da ulteriori problematiche.

Tra gli strumenti comunemente usati vi sono:

- l'igrometro, che rileva l'umidità relativa del legno;
- il martello in gomma, la cui risposta sonora individua eventuali anomalie;
- l'endoscopio, che permette di fotografare l'interno di un foro e valutarne lo stato;
- il pilodyn, che consente di determinare la durezza dell'elemento;
- il trapano resistografico, che valuta la resistenza alla penetrazione;
- gli ultrasuoni, che consentono di valutare la densità e la massa volumica.

Per indagini più specifiche è possibile ricorrere a prove di carico fino ad arrivare a prove distruttive su elementi da sostituire o per i quali è necessario determinare alcune proprietà meccaniche. Relativamente all'esecuzione di eventuali prove di carico su strutture lignee esistenti le istruzioni del Consiglio Nazionale delle Ricerche rimandano alla norma UNI EN 380:1994 relativa ai principi generali per le prove con carico statico. La norma UNI EN 408:2010 specifica invece i metodi per la determinazione delle proprietà meccaniche del legno strutturale tra cui il modulo elastico a flessione, la resistenza a flessione, il modulo elastico a compressione parallelo alla fibratura e la resistenza a compressione parallela alla fibratura.

Un più chiaro approccio alle strutture del patrimonio storico esistente¹ è dato dalla recente norma UNI EN 17121:2019 relativa alla conservazione del patrimonio culturale ed alle strutture storiche in legno per le quali ne definisce le linee guida per la valutazione *in situ*, anche con indagini strumentali che integrino il livello di conoscenza in termini di conservazione e classificazione.

1.3 Revisione della letteratura scientifica

Il presente paragrafo riassume e analizza alcuni articoli presenti in letteratura, in tema di indagini strutturali sulle strutture lignee relative al costruito storico. Tale fase di ricerca è risultata fondamentale ai fini del presente lavoro, sia per ampliare la conoscenza sulla tematica e sia per avere dei parametri di confronto a supporto delle analisi sugli elementi lignei del caso-studio.

Si riportano — in ordine cronologico rispetto all'anno di pubblicazione — gli articoli che hanno contribuito con i loro approcci e risultati a determinare una base di partenza ragionevole. Per ognuno, oltre al titolo e all'autore principale, sono indicati l'*abstract* e i principali riferimenti.

1.3.1 Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics (Ceraldi et al., 2001)

L'articolo ha come obiettivo quello di esaminare la possibilità d'utilizzo del resistograph per lo studio della variabilità delle prove meccaniche nelle strutture lignee storiche. Lo studio ha visto l'impiego di un solo strumento, il resistograph, per la specie legnosa principale del faggio.

¹ Le strutture del patrimonio culturale sono importanti manufatti storici che differiscono da altre strutture esistenti in quanto, per la loro natura storica, hanno un valore aggiunto che ne implica la conservazione e tutela.

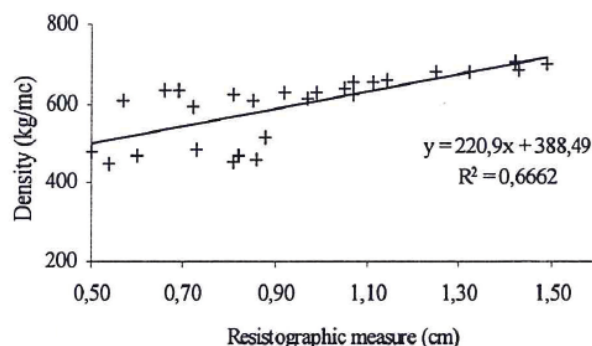


Fig. 1.11: Correlazione tra la densità ed il parametro resistografico (Ceraldi et al., 2001).

La sperimentazione proposta in questa pubblicazione parte dalla ricerca di una possibile correlazione tra la densità di varie specie e le corrispondenti misurazioni resistografiche, espresse come il rapporto tra l'area sottesa dalla curva disegnata dal resistograph e la lunghezza del campione considerato. Il coefficiente di determinazione risultante è discreto (Fig. 1.11) per cui lo strumento viene considerato un previsore della densità del materiale. Il parametro resistografico non viene utilizzato come indice per la previsione diretta della resistenza meccanica, in questo caso a compressione; infatti la densità viene relazionata con la tensione a compressione parallela, quindi la previsione si attua passando per la relazione parametro resistografico-densità e densità-resistenza meccanica.

1.3.2 Structural investigation and analyses for the conservation of the 'Arsenale' of Venice (Valluzzi et al., 2002)

L'articolo presenta gli interventi sistematici progettati sulla maggior parte degli edifici dell'Arsenale di Venezia — il veneziano cantiere navale della Repubblica Serenissima — legati alla ristrutturazione degli ambienti a seguito di nuove destinazioni d'uso per il rilancio dell'area, dismessa al tempo della pubblicazione. Dopo una generale presentazione delle principali proprietà e dei più rilevanti fenomeni di degrado delle parti dell'area, è descritta la metodologia attuata per la diagnosi strutturale con l'obiettivo di implementare le linee guida per gli interventi futuri e per il mantenimento delle condizioni di ripristino.

Oltre che per l'impostazione generale del lavoro, la fonte si è rivelata un utile documento di confronto per la rappresentazione e l'analisi dei risultati preliminari forniti da prove di indagine in sito, discussi e analizzati tramite simulazioni numeriche agli elementi finiti.

1.3.3 Analyses for the conservation of the load bearing wooden structures of the Teatro Comunale in Modena (Belletti et al., 2005)

L'articolo espone i problemi di conservazione delle strutture portanti in legno del Teatro Comunale di Modena, realizzato nel 1840, ed evidenzia come per alcune strutture appaia opportuna un'accurata indagine sulla situazione statica. Nello specifico gli autori trattano l'analisi agli elementi finiti mettendo in evidenza come risulti di fondamentale importanza un approccio che consideri, nella modellazione con elementi *beam*, l'ortotropia del materiale legno attraverso l'introduzione di un modulo di elasticità equivalente che tenga conto della diversa resistenza in direzione parallela ed ortogonale alla fibratura, al fine di valutare in maniera più accurata e veritiera le tensioni e gli sforzi interni, in particolare nei nodi di carpenteria tra le aste componenti le strutture di copertura.

1.3.4 Methodology for the analysis of complex historical wooden structures: a study case (Mazzolani et al., 2005)

Il contributo tratta l'analisi del comportamento di una struttura complessa in legno antico. A tal fine sono state affrontate tutte le problematiche relative alla modellazione e analisi strutturale. In particolare, con riferimento ad un caso di studio, ovvero le strutture di copertura della Sala Diplomatica del Palazzo Reale di Napoli, sono stati presentati i rilievi geometrici e meccanici di dettaglio, come preliminari ed indispensabili fasi per l'identificazione strutturale, da effettuarsi sia mediante indagini in situ che di laboratorio con prove su esemplari di legno antico. Sulla base dei risultati dell'analisi strutturale, mediante un modello 3D, le verifiche di sicurezza, secondo le disposizioni fornite dall'Euro-Codice 5, hanno individuato la capacità della struttura in termini di resistenza e deformazione. Tra i dati assunti per l'analisi strutturale (Fig. 1.12), si evidenzia come gli autori abbiano considerato una riduzione del 25% tra i valori dei moduli di elasticità tra il legno definito come nuovo e quello antico appartenente alle strutture lignee del caso studio datato al XVIII secolo.

Wood	γ (kN/m ³)	E_0 (kN/m ² × 10 ⁻³)	E_{90} (kN/m ² × 10 ⁻³)	ν_0	ν_{90}	G_0 (kN/m ² × 10 ⁻³)	G_{90} (kN/m ² × 10 ⁻³)
<i>Nominal mechanical properties of the new wood</i>							
Chestnut	5.80	11380	544	0.37	0.46	4153	185
Poplar	3.40	7850	376	0.38	0.47	2844	128
<i>Predicted mechanical properties of the ancient wood</i>							
Chestnut		8535	408			3115	139
Poplar		5887	282			2133	96

Fig. 1.12: Proprietà meccaniche del legno con caratterizzazione tra nuovo e antico (Mazzolani et al., 2005).

1.3.5 Timber roof structures of the “Arsenale” of Venice (Menichelli et al., 2005)

L'articolo tratta lo studio delle strutture lignee componenti la copertura dell'Arsenale di Venezia. Oltre all'analisi storica del sito e dell'evoluzione della stessa copertura, gli autori, a seguito dell'ispezione e dei rilievi, hanno eseguito osservazioni in merito alle analisi numeriche effettuate per analizzare il comportamento globale delle capriate di copertura.

In particolare, relativamente alla modellazione agli elementi finiti, si evidenzia come sia risultato differente il comportamento tra i modelli consideranti o meno la presenza delle staffe in ferro tra i monaci e la catena delle capriate palladiane composte relative alla copertura degli ambienti delle Corderie, modellate tramite 'nodo rigido' (Fig. 1.13).

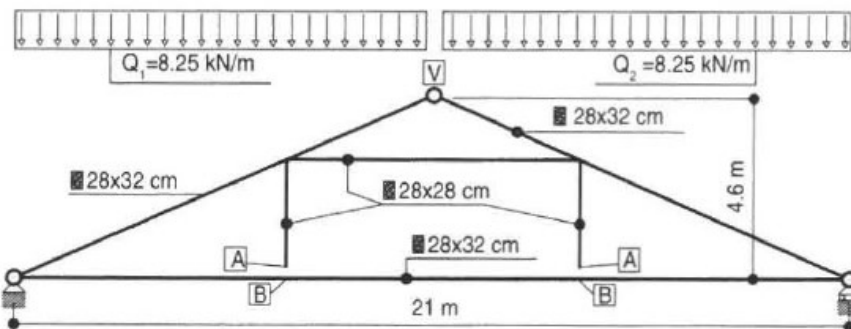


Fig. 1.13: Modello agli elementi finiti con indicati i punti A e B relativi ai nodi di connessione per la modellazione delle staffe metalliche tra monaco e catena della capriata palladiana composta delle Corderie (Menichelli et al., 2005).

1.3.6 Adeguamento sismico delle capriate lignee: i metodi tradizionali di rinforzo (Parisi et al., 2007)

Nell'adeguamento sismico di edifici tradizionali le strutture lignee che sorreggono le coperture sono state spesso sostituite con elementi industriali di materiale diverso, che possono introdurre notevoli variazioni di massa e di proprietà meccaniche rispetto alla situazione iniziale. È noto che in terremoti recenti si sono verificate alcune situazioni di danno in edifici precedentemente adeguati con questi criteri. Per le strutture lignee, d'altra parte, esiste una lunga tradizione di interventi di rinforzo e riparazione, sviluppatasi in conseguenza delle caratteristiche del materiale che necessita di controllo e manutenzione per estendere la sua vita nel tempo.

Lo studio pone l'attenzione sul nodo puntone-catena (Fig. 1.14), particolarmente importante nel funzionamento delle capriate e maggiormente soggetto a degrado. Le analisi svolte hanno messo in evidenza l'importanza del comportamento di tale nodo non soltanto in caso di carichi statici, ma anche di carichi ciclici, con particolare riferimento al sisma. Per le giunzioni, sono state e sono

tuttora utilizzate varie tipologie di rinforzo, realizzate in genere sulla base della pratica costruttiva. Le giunzioni costituiscono l'elemento chiave nella risposta sismica delle strutture lignee, perché possono fornire una più o meno estesa capacità di dissipazione o, viceversa, costituire un elemento critico in cui si realizzano comportamenti fragili o sconnessioni. Mancano tuttavia criteri di valutazione dell'efficacia dei vari tipi di rinforzo nei confronti del sisma.

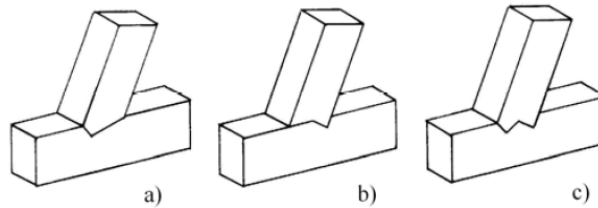


Fig. 1.14: Nodo puntone-catena con incastro a dente semplice (a), a dente arretrato (b) e a dente doppio (c) (Parisi et al., 2007).

1.3.7 Mechanical characterization of old chestnut beams (Branco et al., 2011)

L'obiettivo principale di questo lavoro è stato quello di valutare, con tecniche non distruttive, sette vecchie travi di castagno. Dopo la valutazione geometrica è stata eseguita una dettagliata ispezione visiva che ha permesso di classificare la resistenza delle travi. Le valutazioni sono state eseguite nel rispetto delle norme UNI 11119:2004 e UNI 11035:2003 classificando gli elementi lignei ed assegnandone i parametri di resistenza. Successiva è stata l'esecuzione di prove non distruttive a flessione, eseguite per quantificare il modulo di elasticità a flessione (E_0) delle sette travi; quindi sono stati eseguiti test con resistografo e pilodyn per valutare il decadimento superficiale e per avere un'idea più chiara dello stato di salute interno.

	Beam	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7
Moisture content	[%]	11,23	12,78	11,18	10,98	12,67	10,37	12,62
Density [kg/m ³]	NP 616:1973	-	632	602	564	571	575	566
	UNI 11035:2003	-	550					
$E_{0,mean}$ [MPa]	UNI 11119:2004	8000	9000	10000	9000			
	UNI 11035:2003	11000						
	EN 408:2004	10987	7935	7532	11493	5102	11753	11072
$f_{m,k}$ [MPa]	UNI 11119:2004	8	10	12	10			
	UNI 11035:2003	-	28					
	EN 408:2004	-	-	-	35,75	14,38	-	-
$f_{t,0,k}$ [MPa]	UNI 11119:2004	6	9	11	9			
	UNI 11035:2003	-	17					
	EN 408:2004	-	62,94	62,97	66,90	61,10	62,08	52,01

Fig. 1.15: Confronto dei risultati delle indagini su sette travi in legno di castagno (Branco et al., 2011).

I risultati ottenuti sono stati confrontati e correlati, oltre che riassunti in forma tabellare per un immediato confronto (Fig. 1.15), hanno mostrato correlazioni tra densità-modulo di elasticità alla flessione e densità-tensione parallela alle fibre. Non è stata definita alcuna correlazione tra i risultati di diversi controlli non distruttivi. È stata evidenziata l'efficacia della

valutazione visiva: infatti, in assenza di altre informazioni o dati di dettaglio, la classificazione visiva eseguita in base alle norme UNI ha indicato valori di riferimento accettabili per le principali proprietà meccaniche delle travi lignee investigate.

1.3.8 Restoration of historical timber structures criteria, innovative solutions and case studies (Croatto et al., 2014)

L'articolo affronta il tema del restauro delle strutture lignee storiche, molto importante ed ancora suscettibile di possibili migliorie, soprattutto in considerazione dei numerosi errori commessi negli anni passati a causa di una certa superficialità e anche dell'entusiasmo suscitato dall'avanzamento delle conoscenze nel campo dei prodotti chimici come le resine epossidiche o il calcestruzzo in resina. Da un iniziale sperimentalismo, non propriamente disciplinato da norme adeguate, sono nate norme specifiche unitamente alla definizione di nuovi concetti relativi al restauro del legno, con particolare riguardo ai campi della reversibilità e della compatibilità dei materiali. I progettisti, sia per quanto riguarda i solai che le coperture in legno, hanno oggi diverse possibilità di intervento quali sostituzione, restauro, integrazione delle strutture esistenti, ma si evidenzia come servano regole e criteri specifici con l'obiettivo di soddisfare le moderne esigenze di sicurezza strutturale e i principi del restauro conservativo.

Di rilievo le indicazioni in merito alle possibili azioni di recupero da effettuarsi su strutture lignee di fabbriche storiche esistenti, riassunte nelle fasi:

- ripristino del materiale;
- ripristino delle continuità strutturali;
- ripristino della funzionalità strutturale;
- rinforzo con strutture miste (legno-clc o legno-legno).

Gli autori evidenziano come, in genere, il ripristino della continuità materica e strutturale dovrebbe essere eseguito con materiali simili a quelli esistenti, ripristinando i giunti originali utilizzando modelli strutturali tradizionali. A tal fine è opportuno utilizzare, per quanto possibile e secondo le azioni statiche, semplici collegamenti mediante elementi in legno o in metallo, come quelli tradizionali. L'uso di resine dovrebbe essere ammesso specificatamente in contesti sismici e limitato a collanti specifici per legno. In questo ambito di intervento una delle tecniche più utilizzate è la sostituzione di manufatti cariati con protesi in legno collegate a quelle esistenti mediante barre in fibra, carbonio o acciaio. Le tipologie di intervento sono le più svariate: i collegamenti possono essere fianchi laterali, fianchi superiori/inferiori, interni o esterni, il tutto

per quanto riguarda travi di solaio o capriate di copertura (Fig. 1.16).



Fig. 1.16: Esempio di interventi mediante connessioni: (sx) trave di solaio, (dx) nodo di capriata (Croatto et al., 2014).

1.3.9 Guidelines for on-site assessment of historic timber structures (Cruz et al., 2015)

L'articolo ha origine da un documento redatto e discusso nell'ambito della cooperazione europea in materia di scienza e tecnologia del legno per la conservazione del patrimonio culturale, in cui si è convenuto di elaborare orientamenti per la valutazione delle strutture storiche in legno con l'obiettivo di fornire approcci e principi per la messa in sicurezza delle strutture, da utilizzarsi come base di partenza per eventuali nuove norme europee.

Il testo fornisce indicazioni sui criteri da adottarsi nella valutazione delle strutture portanti in legno negli edifici storici. Affronta le tematiche della valutazione preliminare in riferimento a valutazioni in sito, l'analisi strutturale e la redazione del rapporto, nonché la classificazione della resistenza e l'analisi dei giunti di carpenteria. Gli autori forniscono anche una chiara metodologia di approccio da eseguirsi in fasi necessarie alla valutazione e pianificazione degli interventi sulle stesse strutture storiche in legno (Fig. 1.17).

Tra le condizioni necessarie per l'ispezione viene fatto riferimento a quanto stabilito dalla norma UNI 11119:2004 in termini di accessibilità, illuminazione e pulizia. Ci si deve riferire alla norma UNI EN 1995-1-1 relativamente all'indagine tecnologica per la determinazione delle proprietà meccaniche, mentre tramite la norma UNI EN 335-2 è possibile la definizione delle condizioni ambientali e del relativo pericolo biologico a cui sono esposti gli elementi lignei oggetto di analisi. Alla valutazione in sito, accompagnata da indagini strumentali, è buona norma far seguire l'analisi strutturale tramite la modellazione delle strutture rilevate e la valutazione delle zone critiche e degradate in funzione delle sollecitazioni gravanti, avendo cura di definire le proprietà meccaniche del materiale e considerando le sezioni efficaci degli elementi lignei.

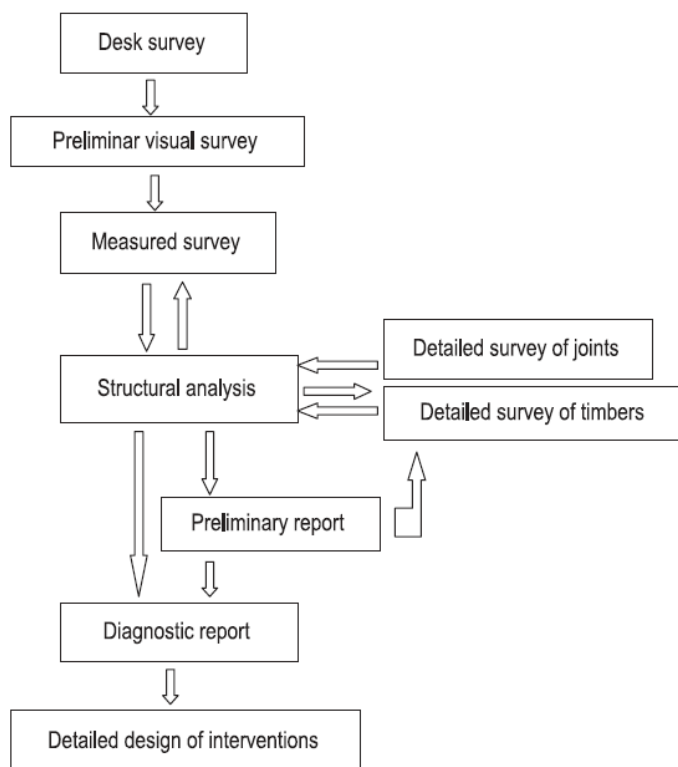


Fig. 1.17: Fasi necessarie per gli interventi in strutture storiche in legno (Cruz et al., 2015).

1.3.10 State-of-the-art technology on conservation of ancient roofs with timber structure (Tampone et al., 2016)

Le strutture portanti in legno delle coperture sono organizzate come un'articolazione gerarchica di membrature e unità strutturali collegate da giunti e travi ausiliarie per formare sistemi strutturali. Gli autori elencano, per ognuno dei livelli citati, le tecniche che possono essere considerate obsolete come le sostituzioni indiscriminate di aste e corpi o, peggio, dell'intero sistema, l'applicazione di pesanti profili in acciaio posti all'esterno o all'interno delle aste e delle unità o delle protesi invasive che irrigidiscono i nodi e ne distruggono la duttilità. Vengono espresse considerazioni sulla mancanza di adeguatezza di queste tecniche. Oggi sono disponibili nuove tecniche che, sia ottenute come adeguamento delle vecchie sia basate su approcci completamente nuovi, si ispirano a criteri di conservazione e riparazione. Basandosi su interventi di minima entità, sono in grado di assicurare, entro certi limiti, il rispetto della struttura originaria con i valori che portano e il recupero della configurazione, dei materiali e dell'aderenza originari. Gli autori non accettano la pratica di smantellare la struttura, in parte o interamente, al fine di sostituire le sue parti danneggiate, richiedono lavori in situ consentendo così anche il salvataggio dell'assemblaggio originale con interventi non invasivi.

1.3.11 Correlazione tra metodi di indagine non invasivi per la qualificazione del legno e prove di caratterizzazione meccanica di componenti strutturali dell'edilizia storica (Scancelli, 2017)

Il lavoro — relativo ad una tesi di laurea — ha ricercato le possibili correlazioni tra parametri derivanti da indagini non invasive e parametri conseguiti con prove di caratterizzazione meccanica. Per fare ciò si sono testati diversi elementi lignei, sia di nuova fattura che di reimpiego, considerando anche diverse essenze arboree, in modo da comprendere al meglio le molteplici variabili che sono proprie di questo oggetto di studio. Nel dettaglio si sono approfondite le tecniche di indagine maggiormente diffuse e le specie legnose che caratterizzano il patrimonio edilizio storico italiano, cercando una possibile procedura utilizzabile dai tecnici ispettori che possa spiegare il comportamento e lo stato di conservazione delle strutture con il minor tasso d'incertezza possibile (Scancelli, 2017).

Tra i risultati riportati si sono ritenuti di interesse quelli pervenuti dalle analisi relative alle capriate lignee di un sito dismesso, relative alla Cascina Moncucco, risalente al XVIII secolo e della specie legnosa dell'abete rosso, elementi di confronto per il caso-studio in esame.

1.3.12 Assessment of heritage timber structures: Review of standards, guidelines and procedures (Riggio et al., 2018)

Il documento esamina gli standard, le linee guida e le procedure disponibili per la valutazione delle strutture in legno del patrimonio culturale, con la finalità di trasmettere lo stato delle conoscenze di base, le raccomandazioni e le regole delle normative utilizzando alcuni esempi illustrativi. Un focus specifico è dato all'ispezione visiva, indicata come primo passo fondamentale per tutti i diversi ambiti e livelli di valutazione. Gli obiettivi di questa revisione sono: evidenziare le lacune e i limiti negli strumenti attualmente disponibili, nonché la necessità di standardizzazione; contribuire alla definizione di un approccio ontologico, che metta in relazione l'ambito della valutazione, le informazioni le procedure richieste e necessarie; identificare linee guida per i diversi ambiti della valutazione.

La varietà delle specie legnose, delle tipologie architettoniche e delle soluzioni strutturali, insieme alla varia risposta delle strutture ai rischi climatici e ad altri rischi — naturali e causati dall'uomo — giustificano una metodologia di valutazione multiforme e integrata che tenga conto della natura gerarchica del comportamento delle strutture in legno e della moltitudine di agenti che

influenzano tale comportamento. La revisione e il confronto degli standard e delle linee guida esistenti (Fig. 1.18) illustra la necessità di uno strumento per registrare coerentemente il processo di valutazione e la decisione finale presa, che servirà a costituire la base per lo sviluppo della prossima generazione di linee guida, più integrate e specifiche per il patrimonio culturale.

	Relevance	Main objective	Scope of the assessment Protection/document. Vulnerability/damage Safety/serviceability	Level of the investigation Preliminary General Detailed	Timber	Other materials	Existing structures
FEMA 807:2012	N	Seismic evaluation and retrofit	B	1, 3	X		X
ISO 13822:2010	I	Assessment of existing structure	C	1, 3	X	X	X
ISO 2394:2015	I	Reliability of structures	C	2, 3	X	X	X
Eurocode 5	I	Design of timber structure	C	-	X	-	-
ČSN 730038:2014	N	Assessment of existing structure	C	2 and 3	X	X	X
NTC 2008	N	Structural design	C	-	X	X	
SIA 269/5:2011	N	Assessment of existing structure	C	1, 2 and 3	X		X
UNI 11138:2010	N	Intervention on timber structure	C	2 and 3	X	-	X
UNI 11118:2004	N	Wood species identification	C	3	X	-	X
UNI 11119:2004	N	On-site inspection	C	3	X	-	X
EN 335:2013	I	Durability of wood and wood-based products. Use classes	B	2	X	-	X
ASTM D 245:2012	I	In situ grading of structural timber	C	3	X	-	X
COST ACTION IE0601	I	Assessment of timber structure	C	1, 2 and 3	X	-	X
COST E55	I	Assessment of timber element	C	3	X	-	X
ICOMOS-ISCARSAH	I	Assessment of existing structure	A-C	1, 2 and 3	X	X	X
ICOMOS IWC	I	Assessment of existing structure	A-C	1, 2 and 3	X		X

N: national; I: intern.

Fig. 1.18: Confronto delle linee guida nazionali ed internazionali in tema di strutture lignee (Riggio et al., 2018).

1.3.13 The assessment of Italian trusses: survey methodology and typical pathologies (Macchioni et al., 2018)

Lo scopo di questo articolo è descrivere le caratteristiche tipiche delle capriate italiane e le procedure di rilievo attraverso esempi pratici tratti da strutture ispezionate. La valutazione completa di una struttura del tetto è un'attività interdisciplinare, l'articolo ha lo scopo di presentare il punto di vista del tecnologo del legno, considerando solo parzialmente gli aspetti strutturali. Gli autori descrivono come il rilievo venga effettuato secondo una procedura *step by step*, con livelli di analisi crescenti: partendo da un'analisi generale della struttura nel suo insieme fino all'analisi delle singole componenti e connessioni, ottenendo informazioni sempre più dettagliate che possono descrivere i risultati del precedente livello di analisi. Vengono inoltre descritte le patologie più comuni che si verificano su capriate e strutture in legno.

Infine, prima delle conclusioni generali, viene mostrato un semplice caso studio, basato su una struttura di copertura dell'inizio del XIX secolo, per il quale si è proceduto all'ispezione visiva tramite i criteri e metodi descritti dalla norma UNI 11119:2004 con approfondimenti delle zone

ammalorate tramite indagine con trapano resistografico. Per ogni capriata sono state redatte schede di rilievo e analisi con dettagli relativi al degrado rilevato (Fig. 1.19).

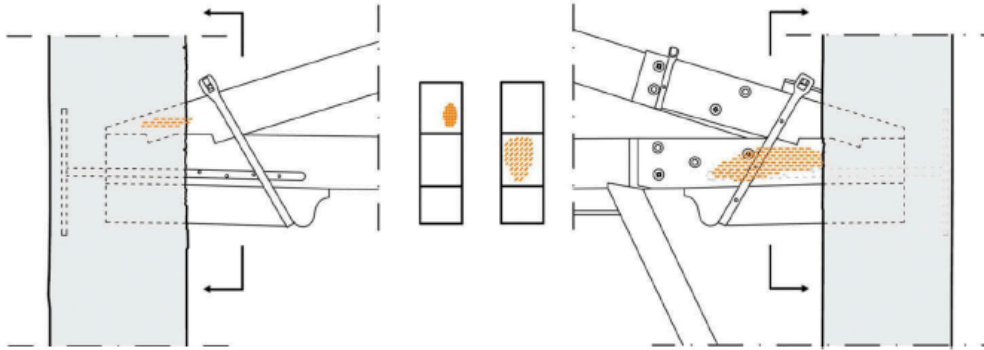


Fig. 1.19: Esempio di restituzione del degrado su una capriata lignea (Macchioni et al., 2018).

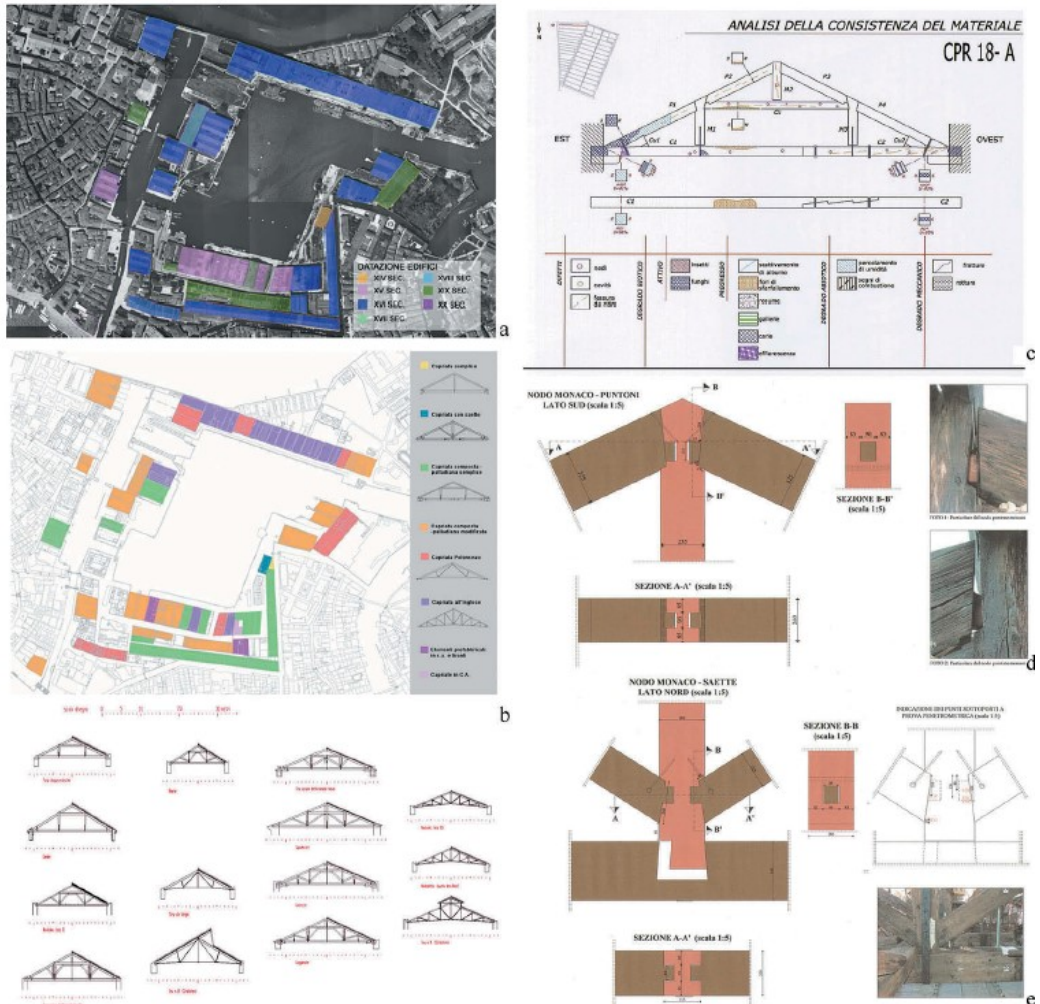


Fig. 1.20: Arsenale di Venezia: (a) veduta aerea con indicazioni sull'epoca di costruzione delle strutture di copertura; (b) principali tipologie di strutture di copertura; (c) carta tematica dei decadimenti del legno; (d) rilievo geometrico con analisi strumentale sull'incastro montante/travicelli; (e) rilievo geometrico con analisi strumentale sul giunto trave-montante. (Bertolini Cestari et al., 2018).

1.3.14 Conservation of historic timber roof structures of Italian architectural heritage: diagnosis, assessment, and intervention (Bertolini Cestari et al., 2019)

L'articolo evidenzia come nel contesto del nostro patrimonio architettonico, le strutture in legno rappresentino un settore importante in termini di rilevanza storica, tecnologia architettonica e materiali da costruzione. In passato queste strutture non ricevevano molta attenzione in termini di conservazione ed erano spesso oggetto di interventi impropri o demolizioni. Si mette in luce anche come le strutture del tetto costituiscano parte integrante del complesso architettonico in cui si trovano e come tali dovrebbero essere trattate con la stessa attenzione e rispetto per la loro importanza storica. Il processo di conservazione di queste strutture ha trovato un proprio ruolo anche a seguito delle innovazioni tecnologiche e normative del settore dei manufatti lignei appartenenti ai beni culturali.

Il lavoro presenta alcuni progetti di ricerca multidisciplinari per la conservazione e la riabilitazione delle strutture storiche del tetto in legno realizzati in un periodo di trent'anni. Lo studio ha interessato diverse coperture prevalentemente appartenenti al patrimonio architettonico del nord Italia, di cui cinque inserite nella World Heritage List dell'UNESCO.

1.3.15 Structural and health assessment of historic timber roofs from the Convent of Christ in Tomar (Verbist et al, 2019)

L'articolo evidenzia l'importanza della valutazione dello stato di conservazione delle strutture lignee, prima di prendere qualsiasi decisione in merito ad interventi nel processo di restauro di edifici esistenti, in particolare per edifici appartenenti al patrimonio culturale che abbiano subito una mancanza di manutenzione nella loro vita utile. In tale contesto, tre strutture del tetto in legno del Convento di Cristo a Tomar, in Portogallo, sono state studiate ed è stata introdotta e applicata a questo caso-studio una metodologia di ricerca articolata in quattro fasi:

- ispezione visiva;
- diagnosi non distruttiva del legno;
- valutazione della sicurezza strutturale;
- prevenzione e misure di intervento.

Per l'ispezione visiva, ogni elemento e giunto costituente le strutture del tetto è stato esaminato attraverso la valutazione delle specie legnose, delle diverse fasi costruttive e, non da ultimo, della loro rispettiva geometria. Tra le patologie riscontrate, i disordini strutturali e il degrado del legno

dovuti ad agenti biotici, hanno dimostrato che inevitabilmente portano ad una probabile diminuzione delle prestazioni meccaniche della struttura del tetto. Per stimare la sezione trasversale dell'elemento residuo e del modulo elastico (E), la diagnosi del legno è stata effettuata utilizzando tre prove non distruttive: di tipo ultrasonico, resistografico e con pilodyn. Dai dati raccolti, le tre strutture del tetto in legno sono state modellate tramite un software per verificarne la sicurezza e l'integrità. Sulla base dei risultati ottenuti, alcune misure di prevenzione e intervento sono state proposte caso per caso.

Di rilievo per il presente elaborato è risultata la valutazione relativa al danno indagato per i singoli elementi costituenti le strutture lignee di copertura. In funzione dei risultati delle prove di indagine, per le singole aste è stato rappresentato il biodegradamento con la relativa indicazione di fasce di danno individuanti i moduli di elasticità, in direzione parallela (E_0) ed ortogonale alla fibratura (E_{90}), associati (Fig. 1.21).

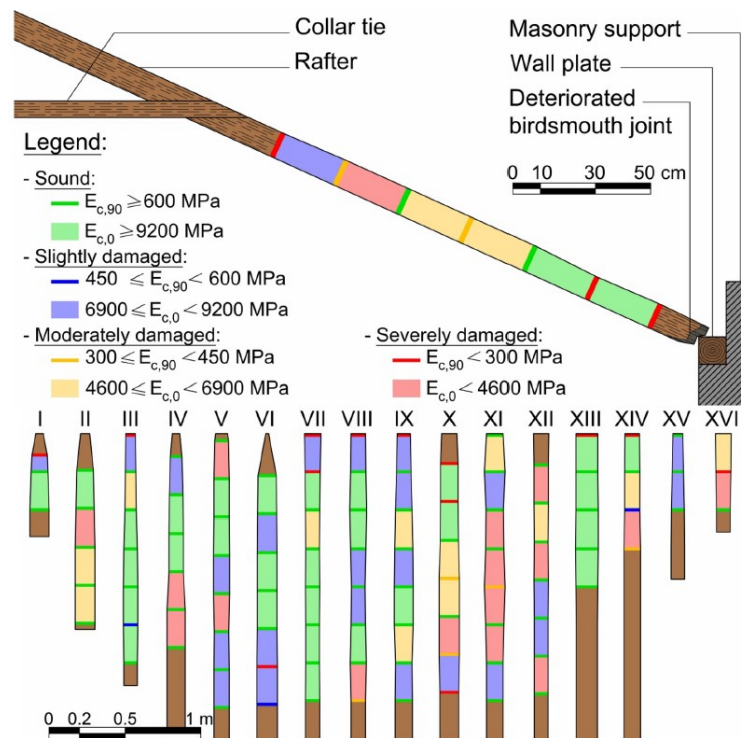


Fig. 1.21: Rappresentazione e classificazione del danno e dei relativi moduli di elasticità (Verbist et al., 2019).

Per ulteriori approfondimenti, oltre che alla lettura integrale degli articoli revisionati e presentati, si rimanda all'analisi delle fonti riportate in bibliografia, valido strumento di supporto alle tematiche esposte nel presente elaborato ed alla comprensione del caso-studio.

2. LE CAPRIATE LIGNEE

Il capitolo vuole mettere in luce il tema delle capriate lignee dando rilievo all'evoluzione di tale sistema costruttivo, descrivendone la funzione strutturale e le connessioni tra gli elementi costituenti. Particolare attenzione è data alla capriata di tipo palladiano composto, soluzione adottata per la copertura del corpo centrale di Villa Pisani.

2.1 Analisi evolutiva delle capriate lignee

La capriata costituisce un'unità strutturale complessa di grande interesse e larga diffusione spaziale e temporale. È ancora oggi elemento fondamentale delle architetture a struttura lignea ma l'attuale concezione è il risultato dello studio delle soluzioni succedutesi nel tempo che, attraverso i trattati pervenutici, hanno trasmesso i più alti saperi sul legno e su tale soluzione costruttiva, propri più dell'arte del costruire che della scienza delle costruzioni.

2.1.1 Schema statico ed elementi componenti

Preliminarmente all'analisi evolutiva di tale sistema costruttivo, è necessario definirne brevemente lo schema statico e le principali componenti: la capriata è una struttura portante di coperture di edifici a due falde, di forma triangolare, prevalentemente realizzata in legno. Nella sua forma più semplice è composta da due elementi inclinati, definiti puntoni e soggetti a pressoflessione, e da un elemento orizzontale, detto catena e soggetto a trazione (Fig. 2.1).

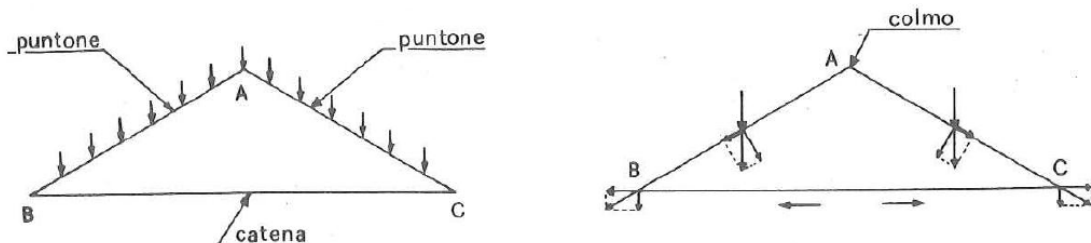


Fig. 2.1: Schema statico di una capriata triangolare semplice (Caleca, 1994).

In corrispondenza del colmo è presente un elemento verticale, chiamato monaco, che ha la funzione di collegamento tra i due puntoni e che generalmente è scarico. Per luci maggiori, sono presenti due ulteriori aste inclinate, dette saette o saettoni, che collegano l'estremo inferiore del

monaco con la mezzeria dei puntoni, con funzione di irrigidimento e che inducono il monaco ad essere teso, in conseguenza della loro compressione. Una tale configurazione è nota come capriata palladiana semplice (Fig. 2.2) che può divenire composta per luci superiori ai 10-12 metri e che vede l'introduzione di una controcatena e di due ulteriori monaci (Fig. 2.3).

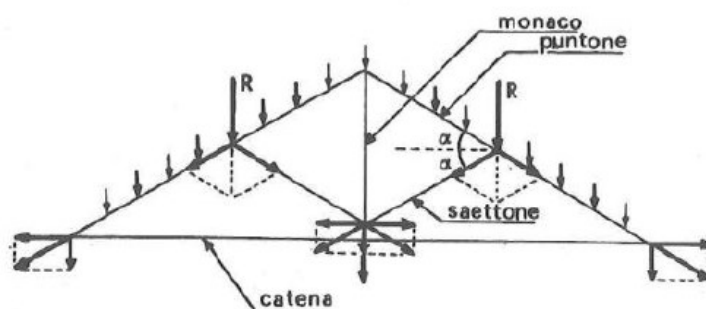


Fig. 2.2: Schema statico di una capriata palladiana semplice (Caleca, 1994).

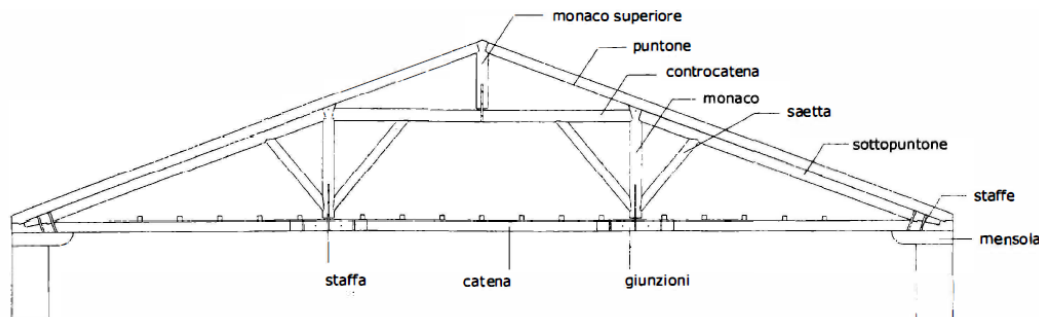


Fig. 2.3: Terminologia degli elementi di una capriata palladiana composta (UNI 8090-8091).

2.1.2 L'evoluzione storica e strutturale

Un primo esempio di capriata è datato VI secolo d.C. ed è relativo alla Basilica di S. Caterina sul Monte Sinai, composta da due puntoni, catena e monaco — staccato dalla catena — e due saette. Già nel pronao del Pantheon, nel II secolo d.C., risulta vi fossero delle capriate lignee ma la datazione più realistica è quella relativa alle basiliche forensi del V secolo d.C., modello per le successive basiliche cristiane in cui la presenza delle stesse capriate è accertata.

Molti autori fanno risalire l'introduzione delle capriate lignee al periodo romano con il riferimento al De Architettura di Vitruvio, anche se lo stesso le descrive con poca chiarezza. Sono proprio le traduzioni del testo di Vitruvio che mettono in evidenza il suo interesse per tale struttura costruttiva e che ne fanno presupporre l'utilizzo nel periodo romano. In particolare, nelle traduzioni di Cesare Cesariano e di Daniel Barbato vi sono rappresentazioni di capriate lignee a due saette e un monaco poggiante direttamente sulla catena. Un secolo prima il senese

Mariano di Jacopo² propone alcune soluzioni di capriate lignee con e senza catena con schematizzazioni che sembrano richiamare quelle statiche dell'arco a tre cerniere. In generale, sia in termini costruttivi che geografici, si evidenziano due principali modelli di capriata: quello a catena caricata e quello a triangolo indeformabile, la cui differenza sostanziale è il tipo di collegamento tra la catena e il monaco (Fig. 2.4).

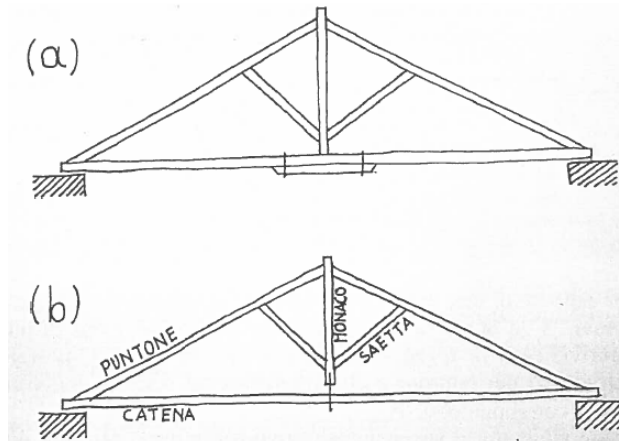


Fig. 2.4: Capriata a catena caricata (a) e a triangolo indeformabile (b) (Munafò, 2002).

I due modelli vedono alla base una filosofia strutturale che può essere riassunta come:

- la capriata con monaco vincolato alla catena (Fig. 2.4 a) è una struttura rigida dove ogni elemento partecipa alla resistenza globale, in modo che se una qualsiasi asta viene meno alla sua funzione, un'altra è in grado di sopperire;
- la capriata con monaco sollevato dalla catena (Fig. 2.4 b) è una struttura per cui le sollecitazioni indotte dalle deformazioni non vanno a creare sollecitazioni di coazione nella struttura stessa.

Secondo P. Munafò (2002), «risulta ragionevole ipotizzare che la sensibilità alle variazioni dimensionali delle specie legnose utilizzate per la costruzione delle capriate lignee ha condizionato le scelte tecnico-costruttive degli architetti del passato».

La concezione strutturale e formale dei due modelli di capriata trae fondamento non solo da esigenze di tipo architettonico, come la necessità di coprire spazi di luci sempre maggiori, ma risentono anche di differenti fattori come quelli legati alle specie legnose disponibili, alla capacità

² Mariano di Jacopo detto il Taccola, ingegnere senese collaboratore di Brunelleschi, propose nel suo "Taccuino" strutture con contraffissi rinforzati da squadre ma sollecitati a trazione per la divaricazione dei puntoni provocata dall'assenza della catena o ancora con l'impiego di elementi lignei curvi per membrature sollecitate a compressione con contraffissi perpendicolari al monaco ed ai puntoni, gravanti sulla catena stessa (Munafò, 2002).

tecnica delle maestranze, a fattori ambientali legati alla cultura ed alla tradizione costruttiva locale. Sulla base dei riferimenti analizzati, è possibile differenziare le tipologie di capriate in relazione alla concezione strutturale e alla tipologia realizzativa, distinguendole come:

- capriata a trave con monaco appoggiato alla catena, il cui schema strutturale richiama quello della trave in semplice appoggio;
- capriata a nodo aperto con monaco staccato dalla catena, il cui schema strutturale è quello di un arco a tre cerniere;
- capriata a nodo chiuso con monaco collegato alla catena, il cui schema strutturale è quello di una trave reticolare.

Nel non più recente, ma comunque importante, documento redatto, Laner (1997) individua altre due tipologie di capriate diffuse in forma minore nel nord-est Italia:

- capriata apparente con catena e monaci poggianti su murature intermedie;
- capriata spaziale composta da più elementi in più direzioni.






TIPI	CAPRIATE	TERRITORIO	DIFFUSIONE (rispetto al totale capriate)	DATAZIONE
a 	Monaco appoggiato	Venezia-Rovigo-Milano-Verona	1% Fienili, Tetteie	1900
b 	Nodo Aperto	Tutto il Nord Italia	90% Abitazioni-chiese-fienili	dal 1850 e in tutti i restauri. Specie quelli "conservativi"
c 	Nodo Chiuso	Verona-Vicenza-Belluno-Venezia	7-8%	Capriate originarie prima del 1850 e casi successivi
d 	Capriata "apparente"	Venezia e ville venete	1% I monaci appoggiano sui muri	1500 [Polladio...]
e 	Capriata spaziale	Pianura Padana	2% Per coperture grandi luci tetti a padiglione	1900 Soprattutto nei fienili

Fig. 2.5: Tavola riassuntiva dei tipi di capriate individuate nel Nord-Est dell'Italia (Laner, 1997).

2.1.2.1 Capriata a trave

Può essere considerato l'archetipo della capriata, a causa dell'immediatezza concettuale, e solo apparentemente appare di facile realizzazione poiché risulta assai instabile. Anche se non genera spinte, la sua intrinseca instabilità non la rende particolarmente adatta alla resistenza

sismica. La catena, dimensionata per il carico concentrato in mezzeria, risulta insufficiente e impone l'uso di saette laterali per diminuire la luce e le deformazioni che la struttura denuncia.

2.1.2.2 Capriata a nodo aperto

È di gran lunga il tipo più diffuso e praticamente l'unico riportato nei manuali tecnici italiani. Le capriate appartenenti a tale tipologia sono caratterizzate dal tipico collegamento monaco-catena. Infatti il monaco è collegato alla catena con staffe metalliche, chiodate al monaco ma non alla catena stessa. Il monaco risulta debolmente teso ed ha essenzialmente il compito, oltre a quello di limitare l'inflessione della catena, di assicurare il collegamento tra i puntoni e la complanarità della struttura, in quanto collega tutte le aste. Questa connessione è classica del Rinascimento ed è quella che appare sulla manualistica ottocentesca.

2.1.2.3 Capriata a nodo chiuso

Questa tipologia si trova quasi esclusivamente in capriate con datazione precedente al 1850, o in zone di forte influenza tedesca ed anglosassone. Si presta ad essere realizzata con la catena doppia, nelle capriate composte da più elementi e nelle capriate complesse. Il monaco è collegato alla catena con un collegamento a cerniera, realizzando nell'insieme della capriata una travatura reticolare vera e propria. Questo tipo di connessione, propria del Medioevo, garantisce una maggiore efficienza, poiché a parità di materiale, resiste a carichi superiori rispetto alla capriata a nodo aperto.

2.1.2.4 Capriata apparente

Tale configurazione strutturale, che a causa dell'introduzione di appoggi intermedi, di fatto nega l'essenza della capriata che per sua definizione appoggia solamente agli estremi, vede un comportamento strutturale quindi rapportabile a quello delle travi continue su più appoggi, anche se formalmente mantiene la configurazione di capriata. Spesso questa tipologia è il risultato di interventi a posteriori, specie quando gli appoggi sono collocati in corrispondenza dei monaci.

2.1.2.5 Capriata spaziale

Come concezione strutturale questo tipo di capriate appartiene ai gruppi a nodo aperto o a nodo chiuso. La particolare attenzione a questa tipologia sottolinea il passaggio ad un'orditura delle strutture nelle tre direzioni dello spazio, ovvero l'intenzione di introdurre dei controventi in direzione ortogonale al piano della capriata stessa.

2.2 Trattatistica storica

2.2.1 Il materiale legno

Il legno è stato uno dei primi materiali utilizzati nel campo delle costruzioni grazie alla sua disponibilità in natura, alle qualità di resistenza, lavorabilità e adattabilità che ne hanno favorito l'uso diffuso per realizzare strutture di vario tipo. Per tale motivo nei trattati di architettura si trovano importanti riferimenti anche per quel che riguarda le modalità costruttive di tali elementi. Non tutti, come segnala l'Alberti, sono stati concordi nel ritenere il legname come primo materiale da costruzione. È anche noto che nelle case di Creta e nel palazzo di Cnosso vi erano travi in legno che, collegando i diversi elementi costruttivi, probabilmente conferivano alle murature una maggiore resistenza alle azioni sismiche.

Nella civiltà greca si è registrato un largo impiego del legno anche nelle abitazioni più semplici, mentre nelle case borghesi le travi principali, disposte nel senso della lunghezza ad intervalli più o meno regolari, erano rinforzate da travi trasversali. È indiscussa, poi, l'importanza dell'impiego del legno — prima del ricorso alle strutture in pietra — nella costruzione di alcune parti dei templi greci: solo da fonti letterarie o rari reperti frammentari si può desumere che le colonne e le coperture venivano realizzate in legno.

Sin dall'antichità, sulla base di valutazioni empiriche, erano ben chiare le proprietà del materiale, che differivano nelle differenti specie arboree: lo stesso Vitruvio, ad esempio, descrive i diversi tipi di legname e ne consiglia l'impiego in funzione delle specifiche caratteristiche. L'Alberti pone grande attenzione ai problemi del taglio degli alberi, dell'essiccazione del materiale e dei rimedi contro i possibili difetti. Citando i consigli degli antichi, egli indica i periodi più favorevoli al taglio e i provvedimenti che possono conferire resistenza agli effetti degli agenti esterni. Il Milizia, nel XIX secolo, tratta con accuratezza il problema dei difetti degli alberi e, tra questi, indica lo stravolgimento o slogamento del legno, e, ancora, il diacciuolo, la spellatura, il doppio alburno, il diacciuolo lardato. Importanti sono i rimedi indicati per la protezione del legno dalle tarlature: tra questi va citata l'operazione di iniezione di sostanze idonee, che trova corrispondenza nello sviluppo delle tecniche moderne: l'intervento era ben noto nel XIX secolo.

È da sottolineare come, nel corso delle varie epoche, in mancanza di principi o teorie, l'intervento di consolidamento delle strutture lignee non sia stato affatto preso in considerazione: si ritrovano, piuttosto, indicazioni sul modo di farle durare più a lungo. Nel *De re aedificatoria*

l'Alberti, ad esempio, suggerisce vari rimedi contro l'invecchiamento del legno e il suo degrado tra i quali la tecnica di cospargerlo di morcia d'olio, per proteggerlo dai tarli, o di pece per difenderlo dall'acqua. Gli aspetti evidenziati nella trattatistica storica non sono molto diversi da quelli che tuttora si devono affrontare per il consolidamento delle strutture in legno: le tecniche possono essere differenti, ma le questioni di maggior rilievo restano quelle della prevenzione dall'attacco degli insetti e della protezione dall'umidità, oltre che dal fuoco (Aveta, 2013).

2.2.2 Le capriate lignee

Il modello di capriata definito a triangolo indeformabile o a nodo aperto trova ampi riferimenti nella trattatistica del periodo storico dal XV al XVII secolo. Nel trattato di Francesco Di Giorgio Martini del 1482, sono presenti alcune tipologie di capriata che dal punto di vista statico possono essere ricondotte al funzionamento a nodo aperto, con osservazioni sulle proporzioni:

«E' da sapere ch'el monaco vuole d'altezza d'ogni quattro braccia o piei uno, e così alla dipendenza del tetto. Questa forma se li dia quando fusse in luoghi molto ventosi o che grande carico a sostenere avesse: dieseli un braccio, e un quarto in altezza e la sua pendenza...»

Di Giorgio Martini propone per la prima volta una soluzione che vede il monaco lavorare a trazione — in virtù del collegamento a tenone e mortasa — segnando così un passaggio dalla capriata a catena caricata a quella con monaco sollevato dalla catena.

Facendo riferimento alle basiliche, l'Alberti è tra i primi trattatisti a citare l'uso delle travi binate per coprire ampie luci, un sistema che si ritrova anche nelle rappresentazioni di Rondelet. Il Pellegrini descrive invece i differenti tipi di capriata in relazione al carico da portare ed alle luci da coprire ma è Giovan Battista da Sangallo che propone per primo una capriata a tre monaci per coprire grandi luci, dotata di fasciature metalliche (Fig. 2.6).

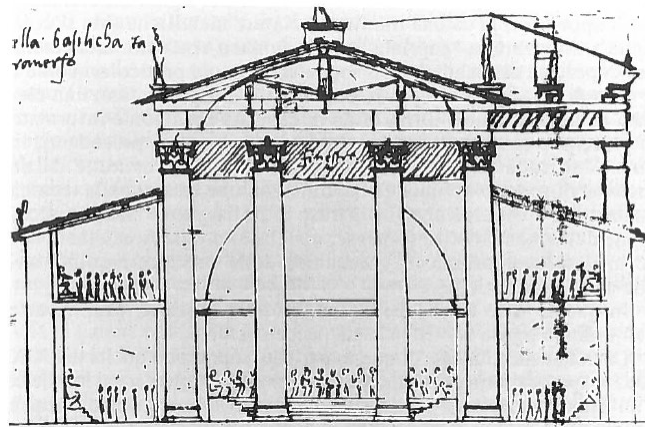


Fig. 2.6: Rappresentazione di G.B. da Sangallo per la Basilica di Fano (Munafò, 2002).

La soluzione pensata dal da Sangallo in occasione del suo progetto per la copertura della Basilica di Fano, prevede i monaci sollevati dalla catena e dotati di regge per sostenere eventuali inflessioni della catena stessa.

Tra il XVIII e XIX secolo, si assiste ad un importante sviluppo delle tecnologie costruttive che cominciano a differenziarsi rispetto al passato e al diffondersi dell'architettura teatrale. Fu proprio il tema della copertura dei teatri a porre gli architetti dinanzi a notevoli problemi tecnici, primo fra tutti, la copertura di grandi luci senza appoggi intermedi, ma anche la necessità di dover sostenere le impalcature scenografiche, oltre che la copertura stessa. È in questo periodo che la capriata a nodo aperto si impone come soluzione prevalente in Italia, come testimoniato dai principali trattati dell'epoca.

Il trattato di Francesco Milizia del 1785 segna il passaggio tra il classicismo e la manualistica pratica e fornisce numerose informazioni sui procedimenti costruttivi, senza distogliere l'attenzione dalla tradizione costruttiva classica (Munafò, 2002).

Il Milizia evidenzia inoltre come la funzione statica delle armature del tetto non prescinde da quella dell'ossatura muraria, precisando a riguardo:

«...abbracciando il tetto ciascuna parte della fabbrica, e premendo col suo peso ugualmente sopra ciascun muro, diviene come un legame di tutta l'opera, che rimane in questa guisa in tutte le sue parti ben concatenata. È dunque il tetto la difesa di tutta la fabbrica [...] la regola generale è, che niuno de' legni spinga contro i muri, ma tutti insieme compongano una macchina, che graviti perpendicolarmente su di essi muri, e spinga il meno che si possa.»

Mette inoltre in relazione l'utilizzo delle specie legnose con alcune aree geografiche, indicando in particolare la preferenza per il larice rispetto al castagno. La preferenza per il larice riprende esattamente lo Scamozzi che critica l'uso del castagno e del rovere a Roma, perché troppo pesanti, e consiglia l'uso del larice come legno ideale (Munafò, 2002).

Tra gli importanti autori italiani che riportano nei loro manuali riferimenti alle capriate va citato Giuseppe Valadier che per la copertura di grandi luci propone anch'egli una capriata a tre monaci e cita l'abete come una specie legnosa di cui si fa poco uso. Ma è Luigi Mazzocchi nel 1871 a distinguere tra capriate semplici, costituite da soli tre elementi, e capriate composte, costituite anche da elementi secondari quali monaco e saette. Per luci superiori ai 5-7 metri viene indicato l'uso di capriate composte, i cui puntoni potevano essere supportati da dei sottopuntoni incastrati alla catena ed assicurati tramite fasciature in ferro in corrispondenza dei nodi (Fig. 2.7).

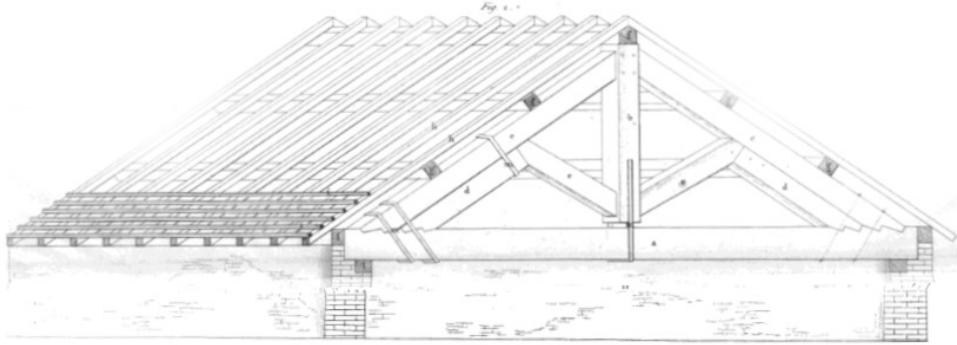


Fig. 2.7: Capriata con monaco, saette e sottopuntoni (Mazzocchi, 1871, Tav. 15, fig. 2).

A sostegno dei puntoni ed allo scopo di liberare lo spazio sottostante, sono presentate soluzioni che, al posto delle saette, preferivano l'uso di una trave parallela alla catena, definita controcatena, inserita a metà o ad un terzo dei puntoni, rinforzati a loro volta dai sottopuntoni (Fig. 2.8).

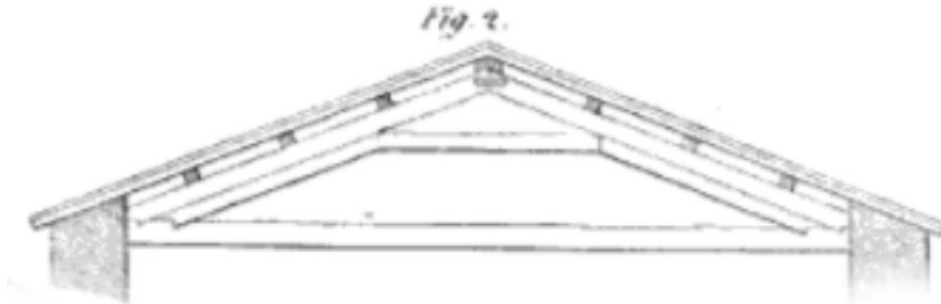


Fig. 2.8: Capriata con controcatena e sottopuntoni (Mazzocchi, 1871, Tav. 16, fig. 2).

Per luci superiori ai 10 metri, il Mazzocchi propone la capriata definita all'italiana o alla palladiana, costituita da una catena, una controcatena un monaco superiore e due monaci laterali. Tale tipologia era usata per coprire ambienti di larghezze anche oltre i 20 metri con ulteriori membrature a supporto dei puntoni.

Si evidenzia come questa tipologia di capriata veda l'interruzione dei puntoni, a favore di una distribuzione degli sforzi interni tra i nodi puntone-catena e puntone-controcatena (Fig. 2.9).

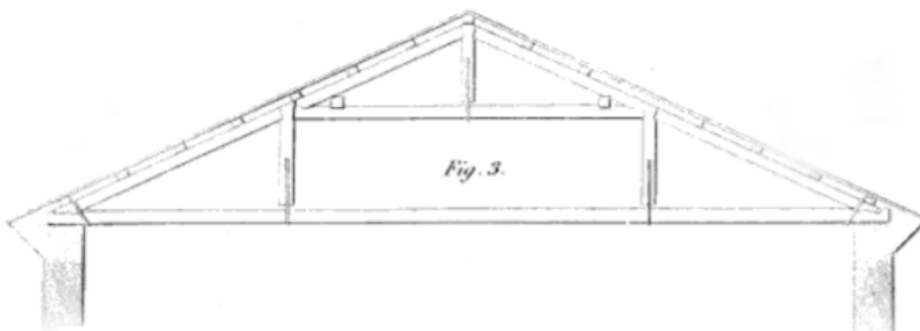


Fig. 2.9: Capriata all'italiana o alla palladiana (Mazzocchi, 1871, Tav. 16, fig. 3).

2.2.3 La capriata alla palladiana

Il termine palladiana, comunemente usato per descrivere una capriata che veda una struttura caratterizzata da catena, puntoni, monaci, controcatena ed eventualmente sottopuntoni, lascia intendere un legame con il celebre architetto ma è, in realtà, relativamente moderno. Il riferimento a Palladio si deve al fatto che egli fece largo uso di tale struttura nei suoi progetti ma è significativo che la stessa sia presente nei suoi rilievi dell'architettura classica. Si deve allora ritenere che fosse messa in relazione con la tradizione costruttiva antica (Valeriani, 2005).

Appare difficile verificare se la palladiana fosse conosciuta già nell'antichità ma un contributo in tal senso è fornito dalle fonti iconografiche, in particolare da quelle del tetto antico di S. Pietro, edificato sotto Costantino e poi demolito. Un altro esempio di copertura ben documentato è quello relativo alla basilica di S. Paolo fuori le mura a Roma, accuratamente rilevato da Rondelet poco prima dell'incendio del 1823, le cui rappresentazioni testimoniano la presenza di capriate lignee riconducibili alla palladiana (Fig. 2.10).

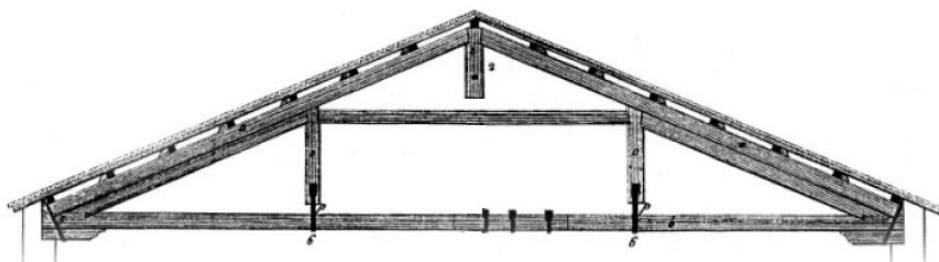


Fig. 2.10: Capriata palladiana presso la basilica di S. Paolo fuori le mura a Roma (Rondelet, 1813).

Come citato, anche Giovan Battista da Sangallo propone nel suo taccuino la combinazione di una palladiana e di una capriata a monaci e saette con nodi aperti, mentre Sebastiano Serlio presenta, oltre alle tipologie descritte, una variazione della palladiana semplice in cui gli elementi verticali sono incastrati e non sono presenti i sottopuntoni, a cui affianca una soluzione che prevede la possibilità di servirsi di strutture appese, che ritiene particolarmente adatte a sopportare grandi carichi grazie a monaci raddoppiati:

«L'armamento qui davanti [...] sarà fortissimo à sostenere ogni gran peso, per virtù di quei ponzoni, li quali pendono all'ingiù, cioè quei dritti segnati, percioche sono fortificati da doppia fortezza. Massimamente quello di mezzo: la gran forza del quale è dal trave in giù per le due remme che contrastano co'l gran trave trasversale dall'uno, all'altro muro.»

L'accento posto sull'interazione tra elementi verticali e diagonali è da considerarsi d'avanguardia per il suo tempo ed è da mettere in relazione con gli scritti pubblicati da Palladio, relativi ai suoi celebri progetti per la costruzione di ponti ma anche i meno citati progetti di nuovi tetti (Valeriani,

2005). Della capriata palladiana, oltre alla tipologia costruttiva, restano ben evidenti le testimonianze realizzate nelle Ville del celebre architetto (Fig. 2.11).

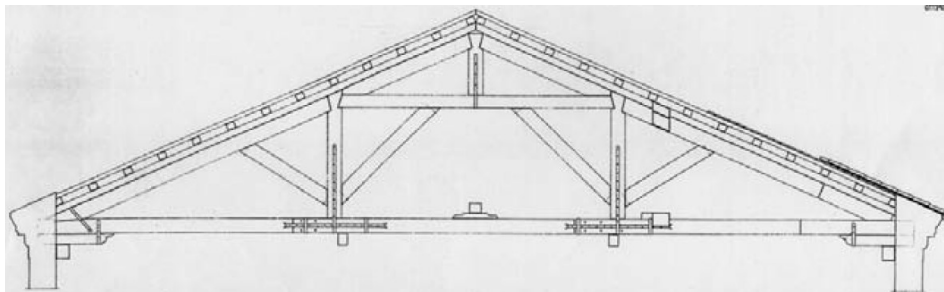


Fig. 2.11: Rilievo e rappresentazione di una capriata palladiana composta (Archivio Palladio Museum).

Ciò che si vuole mettere in evidenza è come tale tipologia di capriata composta sia analoga a quelle rinvenute nella copertura del caso-studio in esame, a conferma di come l'analisi del costruito storico non possa tralasciare le conoscenze del passato e lo studio delle tecniche costruttive pervenuteci tramite i trattatisti e gli storici.

2.3 Le connessioni di carpenteria

La realizzazione dei nodi³ delle capriate, così come in generale delle giunzioni in legno, è stata fortemente condizionata dalla capacità tecnica delle maestranze e quindi dall'efficacia degli strumenti adoperati per le lavorazioni nelle differenti aree geografiche ed epoche storiche (Munafò, 2002).

Il progresso tecnologico avviato nel XVIII secolo ha permesso la realizzazione di nodi più perfetti nella loro esecuzione che hanno visto nel tempo l'introduzione di fasciature metalliche ai fini del miglioramento delle giunzioni delle capriate stesse. La lavorazione delle superfici, intagliate e lavorate al fine di consentire una collaborazione più efficace degli elementi connessi, nel passato avveniva con strumenti ad ascia, oggi con procedure più moderne ed industrializzate di fresatura eseguita da macchine a controllo numerico.

Le capriate sono le tipologie strutturali lignee in cui l'uso dei nodi di carpenteria si trova nelle soluzioni più tipiche per il collegamento dei loro elementi, come ad esempio i nodi puntone-catena o monaco-saette. Anche per tali soluzioni il ricorso all'analisi della trattatistica del XIX

³ Con i termini nodo di carpenteria o connessione tradizionale si indicano solitamente le connessioni per il collegamento delle membrature lignee, caratterizzate dalla trasmissione degli sforzi per contatto delle superfici. (cfr. Piazza e Tomasi, 2004).

secolo è risultato un approccio utile ai fini del caso-studio ed ha messo in evidenza come nel corso degli anni vi sia stato il tentativo di unificare le tecniche di realizzazione delle giunzioni lignee, svincolandole dalla tradizione locale, come dimostrato dalle unioni rappresentate dal Mazzocchi nel suo trattato (Fig. 2.12), soluzioni riconducibili alle principali connessioni ancora oggi adottate e rilevate anche nelle capriate del corpo centrale di Villa Pisani.

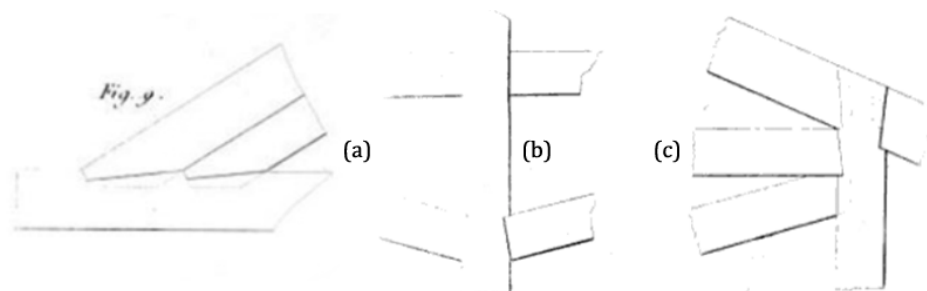


Fig. 2.12: Nodi di una capriata palladiana composta (Mazzocchi, 1871, Tav. 16, fig. 9).

Nelle capriate i giunti interni fra le varie aste sono collegamenti definiti come monolateri ‘a gravità’, ossia funzionanti quando la struttura è sollecitata da forze di tipo gravitazionale. In presenza di inversioni delle forze medesime — ossia durante l’azione sismica o più frequentemente sotto l’azione del vento — i soli giunti non sono necessari a resistere agli sforzi di sollecitazione e necessitano di elementi metallici aggiuntivi (Ceccotti et al., 2005).

Le attuali Norme Tecniche, raccomandano la verifica delle connessioni nelle strutture lignee ed invitano, ove possibile, all’adeguamento sismico delle strutture esistenti tramite l’introduzione di sistemi di ancoraggio e rinforzo (Fig. 2.13), tema di studio e ricerca anche nella letteratura scientifica (Parisi e Piazza, 2000;2002).

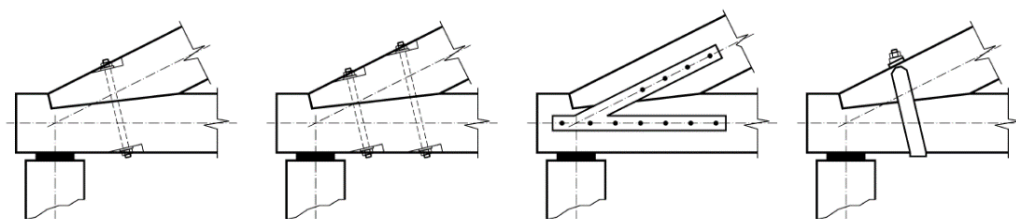


Fig. 2.13: Soluzioni di rinforzo del nodo catena-puntone con elementi metallici (Parisi, Piazza, 2000).

È possibile fare una classificazione in funzione delle caratteristiche statiche, in particolare della capacità da parte delle connessioni di trasmettere sollecitazioni di compressione, trazione, taglio, flessione. I classici trattati di costruzioni in legno riportano un’estesa casistica delle varie conformazioni di questi collegamenti tradizionali, dei quali, ancora oggi, alcuni manuali tecnici presentano soluzioni e configurazioni per la loro realizzazione a regola d’arte (Fig. 2.14).

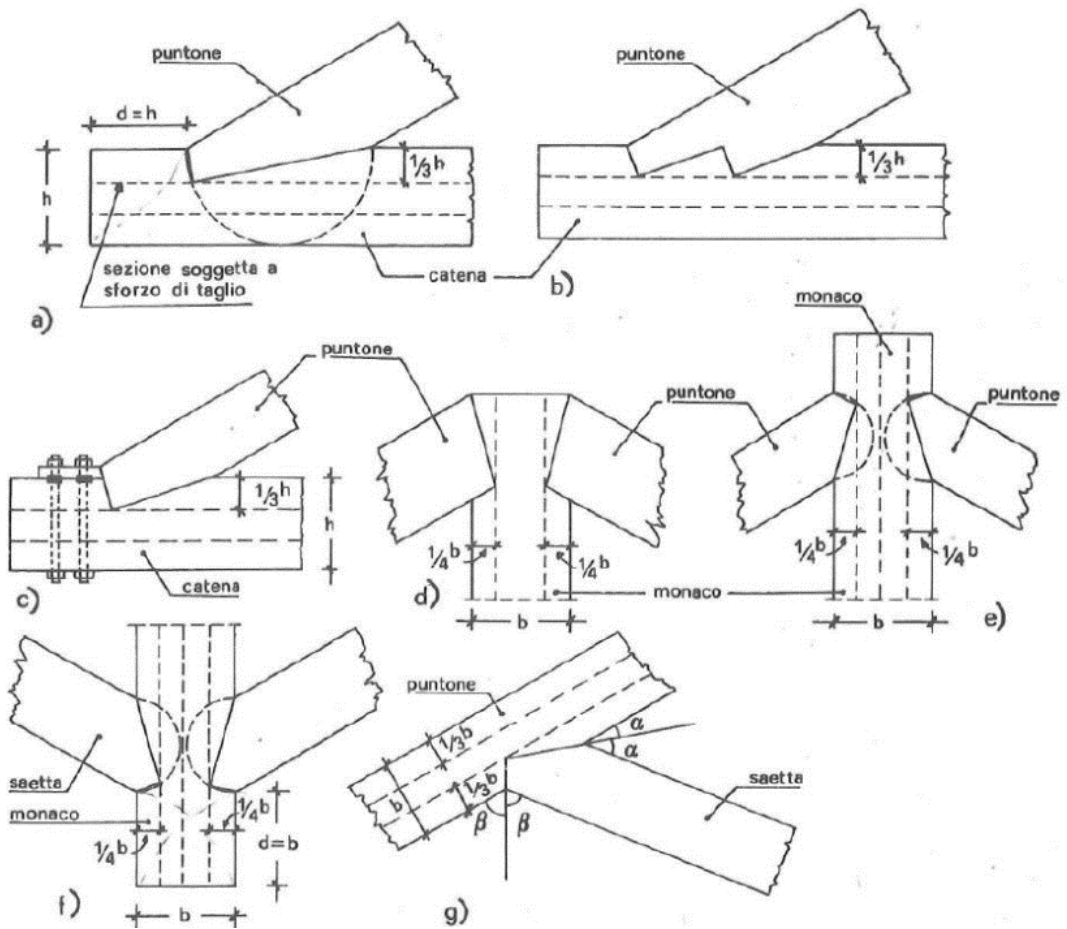


Fig. 2.14: Principali giunzioni lignee di una capriata e relative indicazioni di realizzazione (Caleca, 1994).

Le calettature dei singoli pezzi vanno eseguite con cura in modo da assicurare la resistenza a taglio del materiale — ovvero senza indebolire eccessivamente la sezione resistente — in genere la distanza dalla testa è pari all'altezza dell'elemento e presenta una profondità non maggiore di $1/4$ o $1/3$ della stessa.

La vulnerabilità di una capriata può derivare dalla tipologia, dai dettagli e dalle condizioni dei suoi giunti di carpenteria. Gli aspetti da esaminare possono essere riassunti in due punti:

- la capacità di mantenere la connessione in condizioni cicliche, con possibile diminuzione di compressione;
- il comportamento post-elastico previsto, con l'obiettivo di risolvere possibili rotture fragili.

2.3.1 Meccanismi resistenti e verifiche

Le verifiche di resistenza di queste tipologie di collegamenti sono governate dalle sollecitazioni di compressione trasmesse da un elemento ligneo all'altro attraverso le superfici di contatto. L'azione assiale che interessa un elemento convergente in un nodo viene trasmessa attraverso una sezione che, nella maggior parte dei casi, è inferiore alla sezione retta dell'elemento, a cui va aggiunta la non ortogonalità della superficie di interfaccia nella direzione della fibratura di uno o entrambi gli elementi convergenti nel nodo stesso (Piazza et al., 2005).

Appare quindi di notevole importanza l'ispezione della connessione ed il rilievo della sua geometria al fine di verificarne la sede di alloggiamento d'estremità. Relativamente alle capriate lignee, tra tutti i collegamenti, è da attenzionare maggiormente quello relativo al nodo puntone-catena che può presentare le maggiori problematiche ed insidie. Nella soluzione a dente semplice (Fig. 2.15) possono verificarsi, ad esempio: lo scalzamento del tallone (a), la compressione della superficie frontale del dente (b), la compressione della superficie posteriore del dente (c) o la trazione eccentrica sulla sezione ridotta di catena (d). È inoltre frequente il verificarsi della combinazione tra gli effetti meccanici descritti ed altri effetti legati al comportamento igroscopico.

Al fine di garantire la resistenza allo schiacciamento delle fibre, occorre verificare le sollecitazioni di compressione, prestando attenzione alla direzione della sollecitazione rispetto a quella della fibratura. In generale, quando è presente una sollecitazione di compressione inclinata rispetto alla direzione delle fibre, occorre tenere conto del decremento di resistenza (Piazza et al., 2005).

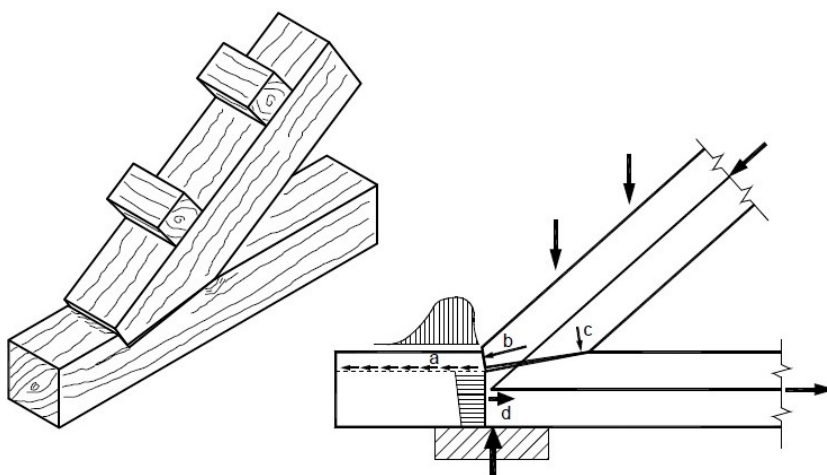


Fig. 2.15: Comportamento di un giunto puntone-catena di una capriata lignea (Piazza et al., 2005).

2.3.2 Principali collegamenti tradizionali

Le tipologie più comuni di collegamenti di carpenteria, realizzate tramite l'intaglio delle superfici di contatto attraverso cui vengono trasmesse le forze, sono (Fig. 2.16):

- collegamento a dente semplice;
- collegamento a dente arretrato;
- collegamento a dente doppio.

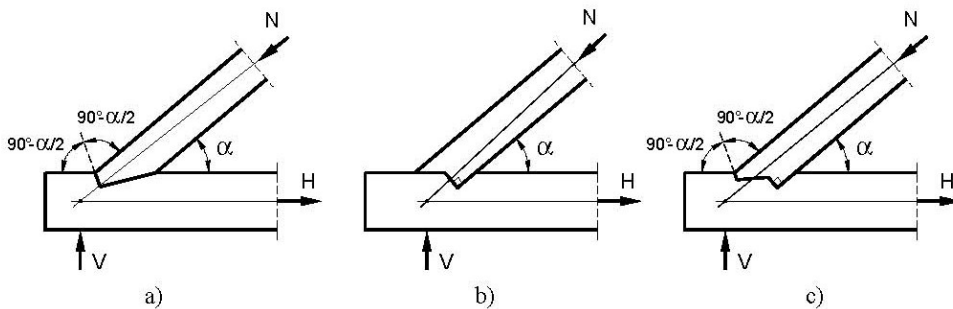


Fig. 2.16: Principali tipologie di collegamenti tradizionali puntone-catena: a) a dente semplice, b) a dente arretrato, c) a dente doppio (Piazza et al., 2005).

Le soluzioni presentate per il nodo puntone-catena sono realizzate anche per i nodi interni delle capriate, quali puntone-monaco o monaco-saette ad esempio.

Nelle connessioni a dente semplice (Fig. 2.16 a) viene assegnata un'inclinazione della superficie intagliata anteriore tale da rendere minimo, sia per il puntone che per la catena o altro elemento tirante, l'angolo di inclinazione tra la forza e la direzione della fibratura, andando così ad aumentare la resistenza complessiva dell'unione allo schiacciamento. Da semplici considerazioni geometriche è possibile affermare che la configurazione ideale è quella che vede l'angolo del dente individuare la bisettrice dell'angolo $\pi - \alpha$. La geometria dell'intaglio della connessione a dente arretrato (Fig. 2.16 b) è realizzata in modo tale da aumentare la superficie resistente a taglio della catena, poiché consente di ottenere una maggiore lunghezza del tallone in corrispondenza della testa dell'elemento. In tale unione, solitamente sia ha un'inclinazione perpendicolare alla direzione del puntone da parte dello stesso dente arretrato, con la conseguenza di una verifica a compressione più gravosa. Una possibile alternativa alle tipologie descritte è una loro combinazione, sviluppatasi in tempi più recenti rispetto alla trattatistica storica e definita come connessione a dente doppio (Fig. 2.16 c). Quest'ultimo tipo di unione ha il vantaggio di aumentare sia la lunghezza del tallone che il rapporto tra la superficie portante e la profondità dell'intaglio, incrementando l'efficienza del giunto nei riguardi della resistenza a taglio

e della resistenza a compressione. La sua realizzazione richiede grande precisione di lavorazione al fine di garantire il contatto delle due superfici attraverso cui si trasmettono le componenti dello sforzo assiale agente sul puntone.

La necessità di coprire grandi luci, oltre a contribuire all'introduzione di soluzioni innovative in termini di tipologie di capriate, ha portato alla realizzazione di travature composte che hanno interessato in particolare le catene delle stesse capriate lignee. Già nel periodo rinascimentale le modalità realizzative delle travi composte erano ben definite e anch'esse riportate nella trattatistica, le cui rappresentazioni mostrano l'inserimento di elementi di legno duro tra le riseghe o di elementi metallici con lo scopo di evitare il contatto diretto dei legni nei punti di maggior sollecitazione. Le fasciature metalliche avevano inoltre lo scopo di migliorare l'unione tra i diversi pezzi di legno della trave composta ed il loro uso divenne sempre più frequente nel XVIII secolo grazie alla disponibilità a buon mercato del metallo.

Tra le giunzioni delle travature composte si ritiene doveroso citare quella a 'dardo di Giove' (Fig. 2.17) di sovente utilizzo già in epoca romana e di interesse per le catene delle capriate palladiane composte. Tale tipo di collegamento è poco efficace per le sollecitazioni di trazione, risultando più idoneo a sopportare quelle di flessione (Munafò, 2002).

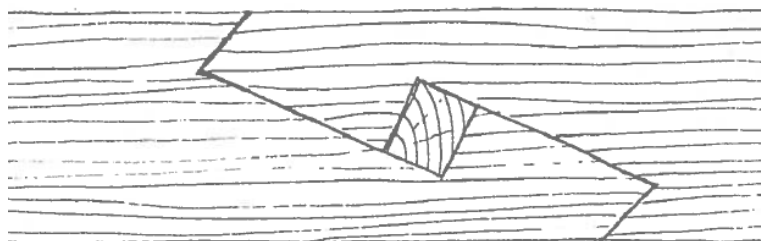


Fig. 2.17: Collegamento a 'dardo di Giove' per travature composte (Munafò, 2002).

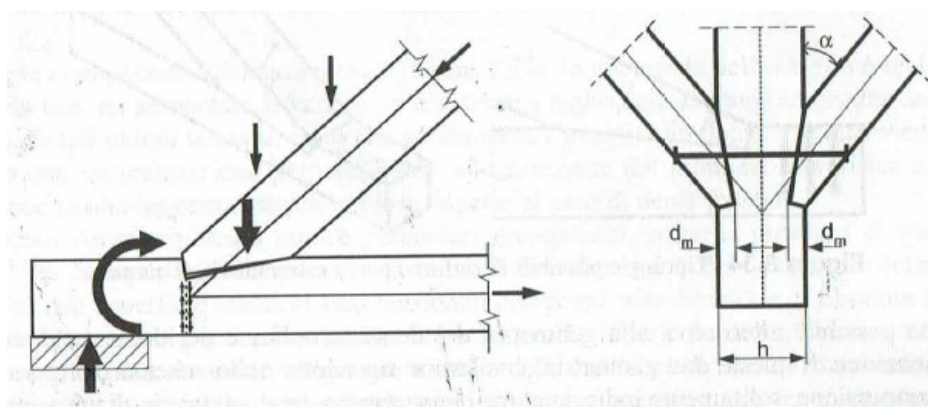


Fig. 2.18: Comportamento dei nodi di carpenteria di una capriata (Piazza et al., 2005).

2.3.3 Comportamento ed efficienza del collegamento

Si è già evidenziato come la conformazione di un nodo di carpenteria comporti la lavorazione in almeno uno degli elementi collegati, tale da richiedere una verifica di dettaglio per la connessione. In una capriata, ad esempio, per il nodo puntone-catena si deve eseguire per la catena la verifica a taglio e tensoflessione nella sezione indebolita e per il monaco la verifica a trazione nella sezione ridotta dagli intagli (Fig. 2.18).

Esiste un'ulteriore problematica legata al comportamento dell'elemento connesso ai nodi, la cui conformazione può risultare determinante per la definizione del tipo di sollecitazione cui l'elemento stesso è sottoposto. La saetta di una capriata, ad esempio, appare in prima approssimazione come un elemento semplicemente compresso ma in realtà è da verificarsi in regime di presso-flessione (Piazza et al., 2005).

È ancora una volta bene sottolineare come il comportamento di un nodo di carpenteria — in particolare di strutture tradizionali come le capriate lignee — abbia un'influenza determinante sul comportamento della struttura nel suo complesso. Molto spesso tale influenza può essere trascurata per poter condurre in modo agevole determinate verifiche statiche, senza commettere errori grossolani. Vi sono tuttavia situazioni nelle quali è essenziale, invece, considerare gli specifici comportamenti legati ai nodi di collegamento. In letteratura (Branco et al., 2010;2011) sono presenti studi relativi ai nodi di carpenteria, in particolare su come tali giunzioni siano in grado di esibire capacità dissipative non trascurabili per carichi ripetuti se opportunamente presidiati da elementi metallici. Viene inoltre messo in evidenza come il comportamento debba essere implementato in modo opportuno nei modelli di calcolo delle strutture⁴, al fine di considerare un comportamento semi-rigido del nodo stesso.

In generale, l'efficienza statica di un collegamento può essere espressa tramite il rapporto tra la resistenza del collegamento e la resistenza dell'elemento in cui tale collegamento risulta inserito. Si evidenzia come il funzionamento e lo stato di conservazione delle connessioni di carpenteria siano di fondamentale importanza per le capriate lignee, in particolare per quelle relative al costruito storico esistente. Eventuali degradazioni o comportamenti errati possono far scaturire anomalie strutturali, il cui culmine può coincidere con il collasso della struttura (Fig. 2.19).

⁴ Come si vedrà nel Capitolo 5, la modellazione delle staffe di collegamento per i nodi puntone-catena delle capriate oggetto di studio si rivelerà determinante e fondamentale per la calibrazione del modello agli elementi finiti ai fini dell'analisi statica lineare. A riguardo si veda il § 5.3.1.3 – Modellazione delle staffe di collegamento.

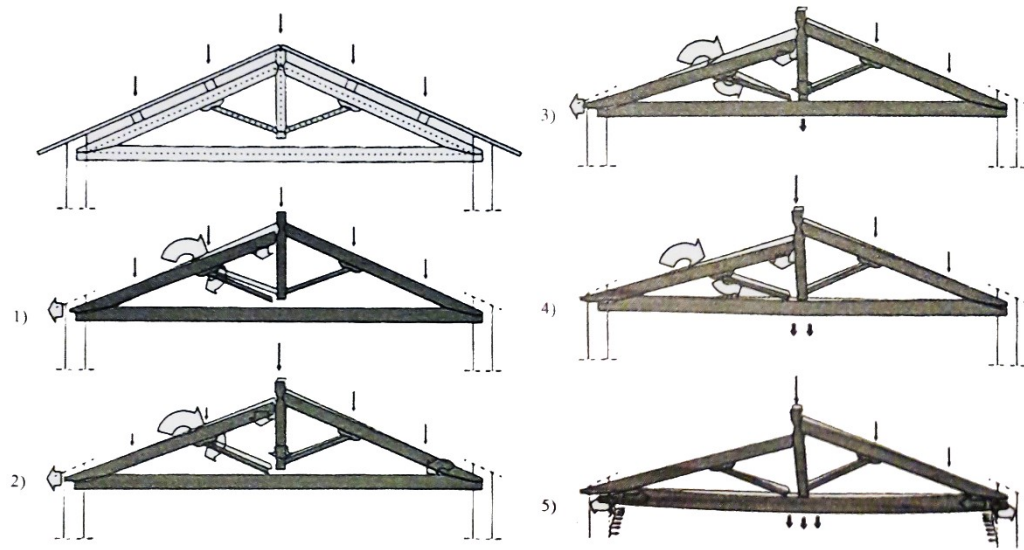


Fig. 2.19: Meccanismo di collasso di una capriata innescata dalla rottura del nodo puntone-catena. Tratto da G. Tampone, *Atlante dei dissesti delle strutture lignee* (Tampone, 2001).

3. LO STUDIO DELLE STRUTTURE LIGNEE

Sono presentate e descritte in questo capitolo le metodologie di studio e analisi delle strutture lignee secondo le normative vigenti e le indicazioni reperite dalla letteratura e dalla bibliografia. Oltre alla mera descrizione delle fasi di rilievo si intende evidenziare quale debba essere il processo conoscitivo da attuarsi per le strutture appartenenti agli edifici esistenti.

3.1 Caratteri generali

La conoscenza generale delle strutture in legno si acquisisce tramite un'analisi metodologica da svolgersi per gradi, facendo capo a diversi fattori, propri del restauro e delle teorie del recupero. L'anamnesi del complesso strutturale, basata sull'analisi storica, è la prima fase da eseguire, cui fa seguito lo studio sulla composizione in termini di geometria e configurazione; successive sono la determinazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'oggetto di studio, condotta mediante indagini diagnostiche in opera e la rilevazione delle manifestazioni che le strutture stesse presentano, quali il comportamento in opera, il degrado meccanico, il degrado biotico. A partire dalle informazioni acquisite è definibile la classificazione strutturale degli elementi in opera, base per la modellazione e la successiva fase di analisi⁵.

3.1.1 L'oggetto e le finalità dello studio

Lo studio e la rilevazione si compiono documentando ed interpretando i caratteri generali del complesso strutturale, unitamente ai caratteri particolari delle sue parti, precisando che la suddivisione si rifà all'approccio conoscitivo ed alla metodologia di studio. A tali operazioni si integrano le condizioni ambientali ed i sistemi di forze esterne (Fig. 3.1).

I caratteri generali comprendono la posizione, in termini geometrici, del sistema oggetto di studio rispetto agli altri sistemi strutturali, la configurazione del complesso, l'organizzazione gerarchica, la forma e le dimensioni generali degli elementi, le connessioni; inoltre le alterazioni

⁵ Si veda il § 5. Analisi e Modellazione Numerica

di configurazione occorse nel tempo, i dissesti, gli interventi di restauro e la loro sequenza temporale. Ai caratteri generali si affiancano i seguenti caratteri legati alle anomalie morfologiche, alle irregolarità costruttive, alle differenze materiche e di lavorazione dei legnami nonché la loro difettosità, alle degradazioni strutturali delle unità e delle loro membrature, alla posizione della degradazione per cause biotiche. Sono da studiarsi inoltre le condizioni esterne quali quelle climatiche, in particolare il regime igrometrico ed i carichi esterni (Tampono, 2005).

Lo studio è finalizzato alla progettazione del restauro e dei successivi controlli di monitoraggio alla cui base vi sono le competenze, l'attenzione e la precisione del tecnico rilevatore, guidate dalla sua sensibilità e passione, oltre che dalla sua esperienza.

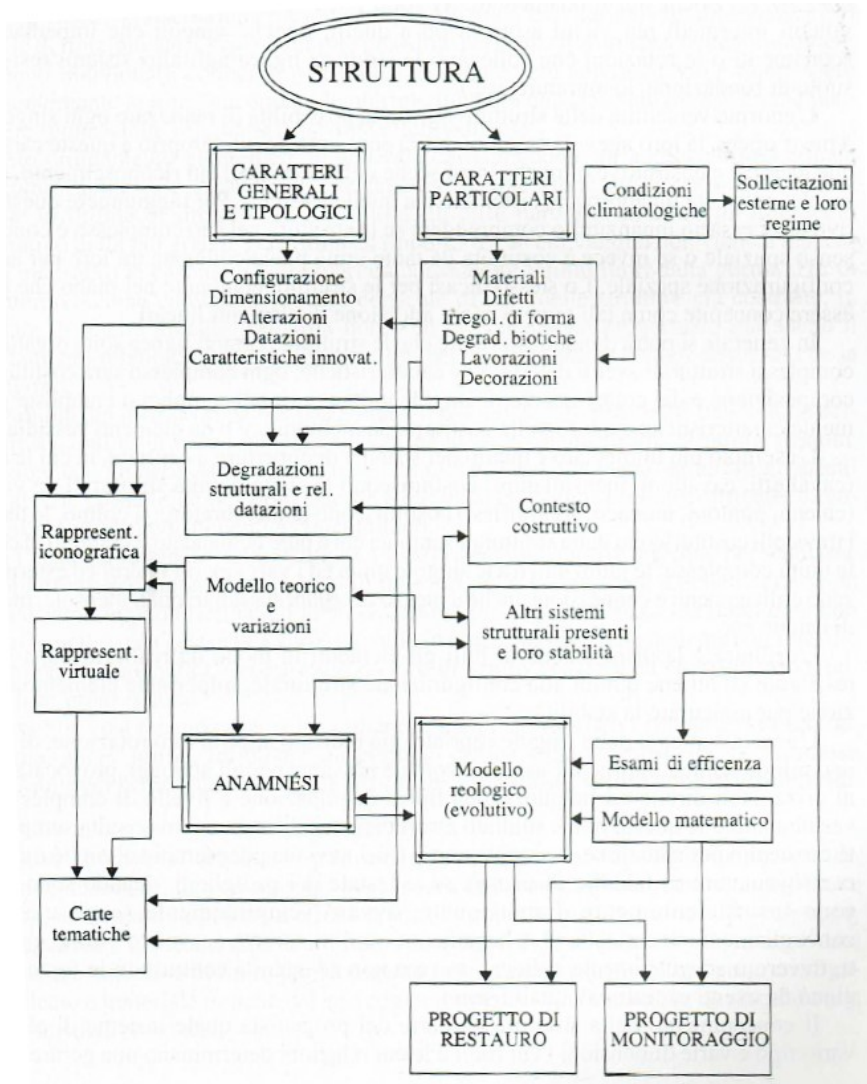


Fig. 3.1: Grafico concettuale dello studio da eseguirsi sulle strutture lignee esistenti (Tampono, 1991).

3.1.2 La concezione strutturale e l'ordinamento gerarchico

Le strutture lignee aventi funzioni di ossatura portante dei fabbricati o, più in generale, quelle con funzioni di orizzontamento come solai e coperture, presentano analogie con le moderne strutture intelaiate di calcestruzzo o acciaio. L'enorme versatilità delle strutture lignee necessita in prima fase la necessità di comprensione delle stesse nel loro complesso: è da intendersi se la concezione sia di tipo spaziale o se costituita da unità piane collegate tra loro con finalità di configurazione spaziale. Dicasi analogamente per le strutture contenute nel piano che possano essere concepite come tali ovvero come somma di elementi lineari.

In generale si può affermare che le strutture portanti lignee siano organizzate in complessi strutturali con determinate caratteristiche, costituiti dalla composizione e dal collegamento di singole unità strutturali semplici o composte, a loro volta costituite da membrature ed elementi ausiliari. L'esempio più immediato è quello di un sistema di copertura a capriate (Fig. 3.2), in cui tali elementi costituiscono le singole unità strutturali, mentre le varie aste identificano le membrature; le travi e i travicelli compongono le unità strutturali semplici cui è demandato il compito di collegare le unità complesse; le giunzioni tra le singole unità ed i vari vincoli interni ed esterni realizzano collegamenti e connessioni anche a mezzo di organi ausiliari, quali ad esempio mensole o dormienti. (Tamponi, 2005).

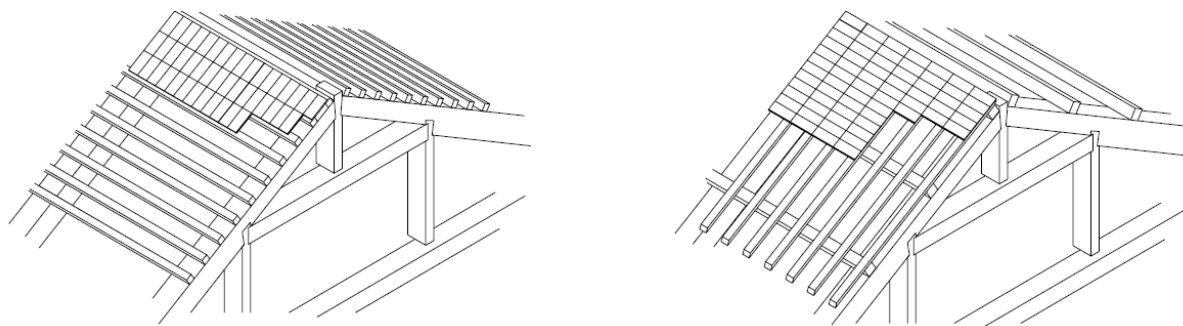


Fig. 3.2: Concezione strutturale di sistemi di copertura a capriate: struttura a due e tre ordini portanti (Macchioni et al., 2004).

La definizione dell'ordinamento gerarchico ha come finalità il concepimento della struttura oggetto di studio come insieme di elementi di vario tipo e dimensioni, i cui ruoli e le cui relazioni determinano la comprensione e l'approccio progettuale da parte del tecnico progettista chiamato a formulare un giudizio critico in termini di diagnosi e valutazione di affidabilità. Accanto alla fase di studio sulla composizione strutturale è necessario eseguire un'operazione di anamnesi dello stesso complesso con la finalità di acquisire una serie di informazioni in grado di restituire la storia regressa della struttura secondo un'analisi storico-critica dell'opera stessa.

In tale fase è necessario ricercare elementi utili e relativi alla datazione di realizzazione, alla documentazione di progetto, alle destinazioni d'uso, alle degradazioni occorse, alle alterazioni apportate rispetto alla configurazione originaria ed agli eventuali interventi di consolidamento. A tali informazioni si affiancano quelle relative ai metodi costruttivi ed alle tecniche in uso all'epoca della costruzione, operazioni fondamentali per individuare la provenienza dei materiali lignei, il loro grado di eterogeneità e gli assortimenti in termini di dimensione, qualità e lavorazione. In generale, tramite la ricerca storica, ci si pone la finalità di individuare la cronologia assoluta e relativa delle fasi dell'edificio e, più in dettaglio, delle unità strutturali che lo compongono.

3.1.3 L'ispezione in sito e le prove di indagine

Il processo conoscitivo di un complesso strutturale ligneo si esplica mediante l'esecuzione di un'indagine diagnostica da eseguirsi nelle seguenti fasi logiche:

- pianificazione dell'ispezione;
- esecuzione dell'ispezione (visiva e strumentale);
- restituzione dei risultati.

È immediato notare l'esistenza di un'interazione tra le fasi, da compiersi secondo le linee guida fornite dai riferimenti normativi facenti capo alla norma UNI 11119:2004 ed alla più recente norma UNI 17121:2019, aventi come oggetto di indagine e valutazione le strutture portanti in legno degli edifici storici. Entrambi i documenti indicano i criteri da adottarsi per la valutazione *in situ*, stabilendo obiettivi, procedure e requisiti per la diagnosi dello stato di conservazione e la stima della resistenza e della rigidità di elementi lignei in opera, con lo scopo di supportare il processo decisionale in merito alle misure da attuarsi e di garantire che il rilevamento e la valutazione delle condizioni forniscano i dati necessari per l'analisi storica, la valutazione della sicurezza strutturale e la pianificazione delle opere di intervento.

Affinchè l'ispezione possa essere eseguita, è necessario il soddisfacimento di due condizioni preliminari legate all'accessibilità della struttura e alla visibilità delle sue superfici. La struttura dovrebbe infatti essere raggiungibile in ogni sua parte, così come le superfici degli elementi dovrebbero essere ripulite da polveri, detriti, depositi organici e sufficientemente illuminate. Il mancato o parziale soddisfacimento di tali requisiti può impedire l'ispezione o limitare la qualità e la quantità delle informazioni da essa ottenibili. Ne consegue la necessità di eseguire una vera e propria pianificazione, preliminare all'ispezione stessa, definendo apprestamenti ed eventuali interventi specifici al fine di garantire il miglior compromesso tra

condizioni di lavoro, modalità di ispezione e sicurezza per operatori e i tecnici. Tra le operazioni da valutarsi si possono rendere necessari l'allestimento di ponteggi fissi e di passerelle, la rimozione di controsoffitti, pavimentazioni o manti di copertura, l'asportazione di polveri, detriti, rivestimenti o pitture, l'illuminazione artificiale degli ambienti di lavoro. L'equipaggiamento (Fig. 3.3) per un'ispezione visiva prevede: una torcia, una cordella metrica, accessori per l'annotazione e il disegno, un succhiello, un martello in gomma, uno scalpello e strumenti per la pulizia degli elementi lignei.



Fig. 3.3: Strumentazione necessaria all'ispezione *in situ* (Pozza, 2018).

Attraverso l'ispezione *in situ* è definibile lo stato di conservazione in opera delle strutture lignee portanti di edifici compresi nell'ambito dei Beni Culturali tramite l'ottenimento delle seguenti informazioni relative a ciascun elemento ligneo:

- specie legnosa;
- umidità del legno ed eventuali gradienti di umidità;
- classe di rischio biologico per il legno⁶;
- geometria e morfologia dell'elemento ligneo;
- posizione, forma e dimensione delle zone critiche;
- classificazione secondo la resistenza dell'elemento nel suo complesso.

⁶ La valutazione della classe di rischio biologico per il legno avviene secondo le disposizioni della norma UNI EN 335:2013 da applicarsi al legno massiccio e ai prodotti a base di legno. La norma definisce cinque classi di utilizzo che rappresentano le diverse situazioni di servizio alle quali possono essere esposti il legno e i prodotti a base di legno. La norma inoltre indica gli agenti biologici pertinenti ad ogni situazione.

L'identificazione della specie legnosa deve essere condotta per mezzo di procedure specifiche a livello macroscopico o microscopico: nel primo caso l'operazione è condotta da tecnici esperti che con la sola ispezione visiva ad occhio nudo riescano ad identificare la specie, mentre nel secondo caso si fa ricorso all'analisi strumentale di laboratorio di reperti o campioni prelevati dal manufatto in esame. Tra le principali specie legnose maggiormente ricorrenti nelle strutture lignee antiche vi sono l'abete rosso, il larice, il pino ed il cipresso per quanto concerne la famiglia delle conifere, mentre troviamo il pioppo, il castagno, la quercia e l'olmo relativamente alla famiglia delle latifoglie.

La rilevazione dell'umidità del legno consente di determinare il contenuto di umidità all'interno dell'elemento indagato, dato di fondamentale importanza in quanto le proprietà meccaniche, come è noto, risentono di tale effetto⁷; inoltre un alto tasso di umidità porta ad aumentare il rischio di biodegradamento sotto la forma di attacchi di insetti o di funghi. La determinazione di tale parametro avviene per mezzo di dispositivi quali ad esempio l'igrometro elettrico a resistenza, uno strumento digitale che dispone di un puntale con due contatti metallici, distanziati tra di loro di circa 2 centimetri (Riggio et al., 2013).

Ai fini della classificazione degli elementi lignei, oltre al rilievo della geometria è necessario procedere alla determinazione delle caratteristiche che concorrono alla riduzione della resistenza meccanica, quali smussi, nodi, inclinazione della fibratura e difetti di natura biologica o meccanica. Alle indagini di I livello è opportuno, e talvolta necessario, affiancare indagini di II livello di tipo strumentale non distruttivo, attraverso cui valutare la presenza e l'estensione dei danni che causano una riduzione della sezione resistente degli elementi. L'esame visivo non è sempre in grado infatti di fornire informazioni sull'entità del danno e sull'effettivo stato del legno al suo interno. Da tali considerazioni deriva la necessità di ricorrere a tecniche che fanno uso di strumenti e apparecchiature poco distruttive e in grado di fornire dati oggettivi, ottenibili da misurazioni dirette.

3.1.3.1 Prova penetrometrica con resistografo

Tale tipologia di prova rientra nella categoria delle prove strumentali debolmente distruttive e vede l'utilizzo di un trapano resistografico (Fig. 3.4) — comunemente indicato anche

⁷ Si veda il § 1.1.5. Proprietà meccaniche, in particolare la Fig. 1.5.

con il termine inglese *resistograph* — in grado di misurare la resistenza che una microsonda incontra nell'atto di penetrazione del materiale ligneo indagato, permettendo di individuare zone degradate, cavità o nodi altrimenti non visibili tramite la sola indagine visiva (Tannert et al., 2013).



Fig. 3.4: Trapano resistografico IML RESI PD 400 (Fonte: iml-service.com).

Le finalità di questa indagine sono:

- ricavare una prima stima delle condizioni del materiale;
- localizzare eventuali forme di degrado presenti;
- determinare la sezione ove non possibile direttamente;
- identificare la sezione resistente residua;
- individuare l'andamento delle sequenze anulari;
- valutare lo stato dei giunti.

La resistenza del materiale viene indagata tramite la misura dell'energia impiegata dallo strumento per consentire l'avanzamento di una sottile punta di acciaio del diametro di 1,5 millimetri, con velocità e rotazione costanti. La resistenza alla perforazione è concentrata sulla punta dell'ago, la quale presenta uno spessore doppio rispetto allo stelo; la regolazione elettronica del motore garantisce di operare con una velocità costante, adattata in funzione delle caratteristiche specifiche di densità del legno in esame.

L'esito della prova restituisce dei grafici denominati profili densimetrici, ove in ordinata ed ascissa sono riportate rispettivamente la resistenza e la profondità di penetrazione (Fig. 3.5). Al fine di poter interpretare i risultati è necessario che l'operatore annoti il punto di esecuzione della prova e l'inclinazione dello strumento rispetto alla faccia su cui la stessa è stata eseguita. Le curve di resistenza ottenute dalle prove resistografiche, pur non fornendo direttamente una misura delle caratteristiche meccaniche del materiale, permettono di ottenere informazioni sullo stato del legno e soprattutto sulle sue condizioni di uniformità e possono consentire di individuare il rapporto tra il profilo totale di penetrazione (P_t) ed il profilo resistente stimato (P_r).

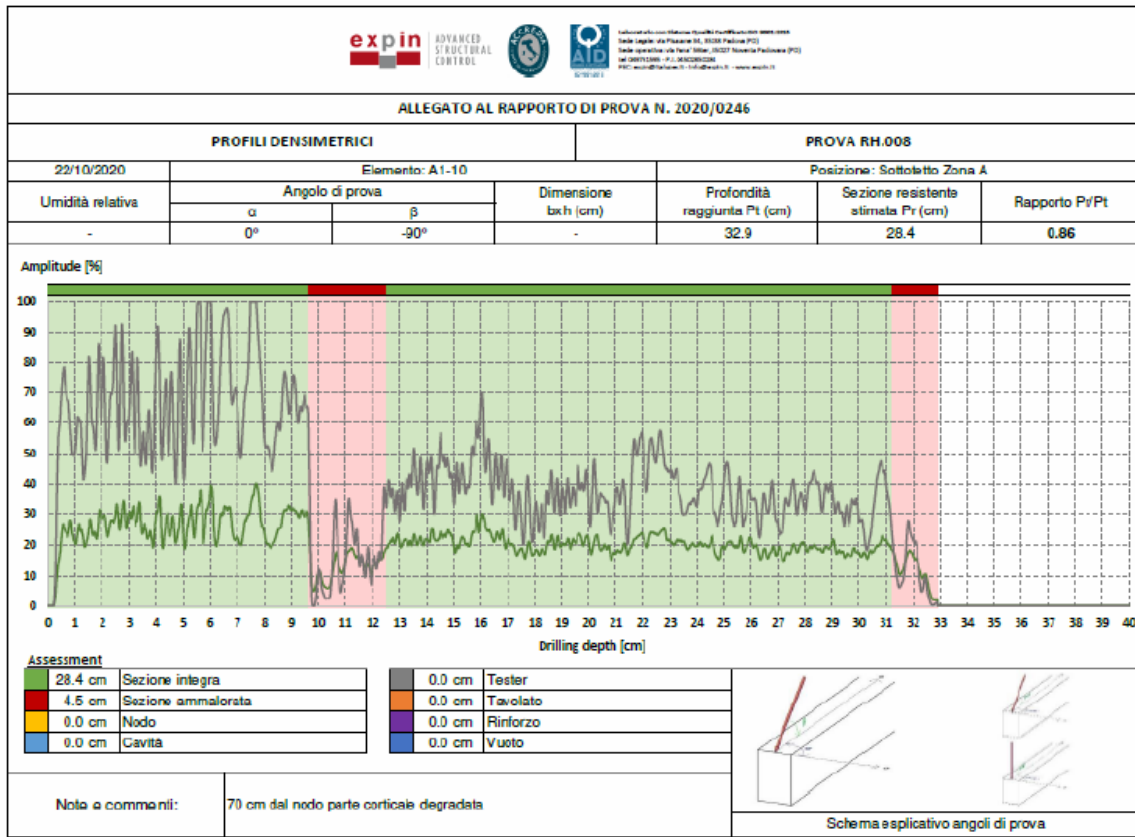


Fig. 3.5: Elaborazione esito prova resistografica (Expin Srl, 2020).

L'altezza media della curva si abbassa in presenza di perdita di consistenza dovuta ad esempio a degrado, mentre la differenza di densità tra legno primaticcio e tardivo risulta minore rispetto al legno sano; inoltre, la presenza di fessure o vuoti tende a far decrescere l'amplitudine quando la punta attraversa tali difetti, dovuti ad insetti e marcescenze o legati al ritiro del materiale ligneo. L'analisi del profilo densimetrico consente di ricavare la 'sezione efficace' dell'elemento costruttivo ligneo indagato, definita come la sezione trasversale — difetti inclusi — la cui area si determina sottraendo dall'area della sezione critica tutte le aree eventualmente costituite da legno degradato e/o danneggiato (UNI 11119:2004).

Oltre alle valutazioni qualitative desumibili dall'osservazione del grafico, risulta possibile inoltre determinare la densità media del legno tramite correlazioni matematiche che sfruttano la misura resistografica RM , definita come il rapporto [3.1] tra l'integrale dell'area sottesa il profilo e la lunghezza di perforazione:

$$RM = \frac{\int_0^h A}{h} \quad [3.1]$$

In letteratura sono numerosi i tentativi di correlazione tra la prova resistografica e la valutazione di dati quantitativi ma per la maggior parte degli studi si è riscontrato come tale strumento sia più a supporto delle indagini di I livello (Tannert et al., 2013) e porti con sé molti vantaggi tra cui, su tutti, la buona versatilità per quanto concerne l'analisi *in situ* (Rinn, 1996).

3.1.3.2 Prova penetrometrica con sclerometro da legno

Rientra tra le tipologie di prova debolmente distruttive e viene impiegata per valutare l'uniformità del tessuto superficiale ligneo e stimare la massa volumica del legno. Si esegue con lo strumento denominato come sclerometro (Fig. 3.6) — comunemente chiamato anche *Pilodyn* — e prevede l'infissione di un ago di acciaio temprato, con sezione circolare di pochi millimetri, tramite una serie di colpi e per i quali è nota la quantità di energia impiegata. L'affondo della punta è pari a pochi centimetri e per tale motivo la prova indaga la sola parte superficiale dell'elemento ligneo, consentendo di ottenere dati utili per:

- la stima della densità del materiale;
- la valutazione dello stato di conservazione;
- l'individuazione di zone superficiali ammalorate;
- ottenere valori relativi alle caratteristiche meccaniche.

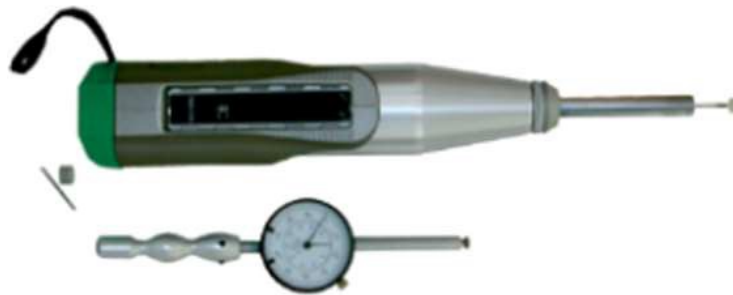


Fig. 3.6: Sclerometro da legno Novatest Woodtester (Fonte: novatest.it).

L'esecuzione della prova prevede innanzitutto una valutazione critica per individuare la porzione di materiale da sottoporre ad indagine strumentale. È necessario che l'area individuata sia priva di difetti quali nodi o fessurazioni e che abbia uno spessore minimo sufficiente per sopportare l'infissione dell'ago. In presenza di eventuali rivestimenti è consigliato asportare lo strato superficiale ed effettuare una levigatura in modo da avere un punto di contatto diretto con il legno interessato (Tannert et al., 2014).

La misura della profondità a cui la punta penetra può dipendere da numerose variabili come: la

specie legnosa, la densità del materiale, la direzione della prova rispetto l'orientamento degli anelli di accrescimento, il contenuto di umidità ed infine le potenziali alterazioni biotiche

Tra le tecniche che si basano sulla durezza superficiale del legno, può essere citato il metodo proposto dagli ingegneri Turrini e Piazza (1983) che hanno proposto una specifica prova di impronta che collega il modulo di elasticità E al parametro R , valore della forza — espressa in Newton — necessaria per affondare di 5 millimetri nella superficie laterale dell'elemento una punta sferica di acciaio del diametro di 10 millimetri. Una formula empirica [3.2] consente di stimare il valore cercato come:

$$E = 350 \cdot R^2 \quad [3.2]$$

per la quale gli stessi autori consigliano di adottare un valore ridotto di calcolo per il modulo E in base al giudizio sul grado di difettosità dell'elemento ligneo (Tab. 3.1). Posto un valore pari ad 80 per membrature prive di difetti e di 50 per elementi fortemente difettosi (presenza di nodi, fessurazioni, deviazioni della fibratura) il valore ottenuto per interpolazione tra tali due estremi rappresenta la percentuale da assumere per ridurre il valore del modulo di elasticità E .

Tab. 3.1: Valori per l'applicazione del metodo empirico Turrini-Piazza per la determinazione di E .

Classificazione del legno	R [N]	Difetti [%]	E [MPa]
Ottimo	2000	80	12500
		50	7800
Buono	1400	80	10500
		50	6500
Discreto	800	80	8000
		50	5000

3.1.3.3 Prova ultrasonica

Tale tipologia di prova rientra nella categoria delle indagini diagnostiche non distruttive e consente di valutare il grado di omogeneità interno tramite l'analisi delle caratteristiche di propagazione delle onde ultrasoniche nel mezzo, misurando il tempo che un impulso sonoro impiega nel percorrere una determinata distanza all'interno dell'elemento ligneo. Noto il tempo di percorrenza dell'onda e misurata la distanza da essa percorsa, è facilmente determinabile la velocità dell'onda stessa. Tale parametro è usato per la valutazione delle condizioni interne del materiale: più infatti il materiale è denso, ossia privo di fessurazioni e vuoti, tanto più velocemente avviene la propagazione; il tempo di percorrenza invece aumenta all'aumentare dei difetti o delle tracce di degrado, le quali costringono l'onda ad un percorso alternativo a quello lineare. La

misura avviene tramite uno strumento dotato di una coppia di trasduttori ed un lettore (Fig. 3.7).

Oltre che per l'individuazione del degrado nel legno, le prove ultrasoniche possono essere sfruttate per quantificare parametri meccanici del materiale, in particolare il modulo di elasticità dinamico E_d . La determinazione di tale parametro è basata su espressioni empiriche che relazionano la velocità delle onde con la densità del materiale, in particolare:

$$E_d = v^2 \rho \quad [3.3]$$

dove v è pari alla velocità di propagazione dell'onda longitudinale e ρ alla densità dell'elemento. La relazione [3.3] deriva dalla teoria monodimensionale delle onde e vale quindi per materiali omogenei e isotropi, ma diversi studi hanno dimostrato la validità di tale teoria anche per il legno (Piazza et al., 2008).



Fig. 3.7: Strumentazione per prove ultrasoniche tipo Proceq Pundit PL-200 (Fonte: proceq.com).

3.1.3.4 Prova con video-endoscopia

Consente di ottenere informazioni circa la morfologia e la tipologia degli elementi strutturali consentendone il rilievo della stratigrafia e del relativo spessore di ogni strato, la presenza di cavità legate a vuoti o ad anomalie localizzate, lo stato visibile di conservazione del materiale. È una prova debolmente distruttiva che necessita di un foro preventivo da eseguirsi con un trapano, per un diametro nell'ordine del centimetro, al fine di consentire l'introduzione di una sonda dotata di telecamera. Presenta alcune limitazioni legate soprattutto all'interpretazione dei risultati poiché la superficie interna del foro si presenta in genere poco pulita e a ciò si unisce la distorsione legata all'obiettivo a grandangolo della sonda stessa, rendendo molto difficoltosa l'osservazione al punto da non poter sempre trarre informazioni utili all'indagine.

3.1.3.5 Prova sonora di percussione

Consiste nel percuotere la superficie dell'elemento strutturale con un martello in gomma (Fig. 3.8) e nell'ascoltare il suono prodotto da tale percussione. Il principio alla base di tale prova considera che la presenza di cavità o porzioni degradate all'interno dell'elemento ligneo indagato portino ad una differente risposta sonora quando lo stesso è sottoposto a sollecitazioni di tipo dinamico. Estendendo la prova ad intere strutture lignee risulta possibile definire una prima sommaria valutazione del danno degli elementi componenti classificabili in funzione della risposta sonora. Ai vantaggi legati alla semplicità e rapidità di esecuzione, unitamente alla sua economicità, la prova presenta una forte componente soggettiva, legata all'esperienza dell'operatore. In generale si ritiene che tale metodo di indagine preliminare fornisca una base di partenza per successive prove strumentali che possano integrarne e validarne i risultati.

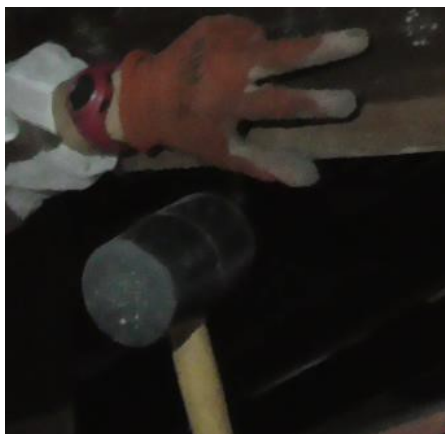


Fig. 3.8: Esecuzione della prova sonora di percussione.

3.1.3.6 Prova con punteruolo

È una tecnica debolmente distruttiva che consiste nell'infissione di un punteruolo (o di un cacciavite) nell'elemento ligneo indagato al fine di valutarne l'approfondimento della punta con lo scopo di poter stimare la profondità di una porzione già soggetta al visibile danno legato a degrado dovuto da umidità o carie. Può essere considerata una prova preliminare ad un'indagine con trapano resistografico o sostitutiva alla prova penetrometrica, presenta inoltre i medesimi vantaggi e limitazioni della prova sonora di percussione con martello, legati principalmente all'esperienza ed alla sensibilità dell'operatore.

3.2 Rilievo e rappresentazione

Tra le fasi del processo conoscitivo delle strutture lignee esistenti, quella inerente al rilievo è sicuramente la più importante. Oltre alla mera determinazione di tutti gli elementi atti a rappresentare la struttura oggetto di studio, è necessario indagare con rilevazioni più estese ed approfondite le parti che presentino maggiori anomalie e alterazioni. Unitamente alle caratteristiche geometriche sono da rilevarsi le sezioni resistenti e le deformate delle singole membrature.

3.2.1 Il rilievo geometrico e fotografico

Il rilievo geometrico della struttura è indispensabile per analizzarne e comprenderne correttamente il suo funzionamento e quello delle sue parti. È opportuno identificare le parti e gli elementi da ispezionare con una simbologia alfanumerica al fine di catalogarli e poterli facilmente individuare, riportando in maniera semplice ed intuitiva i dati dell'indagine e restituendone la loro forma grafica. È raccomandabile che, parallelamente alle rilevazioni metriche, vengano eseguite sistematiche campagne fotografiche, così da avere un utile elemento di confronto visivo ed una testimonianza diretta della configurazione geometrica, oltre che dello stato di conservazione degli elementi. Il rilievo fotografico rappresenta uno strumento a supporto di quello geometrico, è fondamentale per l'integrazione dei dettagli costruttivi e si pone alla base per le successive elaborazioni legate ai calcoli di verifica statica ed al progetto di consolidamento.

La strumentazione necessaria è quella consueta, dovendosi lo stesso rilievo sviluppare in modo diretto e strumentale. Oltre a cordella metrica, doppio metro e metro estensibile, è buona norma dotarsi di calibro, senza dimenticare strumenti come la lente di ingrandimento e la torcia, utili per gli ambienti a scarsa illuminazione. Le misure e gli elementi di rilievo sono da riportarsi in supporti cartacei ove rappresentare schizzi e disegni di dettaglio o direttamente su tavole e stampe di precedenti lavori da integrarsi, spesso forniti dal committente o reperiti dal tecnico.

Tramite il rilievo geometrico sono da rilevarsi:

- la geometria generale della struttura e delle unità strutturali;
- la geometria delle unioni e delle connessioni lignee;
- la forma e le dimensioni delle sezioni degli elementi;
- le eventuali deformazioni e le anomalie geometriche.

La precisione delle rilevazioni può essere variabile e dipendente, oltre che dal grado di accuratezza del tecnico rilevatore, anche dal grado di finitura della carpenteria, che può andare dall'estrema rozzezza alla raffinatezza stereotomica. Nel primo caso si devono operare continuamente medie ed interpolazioni, geometriche in fase di lettura e numeriche in fase di determinazione del dato, mentre nel secondo caso si è più inclini ad interpretare ogni anomalia morfologica come un'alterazione (Tampone, 2005).

Come anticipato in precedenza, ai fini della classificazione degli elementi lignei, oltre al rilievo della geometria è necessario procedere alla determinazione delle caratteristiche che concorrono alla riduzione della resistenza meccanica, quali smussi, nodi, inclinazione della fibratura e difetti di natura biologica o meccanica. Il rilievo di tali caratteristiche — descritto e specificato nella norma UNI 11119:2004 — si avvale di rilevazioni geometriche da eseguirsi con i classici strumenti di rilievo, quali il metro e il calibro (Fig. 3.9)



Fig. 3.9: Esempio di rilievo geometrico di un nodo su di un elemento di capriata.

Il risultato e l'integrazione dei dati reperiti attraverso il rilievo geometrico e fotografico concorrono alla redazione di tavole ed elaborati utili alla rappresentazione grafica ed all'analisi degli elementi lignei oggetto di studio. Tra gli obiettivi primari vi è la comprensione del complesso strutturale e la definizione del suo ordinamento gerarchico, con la finalità di integrare il livello di conoscenza del caso-studio in esame. I recenti sviluppi nel campo dell'informatizzazione hanno consentito di passare dai basilari programmi CAD bidimensionali ai più moderni software BIM tridimensionali, basati sull'interoperabilità e sulla realizzazione di modelli digitali contenenti informazioni sull'intero ciclo di vita di un'opera. Tramite l'ausilio di tali strumenti è possibile integrare il semplice modello tridimensionale con informazioni di dettaglio, ottenendo ad esempio sia un output grafico che un utile archivio digitale (Fig. 3.10).

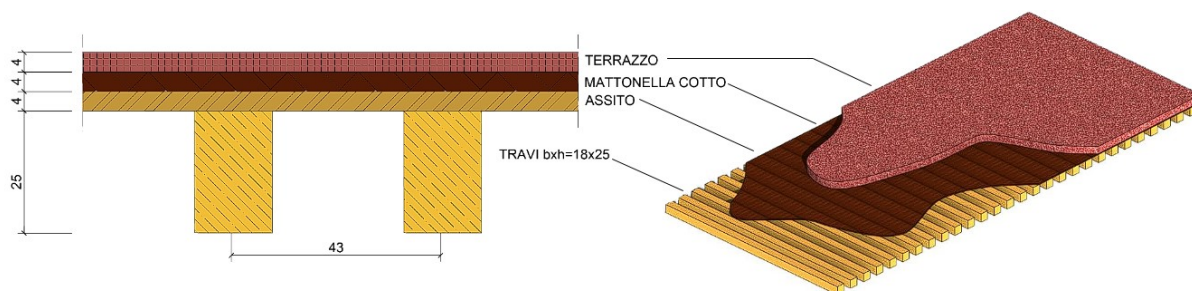


Fig. 3.10: Esempio di restituzione grafica del rilievo geometrico di un solaio ligneo.

3.2.2 Il rilievo del degrado biologico

Tra le primarie operazioni da eseguirsi in sede di ispezione visiva di strutture lignee in opera vi è l'accertamento dell'eventuale presenza di biodegradamento. Tale tipologia di degrado comporta sempre una riduzione della sezione resistente degli elementi o una riduzione interna delle loro proprietà fisico-meccaniche. Una volta accertata la presenza di degrado biologico, è necessario procedere all'identificazione e valutazione dello stesso, rilevandone la sua estensione sull'elemento ligneo indagato.

Ai fini della valutazione del degrado biologico è necessario definire le condizioni ambientali in cui il legname in opera è soggetto ed il relativo rischio biologico a cui è sottoposto. La norma UNI EN 335:2013 definisce le classi di rischio relative alle differenti situazioni di servizio alle quali possono essere esposti il legno ed i prodotti a base di legno, indicando per ogni situazione gli agenti biologici pertinenti:

- **Classe di rischio 1:** ambiente riparato, protetto dagli agenti atmosferici con umidità del legno sempre minore o uguale al 20%. Le condizioni garantiscono contro il rischio di attacco fungino, è possibile l'attacco da parte di insetti;
- **Classe di rischio 2:** ambiente riparato ma con elevata umidità dell'aria e con umidità del legno a volte maggiore del 20%. Può essere presente l'attacco fungino, è possibile l'attacco da parte di insetti;
- **Classe di rischio 3:** elementi lignei anche esposti, è frequente un'umidità del legno maggiore al 20%. Sono possibili attacchi sia fungini che da parte di insetti;
- **Classe di rischio 4:** elementi lignei esposti, anche a contatto diretto con terreno o acqua dolce. Permanentemente esposti all'attacco fungino con possibilità di attacco da parte di insetti, quali termiti;
- **Classe di rischio 5:** elementi costantemente esposti all'acqua salata con un'umidità del legno sempre maggiore del 20%. Attacco di organismi invertebrati marini, soprattutto in acque calde. Attacco di insetti per le parti non immerse in acqua.

Il biodegradamento⁸ può essere causato da differenti agenti la cui alterazione prodotta può portare ad aspetti di tipo macroscopico o a meccanismi di azione interna. È opportuno eseguire il rilievo del degrado biologico in maniera sistematica ed ordinata, elemento per elemento, avendo l'accortezza di porre maggiore attenzione alle connessioni ed agli appoggi delle strutture. Anche per tale tipologia di rilievo è consuetudine affiancare alla mera rappresentazione grafica il rilievo fotografico, al fine di documentare lo stato di conservazione e redigere tavole specifiche alla base delle successive fasi di indagine strumentale.

Il degrado biologico può avere chiare manifestazioni esteriori o interessare porzioni interne degli elementi lignei e per questo si rende necessaria un'attenta e minuziosa osservazione degli stessi, legata anche all'esperienza ed alla specializzazione del tecnico rilevatore. Tale procedura è di frequente demandata a figure tecniche esperte che sappiano identificare la natura dell'attacco biologico e soprattutto valutarne lo stato in essere e la gravità per successive indagini.

Nella pratica professionale si applicano criteri di valutazione legati alla soglia di trascurabilità ed alla sezione resistente residua: dal punto di vista pratico, al di sotto di certi livelli di intensità il degrado viene considerato trascurabile, mentre al superamento di tali livelli viene valutata la sua estensione rispetto alla sezione geometrica dell'elemento. Non essendo sempre possibile definire i limiti delle zone degradate, il degrado biologico viene spesso espresso in forma percentuale. L'applicazione dei criteri descritti avviene in particolare per forme di biodegradamento dovuto ad insetti o carie: nella prima situazione, se il degrado è concentrato nella porzione esterna della sezione — come gallerie ubicate prevalentemente nell'alburno — se ne valuta la profondità, mentre se lo stesso è diffuso anche all'interno si procede alla riduzione percentuale della sezione o delle proprietà meccaniche; nella seconda situazione, a seconda della distribuzione del degrado nella sezione, si procede a valutarne la riduzione geometrica.

3.2.3 Il rilievo del degrado meccanico

La rilevazione delle degradazioni meccaniche di una struttura lignea consiste nell'individuazione delle lesioni — fenditure e fessurazioni — da indagarsi con scrupolosa attenzione secondo un approccio in funzione alla scala gerarchica degli elementi componenti il complesso strutturale. L'obiettivo è associare a ciascuna lesione la relativa natura, distinguendo tra lesioni legate agli effetti di ritiro e lesioni di tipo meccanico. La diagnosi si rende necessaria

⁸ Si veda il § 1.1.4 Biodegradamento.

anche ai fini della corretta classificazione in termini di resistenza meccanica poiché è noto che le fenditure da ritiro o di altra natura rientrano fra le caratteristiche che influiscono sulle prestazioni del legname strutturale e sono considerate in tutte le norme, nazionali ed internazionali.

Per degrado meccanico si intende il danno prodotto a causa di sollecitazioni eccessive rispetto alla resistenza dell'elemento. Rientrano in tale tipologia di degrado anche le eccessive deformazioni dovute alle sollecitazioni agenti in quanto indice di uno stato tensionale elevato che a lungo tempo può provocare la rottura dello stesso elemento ligneo, fino al massimo livello di gravità, coincidente con il dissesto o crollo dell'intera struttura.

Il rilievo del degrado meccanico è un'operazione che rientra nelle indagini di I livello da compiersi con l'ausilio di strumenti di misura, quali il metro e il calibro, a cui è sempre buona norma accompagnare la presa fotografica delle lesioni ai fini della documentazione di dettaglio. L'esperienza e la conoscenza delle specie legnose supportano il tecnico nella distinzione tra fessure dovute al semplice ritiro o a condizioni più critiche, in ogni caso il rilievo avviene misurando l'apertura della fessurazione e, quando possibile, la profondità della stessa (Fig. 3.11).



Fig. 3.11: Esempio di rilievo meccanico: apertura (sx) e profondità (dx) della lesione.

La gravità delle lesioni è tanto maggiore quanto è la profondità delle stesse, mentre in termini di inclinazione va tenuto presente che le lesioni da ritiro seguono l'inclinazione della fibratura. È necessario precisare però che le variazioni dimensionali dovute al fenomeno del ritiro interessano anche la direzione trasversale all'asse, per la quale l'entità è di gran lunga maggiore,

contribuendo ad aumentare la profondità delle lesioni. Rarissimamente le lesioni si presentano come passanti, in tale caso è preferibile che sia verticali, così da non contribuire a riduzioni del modulo di resistenza dell'elemento. Le fessure inclinate, che indicano torsione della fibratura, sono da attenzionare maggiormente; le stesse normative pongono limiti di inclinazione ai fini della classificazione degli elementi ma la principale caratteristica da attenzionare ai fini del funzionamento strutturale è l'eventuale presenza di fessure che seguano l'andamento di fibre ritorte. Tali fibre tendono a svilupparsi su due facce ortogonali dell'elemento ligneo e concorrono alla formazione di fessurazioni che possono incidere sulla resistenza delle membrature (Fig. 3.12).



Fig. 3.12: Esempio di fibra ritorta rilevata a seguito di ispezione.

Ulteriori elementi che contribuiscono all'apertura delle lesioni sono i chiodi in ferro di staffe e regge metalliche da porsi evitandone l'allineamento al fine di non creare linee di fessurazione preferenziali, facendo in modo che almeno qualche chiodo eviti le fessure da ritiro (Laner, 2003).

In linea generale il degrado meccanico può essere indice di schemi strutturali poco efficienti, errati sfruttamenti delle proprietà del materiale, interventi pregressi non idonei o addirittura peggiorativi. In tali circostanze, il progettista chiamato a redigere l'intervento di recupero deve debitamente tenerne considerazione, soprattutto per le zone più sollecitate e in corrispondenza delle unioni.

3.2.4 La restituzione grafica

A margine delle operazioni di rilievo e delle indagini strumentali, si procede alla redazione di schede di dettaglio e rappresentazione dei dati acquisiti, avendo cura di inquadrare il caso-studio generale anche dal punto di vista geografico, cartografico geologico e sismico, oltre che da quello storico. L'individuazione delle unità strutturali può avvenire tramite l'ausilio di

modellazioni tridimensionali che tengano conto delle fasi evolutive del complesso e delle relative vicissitudini storiche che possano aver dato luogo nel tempo a trasformazioni, danni e cambi d'uso degli ambienti su cui insistono le membrature lignee che per il costruito di interesse storico-artistico possono coincidere con elementi di particolare pregio da considerarsi ai fini degli interventi o dell'esecuzione di messa in sicurezza (Fig. 3.13).

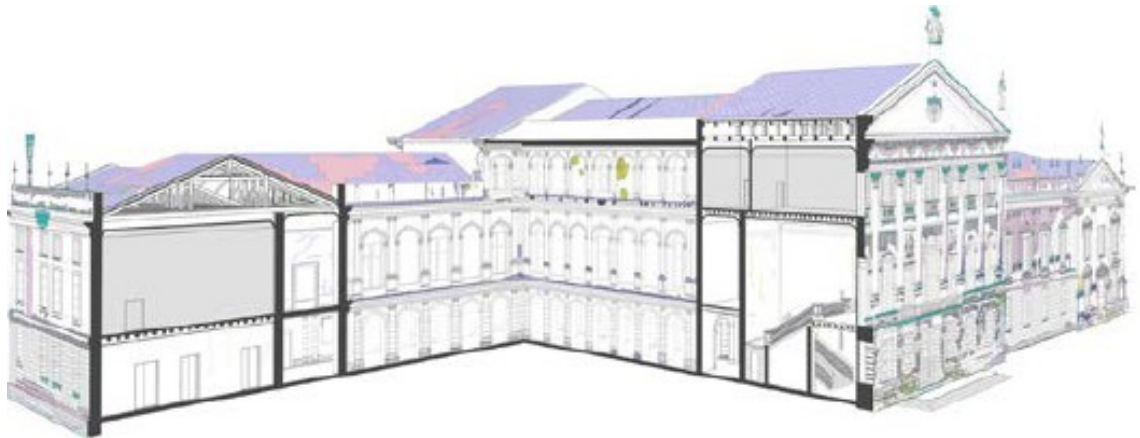


Fig. 3.13: Restituzione grafica 3D eseguita tramite il software BIM Autodesk Revit (Angeletti et al., 2020).

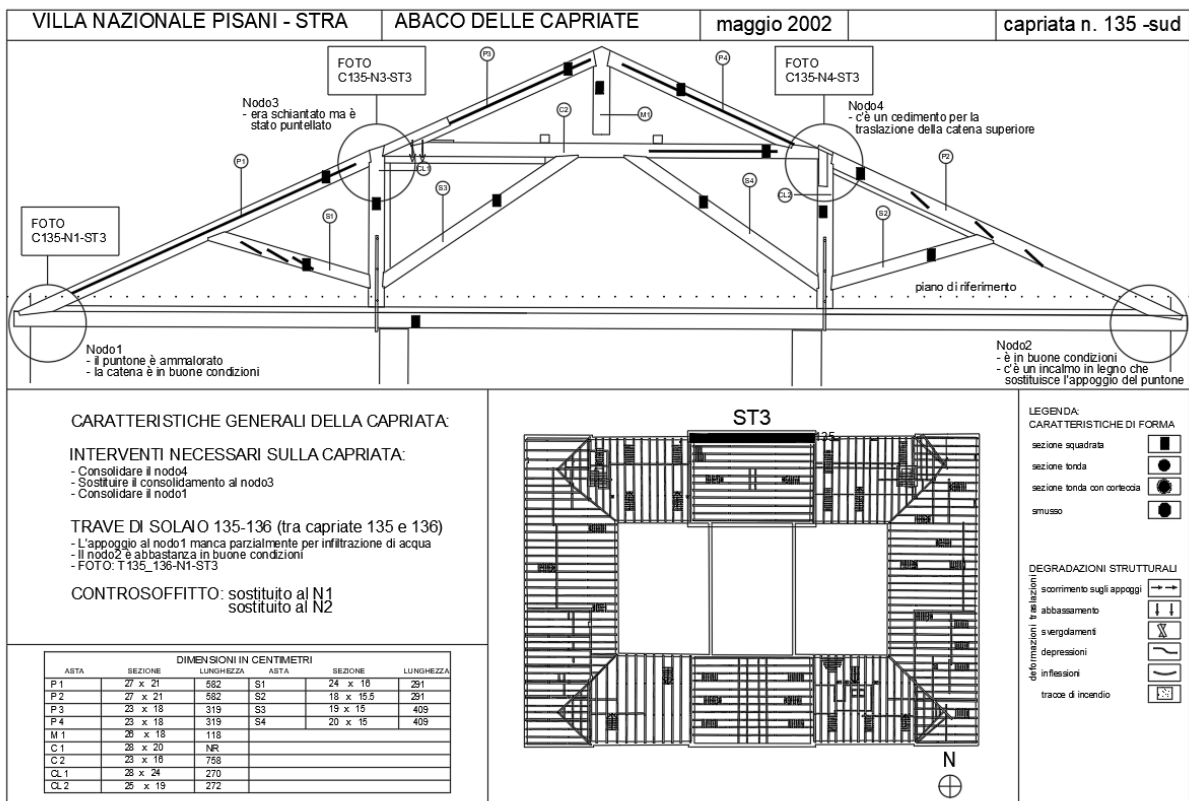


Fig. 3.14: Scheda di rilievo riepilogativa delle indagini eseguite su una capriata lignea palladiana (Barp, 2002).

La restituzione dei risultati è la parte conclusiva del lavoro di indagine e deve essere improntata alla massima semplicità e chiarezza poiché dovrà essere compresa sia da tecnici non specialisti che da personale non tecnico. Solitamente è redatta in forma grafica, integrata da supporti tabulari, con la finalità di rappresentare la struttura e le sue parti in maniera semplice e intuitiva con opportune simbologie e convenzioni. È opportuno riportare in maniera schematica gli esiti del rilievo geometrico e fotografico, destinando a schede di dettaglio i particolari costruttivi, unitamente a quelli del degrado biologico e meccanico, con l'indicazione dei punti di eventuali indagini strumentali (Fig. 3.14).

Le tecniche di restituzione tradizionali svolte in accordo alla norma UNI 11119:2004 risultano idonee per la definizione delle caratteristiche geometriche e di degrado del singolo elemento ligneo ma non danno informazioni sul rapporto gerarchico tra i vari elementi strutturali. Nel caso di interventi estesi su strutture complesse risulta necessario avere indicazioni sul rapporto gerarchico tra gli elementi strutturali al fine di individuare gli elementi di maggiore criticità per la sicurezza della struttura e poter programmare gli interventi di manutenzione e/o riparazione. Una strategia efficiente per sintetizzare il rilievo degli elementi strutturali e i rapporti gerarchici consiste nella mappatura degli stessi tramite l'ausilio dei principi del rilievo stratigrafico applicato alle strutture lignee, secondo la tecnica della matrice di Harris⁹. Tale tecnica consente di restituire i rapporti di gerarchia strutturale tra elemento portante ed elemento portato oltre che i rapporti temporali tra gli stessi elementi, definendone la successione o l'eventuale contemporaneità. L'applicazione di questa metodologia risulta idonea alla restituzione di strutture lignee complesse che presentino diversi elementi appesi e portati, il cui esempio tipico sono i sistemi di copertura realizzati mediante capriate lignee che sostengano volte e controsoffitti (Pozza, 2018).

⁹ Il metodo stratigrafico è uno specifico metodo di datazione dell'edilizia storica di tipo diretto relativo, derivato dai principi dell'archeologia moderna, con particolare riferimento alla geologia e alla paleontologia, che consente di datare gli strati a seconda dei fossili specifici di un determinato periodo. Si tratta di un'analisi che descrive gli strati, basandosi sul fatto che tutto ciò che sta al di sotto è più antico di ciò che sta sopra. Nel 1979 Edward Harris codifica le fasi e le modalità di interpretazione di uno scavo archeologico, definendo quattro leggi di identificazione stratigrafica rappresentabili tramite diagrammi di flusso detti anche matrice di Harris.

3.3 Analisi e valutazione della struttura

A partire dai dati raccolti nella fase di rilievo, una volta eseguita la restituzione grafica, è possibile procedere all'analisi ed alla valutazione dell'efficienza strutturale, nodo centrale della conservazione architettonica ed al tempo stesso uno dei problemi più ardui da compiersi dovendosi confrontare con strutture lignee quasi sempre a più gradi di iperstaticità e spesso alterate da interventi successivi allo stato originario.

Se da un lato le recenti normative tecniche hanno chiarato le problematiche legate alle verifiche di sicurezza, definendo un approccio sistematico secondo il metodo semiprobabilistico agli stati limite, tenendo conto della dipendenza delle caratteristiche di resistenza e deformabilità del legno dei vari fattori che le influenzano, dall'altro appare evidente la necessità di correlare i risultati delle prove di indagine in funzione della classificazione degli elementi lignei e dei parametri meccanici e di resistenza forniti dalle stesse norme tecniche, ai fini delle verifiche.

3.3.1 Il modello meccanico del materiale legno

Preliminarmente all'analisi strutturale è necessario procedere alla modellazione della struttura e delle sue parti in funzione della geometria, delle condizioni di vincolo, dei collegamenti e dei carichi agenti. A tali parametri è necessario integrare le proprietà meccaniche del materiale, sulla base delle caratteristiche intrinseche ed in considerazione del legame costitutivo tra tensioni e deformazioni, al fine di ottenere un modello meccanico il più realistico possibile.

Il legame costitutivo del legno è generalmente descritto mediante differenti modelli caratterizzati da un diverso grado di approssimazione, alla cui base però vi sono le assunzioni:

- per il comportamento a trazione monoassiale viene comunemente accettato il modello elastico lineare fino a rottura, caratterizzato da un diagramma rettilineo con pendenza costante. Nota la resistenza ultima e il modulo di elasticità normale è immediato ricavare la relativa deformazione e viceversa;
- il tipico diagramma tensione-deformazione relativo ad una prova di compressione monoassiale presenta generalmente un primo tratto a pendenza costante o variabile con continuità. Il tratto caratterizzato da deformazioni positive (trazione) e la tangente all'origine per deformazioni negative (compressione) hanno la stessa pendenza;

- il modulo di elasticità normale è di facile determinazione rappresentando, in tutti i modelli considerati, la pendenza del tratto lineare del diagramma tensione-deformazione.

Il modello elasto-plastico si dimostra quello più ampiamente utilizzato nonostante la semplificazione che ne limita il relativo diagramma ad una rappresentazione grafica triangolare (Fig. 3.15). La definizione analitica del legame costitutivo è descritta dalle relazioni:

$$\sigma = E_W \cdot \varepsilon \text{ per } \varepsilon_c < \varepsilon < \varepsilon_t \quad [3.4]$$

$$\sigma = f_c \text{ per } \varepsilon < \varepsilon_c \quad [3.5]$$

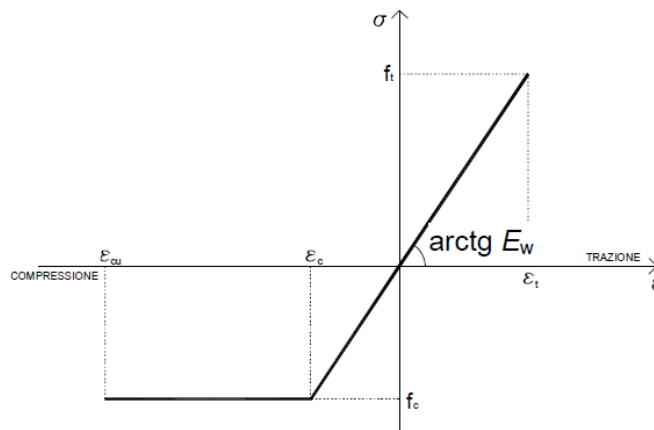


Fig. 3.15: Diagramma del modello costitutivo elasto-plastico del legno massiccio (CNR DT-201, 2005).

Date le caratteristiche di accrescimento del legno degli alberi, in ambito ingegneristico è possibile considerare il legno, prescindendo dalla sua non omogeneità, come un materiale ortotropo, cioè come un materiale le cui caratteristiche in un punto siano semplicemente individuabili sulla base delle caratteristiche individuate per tre direzioni e, conseguentemente, tre piani ortogonali tra loro rispetto a cui il materiale si comporta in modo simmetrico nei due versi, positivo e negativo (Giordano, 1993).

In ogni punto della sezione retta di un tronco è possibile individuare oltre alla direzione parallela all'asse dell'albero in quel punto (direzione longitudinale L, normale al piano della sezione), una direzione tangente all'anello di accrescimento annuale in quel punto (direzione tangenziale T) ed una direzione normale alla direzione tangenziale nel punto (direzione radiale R): tali direzioni costituiscono le tre direzioni principali di ortotropia, lungo le quali il materiale presenta comportamenti differenti. Le stesse direzioni definiscono i tre piani di simmetria delle costanti elastiche mutuamente ortogonali: quello perpendicolare all'asse del fusto (R, T), quello

passante per l'asse midollare del fusto e un raggio (L, R) e quello passante per una secante della sezione trasversale e parallela all'asse del fusto (L, T) (Fig. 3.16).

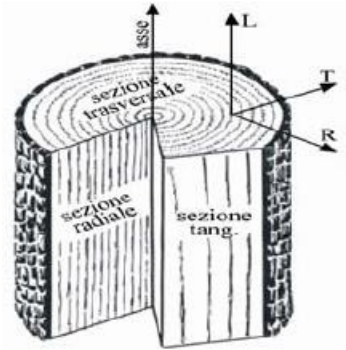


Fig. 3.16: Assi e sezioni di un tronco ligneo individuanti le direzioni ed i piani di ortotropia (Piazza et al., 2005).

Appare possibile definire le caratteristiche di deformabilità meccanica del legno in un punto mediante le relazioni elastiche del materiale ortotropo attraverso i soli valori dei moduli di elasticità normale (E_L, E_T, E_R), dei moduli di elasticità tangenziale ($G_{LT} = G_{TL}, G_{RT} = G_{TR}, G_{LR} = G_{RL}$) e dei mutui rapporti tra i valori dei moduli di Poisson ed i moduli di elasticità normale (N_{LR}, N_{LT}, N_{RT}). In tal modo la matrice di deformabilità che lega le tensioni alle deformazioni risulta essere simmetrica — di ordine 6×6 — e dipendente da nove costanti indipendenti:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_L \\ \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \tau_{RT} \\ \tau_{LT} \\ \tau_{LR} \end{bmatrix} \quad [3.6]$$

Dai valori riportati in letteratura (Bodig and Jayne, 1982), ricavati tramite sperimentazione fisica, si evidenzia come i coefficienti di Poisson non varino sensibilmente con la massa volumica ed altre caratteristiche anatomiche mentre come ciò non risulti vero per le costanti elastiche, che possono invece variare in funzione di parametri meccanici quali ad esempio umidità e temperatura (Figg. 3.17-3.18). Nonostante le molte variazioni tra i moduli, per la gran parte delle specie legnose possono ritenersi accettabili i seguenti rapporti:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1,6 : 1 \quad [3.7]$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9,4 : 1 \quad [3.8]$$

$$E_L : G_{LR} \approx 14 : 1 \quad [3.9]$$

Rapporto	Conifere	Latifoglie
ν_{LR}	0,37	0,37
ν_{LT}	0,42	0,50
ν_{RT}	0,47	0,67
ν_{TR}	0,35	0,33
ν_{RL}	0,041	0,044
ν_{TL}	0,033	0,027

Fig. 3.17: Moduli di Poisson indicativi del legno (Piazza et al., 2005).

Materiale	Modulo E (GPa)			Modulo G (GPa)		
	E_L	E_R	E_T	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}
Duglasia	14,50	0,96	0,09	0,83	0,76	0,08
Abete rosso	11,71	0,83	4,94	0,70	0,66	0,07
Larice	14,13	1,05	0,69	0,84	0,78	0,09
Pioppo	10,76	0,76	0,33	0,59	0,42	0,13
Pino	11,52	1,00	0,65	0,81	0,75	0,09
Faggio	13,06	1,31	0,68	1,01	0,75	0,25
Quercia	13,82	1,28	0,66	0,99	0,74	0,25
Betulla	15,25	1,26	0,64	0,97	0,72	0,24
Balsa	3,30	0,27	0,08	0,21	0,14	0,03

Fig. 3.18: Moduli elastici indicativi di differenti specie legnose (Piazza et al., 2005).

I valori riportati per le caratteristiche meccaniche del legno possono consentire un'ulteriore ragionevole ipotesi semplificativa, legata a scopi di calcolo strutturale, che permette di riferirsi ad un'unica direzione ortogonale all'asse L , confondendo le direzioni anatomiche T e R in ragione dell'ortotropia cilindrica (Fig. 3.19).

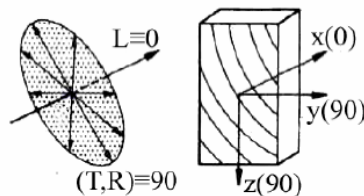


Fig. 3.19: Condizioni di ortotropia cilindrica. (Giordano, 1993).

Con tale semplificazione il materiale diviene quindi caratterizzato da due orientazioni, quella longitudinale parallela alla fibratura ($L \equiv 0$) e quella ad essa ortogonale ($T, R \equiv 90$), ottenendo per il materiale legno una caratterizzazione legata ai moduli di elasticità normali E_0 ed E_{90} e da quello tangenziale G . In termini matriciali si ottiene:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_{90} \\ \varepsilon_{90} \\ \gamma_{90,90} \\ \gamma_{0,90} \\ \gamma_{90,0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} & -\frac{\nu_{90,0}}{E_{90}} & -\frac{\nu_{90,0}}{E_{90}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{0,90}}{E_0} & \frac{1}{E_{90}} & -\frac{\nu_{90}}{E_{90}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{0,90}}{E_0} & -\frac{\nu_{90}}{E_{90}} & \frac{1}{E_{90}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{90,90}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{0,90}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{90,0}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \sigma_{90} \\ \sigma_{90} \\ \tau_{90,90} \\ \tau_{0,90} \\ \tau_{90,0} \end{bmatrix} \quad [3.10]$$

Ricorrendo alle ipotesi di deformabilità piana, considerando uno stato di tensione piano, la matrice diventa di ordine 3×3 risultando:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_{90} \\ \gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_0} & -\frac{\nu_{90,0}}{E_{90}} & 0 \\ -\frac{\nu_{0,90}}{E_0} & \frac{1}{E_{90}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_0 \\ \sigma_{90} \\ \tau \end{bmatrix} \quad [3.11]$$

In conclusione è possibile affermare che il legame costitutivo del legno in ipotesi di elasticità lineare ed ortotropia cilindrica è noto se si conoscono le caratteristiche meccaniche ed i relativi moduli di Poisson in direzione parallela ed ortogonale alla fibratura. In mancanza di specifiche determinazioni, possono ritenersi accettabili per il legno di conifera, le seguenti assunzioni riportate in normativa (Fig. 3.20), noto il modulo di elasticità in direzione parallela alle fibre E_0 :

$$E_{90} = E_0/30 \quad [3.12]$$

$$G = E_0/16 \quad [3.13]$$

Proprietà		Relazioni
Flessione (valore di riferimento)		$f_{m,k}$ [N/mm ²]
Trazione	Parallela alla fibratura	$f_{t,0,k} = 0.6 f_{m,k}$
	Perpendicolare alla fibratura	$f_{t,90,k} = \min(0.6 ; 0.015 f_{m,k})$
Compressione parallela alla fibratura		$f_{c,0,k} = 5 (f_{m,k})^{0.45}$
Taglio		$f_{v,k} = \min(4.0 ; 0.6 (f_{m,k})^{0.6})$
Moduli elastici		$E_{0,k} = 0.67 E_{0,mean}$
		$E_{90,mean} = E_{0,mean}/30$
		$G_{mean} = E_{0,mean}/16$

Fig. 3.20: Relazioni proposte per la determinazione delle proprietà meccaniche del legno massiccio secondo la norma UNI EN 338:2016 (Zan, 2018).

Nella pratica professionale risulta fondamentale per l'utilizzo pratico la conoscenza della deformabilità sotto un carico agente secondo una direzione che non coincide con nessuna delle direzioni principali, come nel caso della verifica del nodo puntone-catena di una capriata lignea, dove lo sforzo del puntone insiste sulla catena secondo l'inclinazione della copertura. È possibile esprimere la variazione del conseguente modulo elastico E_α in funzione della variazione dell'inclinazione α della fibratura rispetto alla direzione della sollecitazione agente, ricorrendo alla formulazione di Hankinson (1921) seguente:

$$E_\alpha = \frac{E_0}{\cos^2 \alpha + \frac{E_0}{E_{90}} \sin^2 \alpha} \quad [3.14]$$

Quando un elemento strutturale ligneo viene caricato, la sua deformazione non dipende solamente dall'entità di carico, dalla luce, dal grado di vincolo e dal modulo di rigidità flessionale, ma anche da altri fattori quali la durata del carico, il contenuto di umidità e la variazione di tale umidità nel tempo. Il fenomeno della viscosità è particolarmente sentito negli elementi lignei, dato il comportamento visco-elastico dello stesso materiale, che determina deformazioni lente di un elemento strutturale per effetto dell'azione dei carichi permanenti.

Se si considera un elemento generico di legno, in condizioni termoigrometriche ambientali costanti, sottoposto ad uno stato tensionale monoassiale σ , la sua dilatazione all'atto del caricamento sarà esprimibile come:

$$\varepsilon_{t,0} = \frac{\sigma}{E_i} \quad [3.15]$$

dove E_i è il valore del modulo elastico istantaneo del materiale.

Se si lascia agire nel tempo la tensione costante σ , a seguito del fenomeno della viscosità, la dilatazione tenderà ad aumentare nel tempo di una quantità ε_t differita che sarà in generale funzione non lineare dello stato tensionale e del tempo t . È possibile la definizione di un coefficiente ϕ_t pari al rapporto tra la deformazione differita al tempo generico e quella al tempo iniziale data dalla seguente relazione:

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{t,0}} \quad [3.16]$$

dove ϕ_t è funzione del livello tensionale¹⁰. Risulta in genere complicato tener conto della variazione del fenomeno in funzione dello stato tensionale, per cui in genere nei codici di calcolo si preferisce semplificare il fenomeno e considerare il coefficiente ϕ_t indipendente dal livello raggiunto dallo stato tensionale ed assumere dei valori forfettari, riconducendosi alla teoria della viscosità lineare. La deformazione differita per viscosità, al tempo t è funzione lineare della tensione iniziale e ciò consente di esprimere:

$$\varepsilon_{t,tot} = \varepsilon_{t,0} + \varepsilon_t \quad [3.17]$$

$$\varepsilon_{t,tot} = \varepsilon_{t,0} + [1 + \phi_t] \quad [3.18]$$

$$\varepsilon_{t,tot} = \frac{\sigma}{E_i/[1 + \phi_t]} \quad [3.19]$$

da cui è possibile calcolare la deformazione al tempo t considerando il materiale dotato di un modulo elastico fittizio E_t ridotto della quantità $[1 + \phi_t]$:

$$E_t = \frac{E_i}{[1 + \phi_t]} \quad [3.20]$$

Per la determinazione del fattore ϕ_t è possibile ricorrere alla formulazione proposta nei paesi scandinavi per il legno strutturale (Ranta-Maunus, 1983):

$$\phi_t = 0,5 \cdot t^{0,3} \quad [3.21]$$

in cui il tempo t è misurato in anni, con un valore massimo di ϕ_t pari a 2 (Giordano, 1993).

Le stesse Norme Tecniche per le Costruzioni indicano di tener conto del comportamento reologico del legno considerando la deformazione a lungo termine mediante un fattore correttivo legato al coefficiente k_{def} ¹¹ che tiene conto dell'aumento di deformabilità con il tempo causato dall'effetto combinato della viscosità, dell'umidità del materiale e delle sue variazioni secondo la relazione seguente:

$$E_{0_def} = E_0 \cdot \frac{1}{(1 + k_{def})} \quad [3.22]$$

¹⁰ È noto che anche per altri materiali da costruzione il fenomeno viscoso si innesca anche per bassi valori dello stato tensionale. Ricerche scientifiche hanno dimostrato come per livelli di tensione corrispondenti allo stato di servizio quasi permanente l'ipotesi di viscosità lineare sia la più corretta (Giordano, 1993).

¹¹ Si veda la Tab. 4.4.V – Valori di k_{def} per legno e prodotti strutturali a base di legno (NTC 2018).

3.3.2 Le verifiche secondo le normative vigenti

La verifica della sicurezza strutturale di un elemento avviene tramite la dimostrazione che la sollecitazione meccanica dovuta ai carichi cui è sottoposto è sempre più grande del valore della resistenza del materiale corrispondente. La differenza fra questi due valori può essere definita come il margine di sicurezza rispetto al cedimento strutturale e viene espressa di regola sotto forma di rapporto (Bernasconi et al., 2005).

Le Norme Tecniche per le Costruzioni stabiliscono che la valutazione della sicurezza debba essere svolta secondo il metodo agli stati limite, garantendo la verifica dei requisiti di resistenza, rigidità, funzionalità, durabilità e robustezza dei singoli componenti strutturali e dei collegamenti, agli stati limite ultimi e di esercizio. Per quanto concerne il materiale legno o i materiali a base di legno, occorre tener conto essenzialmente dell'effetto sul comportamento della durata dell'azione del carico e dell'umidità del legno.

Il progetto e la verifica di strutture realizzate in legno massiccio richiedono la conoscenza dei valori caratteristici di resistenza, modulo elastico e massa volumica costituenti il profilo resistente (Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Valori caratteristici individuanti il profilo resistente del legno massiccio.

Proprietà di resistenza		Proprietà di modulo elastico		Massa volumica	
Flessione	$f_{m,k}$	Modulo elastico parallelo medio	$E_{0,m}$	Massa volumica media	ρ_m
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	Modulo elastico parallelo caratteristico	$E_{0,05}$	Massa volumica caratteristica	ρ_k
Trazione perpendicolare	$f_{t,90,k}$	Modulo elastico perpendicolare medio	$E_{90,m}$	-	-
Compressione parallela	$f_{c,0,k}$	Modulo elastico tangenziale medio	G_m	-	-
Compressione perpendicolare	$f_{c,90,k}$	-	-	-	-
Taglio	$f_{v,k}$	-	-	-	-

I valori caratteristici per il legno massiccio, desunti da indagini sperimentali, sono riferiti a dimensioni standardizzate del provino definite dalle norme pertinenti. In particolare, per la determinazione della resistenza a flessione l'altezza della sezione trasversale del provino è pari a 150 millimetri e per la determinazione della resistenza a trazione parallela alla fibratura, il lato maggiore della sezione trasversale del provino è ugualmente pari a 150 millimetri. Ne consegue che, per elementi di legno massiccio a sezione rettangolare sottoposti a flessione o a trazione parallela alla fibratura, che presentino rispettivamente un'altezza o il lato maggiore della sezione

trasversale inferiore a 150 millimetri, i valori caratteristici $f_{m,k}$ e $f_{t,0,k}$ possono essere incrementati tramite un coefficiente moltiplicativo definito come segue:

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2} ; 1,3 \right\} \quad [3.23]$$

essendo h , espressa in millimetri, l'altezza della sezione trasversale dell'elemento inflesso oppure il lato maggiore della sezione trasversale dell'elemento sottoposto alla sollecitazione di trazione (CNR DT 206-R1, 2018).

La resistenza alla rottura del legno dipende in generale dall'umidità dello stesso: un aumento dell'umidità provoca una riduzione della resistenza alla rottura. I valori contenuti nelle norme per il calcolo di elementi strutturali sono normalmente riferiti ad un'umidità del legno del 12%, cioè ad una umidità relativa dell'aria del 65% e ad una temperatura di 20°C. La verifica della sicurezza deve tener conto delle condizioni climatiche in cui viene a trovarsi l'elemento considerato. Per questo vengono definite 3 classi di servizio:

- Classe di servizio 1: è caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20°C ed un'umidità relativa dell'aria circostante che non superi il 65%, se non per poche settimane all'anno;
- Classe di servizio 2: è caratterizzata da un'umidità dei materiali in equilibrio con ambiente a una temperatura di 20°C ed un'umidità relativa dell'aria circostante che superi l'85% solo per poche settimane all'anno;
- Classe di servizio 3: è caratterizzata da condizioni climatiche che prevedono umidità più elevate di quelle della classe di servizio 2.

In generale si può affermare che nella classe di servizio 1 rientrano tutti gli elementi che si trovano in ambiente chiuso e riscaldato; nella classe di servizio 2 tutti gli elementi in ambiente interno non riscaldato o gli elementi in ambiente esterno protetti dall'esposizione diretta agli agenti atmosferici; nella classe di servizio 3 gli elementi in ambiente esterno esposti direttamente agli agenti atmosferici. Anche la durata dell'azione del carico influenza la resistenza del materiale. In particolar modo, nel caso di sollecitazioni molto elevate, si riscontra una diminuzione della resistenza del materiale in caso di carichi di lunga durata. Ciò significa che si può contare su una resistenza del materiale più elevata in caso di carichi di breve durata. Anche in questo caso sono state definite delle classi di durata del carico, relative ad un carico costante attivo per un certo periodo di tempo nella vita della struttura. Per un'azione variabile la classe appropriata deve

essere determinata in funzione dell'interazione fra la variazione temporale tipica del carico nel tempo e le proprietà reologiche dei materiali.

Ai fini del calcolo si può assumere:

- il peso proprio e i carichi non rimovibili durante il normale esercizio della struttura, appartengono alla classe di durata permanente;
- i carichi permanenti suscettibili di cambiamenti durante il normale esercizio della struttura, appartengono alla classe di lunga durata;
- i carichi variabili degli edifici, appartengono alla classe di media durata;
- il sovraccarico da neve riferito al suolo q_{sk} , calcolato in uno specifico sito ad una certa altitudine, è da attribuire ad una classe di durata del carico da considerarsi in funzione delle caratteristiche del sito per altitudini di riferimento a_s inferiori ai 1000 metri, mentre è da considerarsi almeno di media durata per altitudini superiori o uguali a tale riferimento;
- l'azione del vento medio appartiene alla classe di breve durata;
- l'azione del vento di picco e le azioni eccezionali in genere appartengono alla classe di durata istantanea.

Gli effetti della durata del carico e dell'umidità del legno sono tenuti in considerazione tramite un unico coefficiente di correzione k_{mod} ¹² attraverso cui è possibile determinare i valori della resistenza del materiale. Il valore di progetto X_d di una proprietà del materiale o della resistenza di un collegamento viene calcolato tramite la relazione:

$$X_d = \frac{k_{mod} \cdot X_k}{\gamma_M} \quad [3.24]$$

dove X_k è il valore caratteristico della proprietà del materiale, γ_M il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale che per il legno massiccio è pari a 1,5 e k_{mod} il coefficiente correttivo sopra descritto. Se una combinazione di carico comprende azioni appartenenti a differenti classi di durata del carico si opterà per la scelta di un valore del coefficiente k_{mod} che corrisponde alla durata minore.

In termini di verifiche relative alle strutture lignee, le Norme Tecniche per le Costruzioni si limitano a riportare le formulazioni relative agli stati limite di esercizio ed agli stati limite ultimi

¹² Si veda la Tab. 4.4.IV – Valori di k_{mod} per legno e prodotti strutturali a base di legno (NTC 2018).

nelle casistiche più classiche, invitano il progettista a «fare riferimento a norme di comprovata validità» per tutte le altre situazioni. Risulta quindi opportuno riferirsi ad altre normative tecniche. Un utile supporto integrativo sono la norma europea UNI EN 1995-1-1:2005, nota anche come Euro-Codice 5, ed il documento DT 206-R1/2018, relativo alle istruzioni del Consiglio Nazionale delle Ricerche per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo delle strutture in legno, che approfondiscono casistiche specifiche, come ad esempio la verifica di compressione inclinata rispetto alla fibratura o la verifica dei collegamenti di carpenteria.

3.3.2.1 Le verifiche agli Stati Limite di Esercizio

Le deformazioni di una struttura, dovute agli effetti delle azioni applicate, degli stati di coazione, delle variazioni di umidità e degli scorrimenti delle unioni, devono essere contenute entro certi limiti accettabili, sia in relazione dei danni che possono essere indotti ai materiali e sia in relazione ai requisiti estetici ed alla funzionalità dell'opera. In generale nella valutazione delle deformazioni delle strutture si deve tenere conto della deformabilità dei collegamenti. Considerando il particolare comportamento reologico del legno, si devono valutare sia la deformazione istantanea che quella a lungo termine. La prima si calcola usando i valori medi dei moduli elastici per le membrature e il valore istantaneo del modulo di scorrimento dei collegamenti. La seconda può essere calcolata utilizzando i valori medi dei moduli elastici ridotti opportunamente mediante il fattore $1/(1 + k_{def})$, per le membrature ed i collegamenti.

In generale la deformazione finale u_{fin} provocata dal generico carico può essere valutata come la somma delle deformazioni istantanea e differita, tramite la seguente relazione:

$$u_{fin} = u_{ist} + u_{dif} \quad [3.25]$$

La freccia¹³ netta u_{net} di un elemento inflesso è data dalla somma della freccia dovuta ai soli carichi permanenti (u_1), dalla freccia dovuta ai soli carichi variabili (u_2), dedotta dell'eventuale controfreccia (u_0), qualora presente. Per una trave in semplice appoggio, con riferimento ad una corda congiungente i punti della trave in corrispondenza degli appoggi, si ottiene:

$$u_{net} = u_1 + u_2 - u_0 \quad [3.26]$$

Nel caso di strutture costituite da elementi o componenti aventi lo stesso comportamento viscoelastico, la deformazione totale finale $u_{tot,fin}$ relativa ad una certa condizione di carico, si può

¹³ Per freccia si definisce il valore dello spostamento ortogonale all'asse di un elemento.

valutare in maniera semplificata come:

$$u_{\text{tot,fin}} = u_{1,\text{inst}}(1 + k_{\text{def}}) + u_{21,\text{ist}}(1 + \psi_{21} \cdot k_{\text{def}}) + \sum_{i=1}^n [u_{2i,\text{ist}}(\psi_{0i} + \psi_{2i} \cdot k_{\text{def}})] \quad [3.27]$$

dove:

- $u_{1,\text{inst}}$ è la deformazione istantanea del carico permanente;
- $u_{21,\text{ist}}$ è la deformazione istantanea del carico variabile prevalente;
- $u_{2i,\text{ist}}$ è la deformazione istantanea dell'i-esimo carico variabile della combinazione.

I valori delle deformazioni totali finali, calcolate mediante le formulazioni sopra descritte, richiedono un'accurata valutazione nel caso di impalcati sottoposti in esercizio a un carico permanente tale da indurre tensioni massime da flessione indicativamente superiori al 30% del corrispondente valore caratteristico di resistenza (Circolare 21 gennaio 2019).

3.3.2.2 Le verifiche agli Stati Limite Ultimi

La resistenza di un elemento strutturale deve essere verificata in base alle sollecitazioni cui è sottoposto, nelle sezioni con la massima sollecitazione (Bernasconi et al., 2005). Per quanto riguarda le verifiche di resistenza le tensioni interne si possono calcolare nell'ipotesi di conservazione delle sezioni piane e di una relazione lineare tra tensioni e deformazioni fino alla rottura. A causa dell'anisotropia del materiale, gli stati tensionali di trazione e compressione devono essere verificati tenendo conto dell'angolo tra direzione della fibratura e direzione della sollecitazione. Oltre alle verifiche di resistenza devono essere eseguite le verifiche necessarie ad accertare la sicurezza della struttura e delle singole membrature nei confronti di possibili fenomeni di instabilità, in particolare per quanto attiene alla instabilità delle aste pressoinflesse e allo svergolamento delle travi inflesse. Per queste verifiche si devono utilizzare i valori caratteristici al frattile 5% per i moduli elastici dei materiali.

Le prescrizioni del presente paragrafo¹⁴ si riferiscono alla verifica di resistenza di elementi strutturali di legno massiccio aventi direzione della fibratura coincidente sostanzialmente con il proprio asse longitudinale e sezione trasversale costante, soggetti a sforzi agenti prevalentemente lungo uno o più assi principali dell'elemento stesso (Fig. 3.21).

¹⁴ Si è scelto di riportare le principali formulazioni di verifica da adottarsi per il caso-studio in esame, rimandando a testi di approfondimento la trattazione specifica e generale, ad es. Zan (2018).

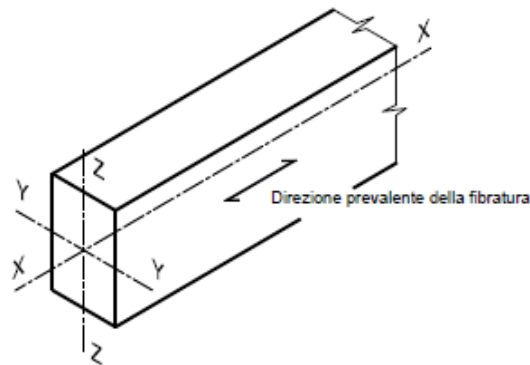


Fig. 3.21: Assi del sistema di riferimento dell'elemento strutturale (CNR DT 206-R1, 2018).

Trazione parallela alla fibratura

Per elementi sottoposti a sollecitazioni di trazione pura deve essere soddisfatta la condizione seguente:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_{netta}} \leq f_{t,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} \quad [3.28]$$

Nel caso di aste tese occorre tener presente che esse presentano praticamente sempre una riduzione della sezione alle estremità, nella zona delle connessioni, a causa dei fori e degli intagli necessari. Tale sezione ridotta risulta essere la sezione trasversale dell'elemento sottoposto alla sollecitazione maggiore e quindi determinante per la verifica. Nel caso normale di elementi a sezione costante, la verifica della resistenza deve essere eseguita quindi nella zona delle connessioni in cui sarà possibile tener in considerazione dell'eventuale azione flettente indotta dall'eccentricità.

Trazione perpendicolare alla fibratura

Nella verifica degli elementi soggetti a tale condizione è necessario tener conto del volume effettivamente sollecitato a trazione. Particolare attenzione deve essere posta per elementi soggetti a forze trasversali applicate in prossimità dei bordi della sezione in direzione tale da indurre tensione di trazione perpendicolare alla fibratura. Casi esemplificativi sono quelli di travi a semplice o doppia rastremazione o travi curve, per i quali deve essere verificata:

$$\sigma_{t,90,d} = \frac{N_d}{A_{netta}} \leq f_{t,90,d} \cdot k_{vol} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,90,k}}{\gamma_M} \cdot k_{vol} \quad [3.29]$$

dove il coefficiente k_{vol} riduce la resistenza della trazione in funzione del maggiore volume sollecitato ed è definito come segue:

$$k_{vol} = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{0,2} \leq 1 \quad [3.30]$$

dove V_0 è il volume di riferimento, pari a 0,01 e V è il volume uniformemente sollecitato, entrambi espressi in metri cubi.

Compressione parallela alla fibratura

Si tratta del caso di elementi sottoposti a compressione pura, per i quali deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{lorda}} \leq f_{c,0,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \quad [3.31]$$

In tale verifica non si tiene conto delle riduzioni della sezione, in quanto la trasmissione della compressione è normalmente possibile per semplice contatto verso i connettori o altri elementi con la conseguenza che gli intagli e i fori hanno un effetto molto meno sfavorevole rispetto al caso della trazione. Inoltre il comportamento meno fragile del materiale consente una migliore redistribuzione degli sforzi all'interno della sezione in prossimità di eventuali riduzioni della stessa. La verifica avviene quindi sulla base dell'area cosiddetta lorda (Bernasconi et al., 2005).

Nel caso di aste compresse, occorre per contro verificarne la stabilità, in quanto sottoposte al fenomeno dell'instabilità dell'equilibrio che può provocarne uno sbandamento laterale. La verifica è soddisfatta in funzione della seguente condizione:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{lorda}} \leq f_{c,0,d} \cdot k_{crit,c} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \cdot k_{crit,c} \quad [3.32]$$

dove $k_{crit,c}$ è il coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità, valutato per il piano in cui assume il valore minimo, e calcolato in funzione della snellezza relativa di colonna $\lambda_{rel,c}$, pari a:

$$\lambda_{rel,c} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad [3.33]$$

dove λ è la snellezza dell'elemento strutturale valutata per il piano in cui essa assume il valore massimo. Per il calcolo della tensione critica euleriana $\sigma_{c,crit}$ si usa il valore caratteristico del modulo di elasticità $E_{0,05}$ in quanto occorre considerare lo stato limite ultimo per il quale deve essere svolta la verifica. Quando $\lambda_{rel,c} \leq 0,3$ si deve porre $k_{crit,c}$ pari al valore unitario, altrimenti:

$$k_{crit,c} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} \quad [3.34]$$

con

$$k = 0,5 \cdot [1 + \beta_c(\lambda_{rel,c} - 0,3) + \lambda_{rel,c}^2] \quad [3.35]$$

dove β_c è il coefficiente di imperfezione che tiene conto delle differenti tolleranze rispetto alla rettilineità che si manifestano in una diversa curvatura iniziale dell'elemento e influenzano quindi direttamente il suo comportamento in caso di sbandamento. Per il legno massiccio β_c assume il valore di 0,2.

Compressione perpendicolare alla fibratura

La verifica dell'elemento si basa sulla resistenza a compressione ortogonale $f_{c,90,k}$ eseguita su provini cubici con impronta di carico uguale alle dimensioni del provino, al fine non considerare l'effetto di confinamento (Zan, 2018). Deve essere soddisfatta la seguente relazione:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_d}{A} \leq f_{c,90,d} \cdot k_{c,90} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \cdot k_{c,90} \quad [3.36]$$

dove $k_{c,90}$ è un coefficiente che tiene conto della configurazione del carico, della possibilità di rottura per spacco, nonché di un certo grado di deformazione di compressione. L'Euro-Codice 5 raccomanda che il valore di tale coefficiente sia assunto pari ad 1 a meno che non si applichino le modalità di disposizione degli elementi descritte nella stessa norma, per le quali il valore può assumersi fino al valore limite di $k_{c,90}=4,0$ (UNI EN 1995-1-1:2005).

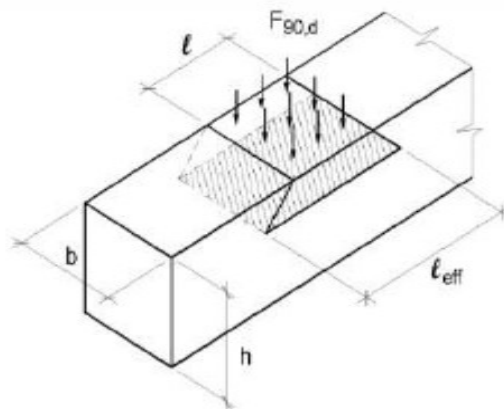


Fig. 3.22: Zona efficace di carico che tiene conto dell'effetto di confinamento (CNR DT 206-R1, 2018).

Nel caso di forza di compressione esterna $F_{90,d}$ agente ortogonalmente alla fibratura per una lunghezza l su una trave di larghezza b , il valore di calcolo della tensione di compressione normale all'asse della trave può essere determinato mediante l'espressione:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{90,d}}{b \cdot l_{\text{eff}}} \quad [3.37]$$

dove l_{eff} è la zona efficace di carico (Fig. 3.22).

Nel caso in cui, esternamente alla zona di appoggio e in direzione parallela alle fibre, sia presente una zona di superficie non caricata, potendo tale zona offrire un contributo alla resistenza alla compressione ortogonale alla fibratura (effetto di confinamento), la lunghezza efficace di appoggio l_{eff} può essere convenientemente aumentata rispetto alla lunghezza reale l secondo quanto di seguito indicato nella norma CNR DT 206-R1:2018. Per la resistenza di calcolo $f_{c,90,d}$, quando è possibile accettare valori più elevati della deformazione in direzione ortogonale alla fibratura, si può assumere un valore superiore — fino a 1,5 volte — rispetto a quello del profilo caratteristico del materiale utilizzato (Zan, 2018).

Compressione inclinata rispetto alla fibratura

A causa dell'elevata anisotropia del legno, per le sollecitazioni di compressione si deve considerare l'angolo α formato dalla direzione dello sforzo con la direzione delle fibre (Fig. 3.23). Per le compressioni inclinate si ha un notevole decadimento di resistenza in funzione dell'angolo α poiché, entro determinati limiti di angolazione, si verificano forze di scorrimento che tendono a far scivolare una porzione cuneiforme dell'elemento rispetto alla parte rimanente¹⁵ (Zan, 2018).

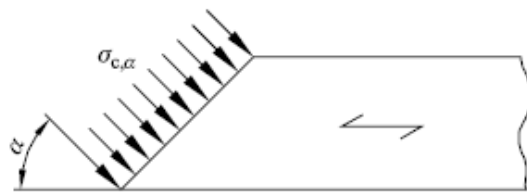


Fig. 3.23: Sollecitazione di compressione inclinata rispetto alla fibratura (UNI EN 1995-1-1:2005).

Nel caso di tensioni di compressione agenti lungo una direzione inclinata di un angolo α rispetto alla fibratura deve essere soddisfatta la seguente condizione:

¹⁵ È questo il caso tipico dei nodi puntone-catena di capriate lignee, in cui lo sforzo normale del puntone induce una compressione inclinata rispetto alla fibratura della catena, per la quale vi è il rischio di rottura del tacco della zona di appoggio, la cui verifica sarà trattata a seguire nell'ambito delle verifiche dei collegamenti e dei nodi lignei.

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_\alpha}{A} \leq f_{c,\alpha,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,\alpha,k}}{\gamma_M} \quad [3.38]$$

dove $f_{c,\alpha,k}$ è la resistenza caratteristica per la compressione con un angolo α rispetto alla fibratura ed è a sua volta valutata tramite la formulazione di Hankinson (1921) seguente:

$$f_{c,\alpha,k} = \frac{f_{c,0,k} \cdot f_{c,90,k}}{f_{c,0,k} \cdot \text{sen}^2 \alpha + f_{c,90,k} \cdot \text{cos}^2 \alpha} \quad [3.39]$$

derivante dalla formula di riduzione della resistenza assiale e dipendente dall'angolo α .

Flessione

Nel caso usuale di elementi inflessi con flessione semplice¹⁶, la verifica avviene se sono soddisfatte entrambe le seguenti condizioni:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [3.40]$$

$$k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [3.41]$$

dove k_m è un coefficiente che tiene conto convenzionalmente della redistribuzione delle tensioni e della disomogeneità del materiale nella sezione trasversale, da assumersi pari a 0,7 per sezioni rettangolari e pari ad 1 per altre sezioni. Le tensioni prodotte dalla flessione si ricavano dalle relazioni di Navier, note dalla Scienza delle Costruzioni. Le formulazioni [3.40] e [3.41] variano se la sollecitazione di flessione è accompagnata a sforzi di trazione o compressione, inducendo rispettivamente sollecitazioni di tenso o presso flessione. Sia le Norme Tecniche nazionali che quelle europee, raccomandano inoltre la verifica della stabilità allo svergolamento per gli elementi inflessi. Tale forma di instabilità è dovuta allo spostamento laterale della parte compressa dell'elemento, che provoca la rotazione della sezione (Bernasconi et al., 2005). Con riferimento alla tensione dovuta al massimo momento agente nel tratto compreso tra due successivi ritegni torsionali, deve essere soddisfatta la relazione:

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} \leq k_{\text{crit},m} \cdot f_{m,d} = k_{\text{crit},m} \cdot \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} \quad [3.42]$$

dove $k_{\text{crit},m}$ è un coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità di trave che tiene conto

¹⁶ Un elemento si definisce soggetto a flessione semplice se la sollecitazione agente avviene su un unico piano parallelo ad un asse principale della sua sezione di estremità.

della riduzione di resistenza dovuta allo sbandamento laterale. Per travi aventi una deviazione laterale iniziale rispetto alla configurazione rettilinea nei limiti di accettabilità, si possono assumere i valori di $k_{crit,m}$ definiti dalle Norme Tecniche¹⁷, in funzione della snellezza relativa di trave e della tensione critica per flessione calcolata secondo la teoria classica della stabilità.

Nei casi più semplici di una copertura i sostegni laterali contro lo svergolamento sono dati dall'orditura secondaria perpendicolare alle travi o ai puntoni delle capriate, con il risultato di una lunghezza libera di inflessione che corrisponde alla distanza fra tali sostegni (Fig. 3.24), dove l'elemento è libero di sbandare lateralmente.

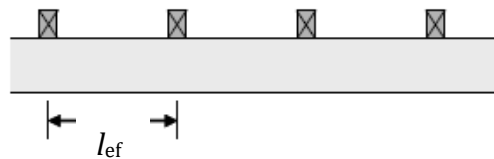


Fig. 3.24: Lunghezza libera di inflessione per elementi di copertura (Bernasconi et al., 2005).

In mancanza di valutazioni rigorose, la lunghezza efficace l_{ef} si può valutare come:

$$l_{ef} = \beta \cdot L \quad [3.43]$$

il cui valore è definito dalle regole normative in funzione della tipologia di carico, della posizione in cui è applicato il carico e delle condizioni di vincolo della trave in esame.

Taglio

La verifica della sollecitazione tagliante avviene nella sezione della trave in cui il suo valore è massimo e per la stessa deve essere soddisfatta la condizione:

$$\tau_d \leq f_{v,d} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \quad [3.44]$$

dove per la tensione tangenziale si utilizza la legge di variabilità di Jourawski, nota dalla Scienza delle Costruzioni, avendo l'accortezza di considerare una larghezza della sezione trasversale che tenga conto dell'influenza delle fessurazioni presenti nell'elemento strutturale, così definita:

$$b_{ef} = k_{ef} \cdot b \quad [3.45]$$

dove b è la larghezza reale della sezione e k_{ef} un coefficiente di fessurazione da porsi pari a $2/f_{v,k}$.

¹⁷ Si veda il § 4.4.8.2.1 – Elementi inflessi delle NTC.

Per sollecitazioni di taglio deviato, scomponibili lungo due direzioni principali ortogonali, è necessario determinare la tensione tangenziale di verifica in funzione di dette componenti, mentre per sollecitazioni di torsione o di taglio e torsione si rimanda direttamente alla consultazione dei documenti normativi, così come per tutte le specifiche delle formule esposte.

In considerazione del caso-studio oggetto del presente elaborato, si ritiene doveroso riportare brevemente alcune indicazioni in termini di aggregati — in particolare capriate lignee — secondo quanto stabilito dall'Euro-Codice 5 (UNI EN 1995-1-1:2005), si raccomanda:

- per capriate caricate in modo predominante in corrispondenza dei nodi, che la somma dei livelli di carico combinati di pressoflessione sia limitata a 0,9;
- per elementi compressi che la lunghezza efficace per la verifica della resistenza nel suo piano sia generalmente assunta come la distanza fra due punti adiacenti di inversione della freccia;
- nel caso sia eseguita un'analisi semplificata per capriate caricate in corrispondenza dei nodi, che i livelli di carico a tensione e a compressione, così come la capacità in corrispondenza delle connessioni, siano limitati al 70%;
- che tutti i giunti siano in grado di trasferire una forza $F_{r,d}$ agente in qualsiasi direzione nel piano della capriata, assunta come forza di breve durata, agente su un legno in classe di servizio 2, con valore: $F_{r,d} = 1,0 + 0,1 \cdot L [kN]$.

3.3.2.3 Le verifiche dei collegamenti

I collegamenti tradizionali di carpenteria lignea¹⁸ presentano un comportamento meccanico caratterizzato dalla modalità di trasmissione degli sforzi attraverso le superfici a contatto in dipendenza anche dell'attrito tra le stesse e, pertanto, possono essere classificati come vincoli monolateri. Le istruzioni redatte dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR DT 206-R1/2018) raccolgono una casistica dei nodi strutturali più ricorrenti, spesso presenti nel costruito storico esistente tra gli elementi che costituiscono le capriate, quali il collegamento puntone-catena, monaco-saette o monaco-puntoni. La loro realizzazione è avvenuta attraverso intagli e dentature per le quali è necessario verificarne i limiti dimensionali al fine di evitare un eccessivo indebolimento dei singoli elementi lignei.

¹⁸ Si veda il § 2.3.2 – Principali collegamenti tradizionali.

Unione a dente semplice

Nel caso di unione a dente singolo, la profondità di intaglio t_v deve soddisfare le seguenti condizioni, i cui valori intermedi possono essere interpolati linearmente:

$$t_v \leq \begin{cases} h/4 & \text{per } \alpha \leq 50^\circ \\ h/6 & \text{per } \alpha > 60^\circ \end{cases} \quad [3.46]$$

dove h è l'altezza dell'elemento ligneo intagliato ed α l'angolo di raccordo.

Nel caso di unione a dente singolo simmetrico, come per il nodo monaco-saette (Fig. 3.25), la dimensione di ogni intaglio, indipendentemente dall'angolo di raccordo, può risultare al massimo pari ad 1/6 dell'elemento intagliato.

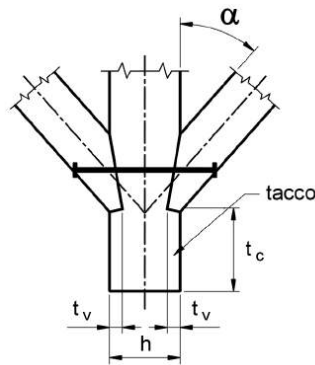


Fig. 3.25: Unione a dente simmetrico puntone-saette (CNR DT 206-R1, 2018).

Gli elementi strutturali convergenti nei nodi realizzati con unioni di carpenteria devono essere opportunamente verificati considerando l'effettiva distribuzione delle sollecitazioni all'interno dell'unione stessa. Il valore di progetto della capacità portante di una connessione a dente singolo si determina sulla base del valore di progetto della resistenza a compressione della superficie frontale del dente con riferimento a quanto previsto per gli stati di sollecitazione di compressione inclinati rispetto alla fibratura. Le forze di attrito tra le superfici di contatto risultano trascurabili.

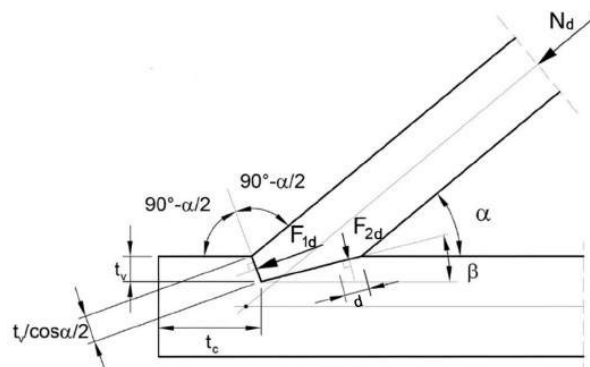


Fig. 3.26: Nodo punzone-catena a dente semplice (CNR DT 206-R1, 2018).

Nel nodo puntone-catena a dente semplice (Fig. 3.26), per un'inclinazione α del puntone sull'orizzontale, è conveniente inclinare il dente di $\alpha/2$ rispetto alla verticale, per minimizzare, sia per il puntone che per la catena, l'angolo di inclinazione della sollecitazione rispetto alla direzione della fibratura e non indurre la resistenza complessiva dell'unione allo schiacciamento. Per valutare la resistenza della connessione, nell'ipotesi di un puntone semplicemente compresso e trascurando la presenza di attrito tra le superfici, è necessario verificare, sia il dente a compressione inclinata rispetto alle fibre che il tacco a taglio. Decomposto il valore di calcolo dello sforzo normale N_d del puntone nelle due componenti perpendicolari alle due superfici dell'intaglio, $F_{1,d}$ inclinata di $\alpha/2$ rispetto all'orizzontale e $F_{2,d}$ inclinata di β rispetto alla verticale, le verifiche da effettuare risultano espresse dalle disequazioni seguenti:

$$\tau_d = \frac{F_{1,d}}{b \cdot t_c} \leq f_{v,d} \quad [3.47]$$

$$\sigma_{c,d} = \frac{F_{1,d}}{b \cdot [t_v / \cos(\alpha/2)]} \leq f_{c,\alpha/2,d} \quad [3.48]$$

$$\sigma_{c,d} = \frac{F_{2,d}}{b \cdot d} \leq f_{c,90-\beta,d} \quad [3.49]$$

dove b è la larghezza della sezione trasversale della catena e d è la lunghezza di verifica della zona compressa posteriore, che può assumersi cautelativamente pari a:

$$d = (0.25 \cdot t_v / \sin \beta) \quad [3.50]$$

Unione a dente arretrato

Le formulazioni indicate per l'unione a dente semplice sono da considerarsi valide anche per quella a dente arretrato, la cui geometria di intaglio è realizzata in modo tale da aumentare la lunghezza del tallone (Fig. 3.27), conseguendo una maggiore superficie resistente. In tal modo, però, lo sforzo del puntone da trasmettere presenta una maggiore inclinazione rispetto alla fibratura della catena. Il dente arretrato, infatti, è generalmente realizzato in direzione ortogonale all'asse del puntone e quindi la verifica a compressione risulta più gravosa rispetto al caso con dente semplice. Le verifiche da effettuare sono sempre quelle legate alla compressione inclinata rispetto alle fibre per la superficie del dente e al taglio per il tacco.

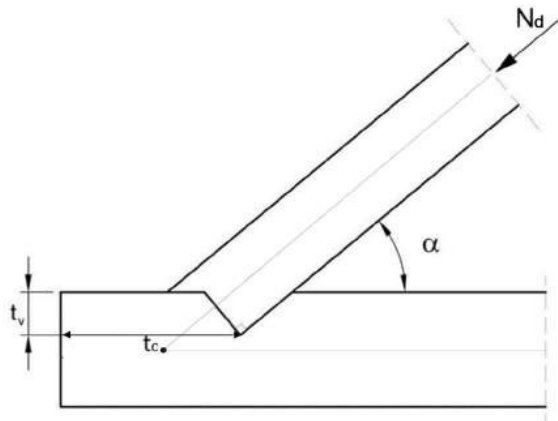


Fig. 3.27: Nodo puntone-catena a dente arretrato (CNR DT 206-R1, 2018).

Unione a 'dardo di Giove'

Tra le unioni di carpenteria utilizzate per collegare porzioni di travi, note fin dal XVIII secolo come evidenziato dalla trattatistica storica, il giunto a 'dardo di Giove' è quello che interessa le catene delle capriate lignee che debbano coprire ampie luci ed è capace di resistere a sforzi di trazione. Gli elementi di tale giunzione sono sagomati con denti secondo un disegno speculare e, successivamente al mutuo incastro, vengono forzati al contatto con cunei o biette lignee.

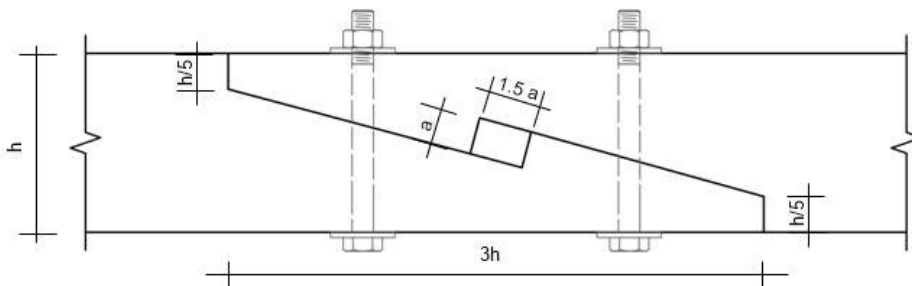


Fig. 3.28: Rapporti dimensionali del giunto a 'dardo di Giove' (CNR DT 206-R1, 2018).

Per il giunto a 'dardo di Giove' con cuneo (Fig. 3.28), oltre alla verifica dei rapporti dimensionali minimi, sono opportune la verifica di resistenza a taglio del dente [3.51], la verifica di resistenza a compressione inclinata rispetto alla fibratura del dente a contatto con il cuneo [3.52] e la verifica a compressione ortogonale alla fibratura del cuneo stesso [3.53].

$$\tau_d = \frac{N_d}{b \cdot l_e} \leq f_{v,d} \quad [3.51]$$

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_{2,d}}{b \cdot a} \leq f_{c,\alpha,d} \quad [3.52]$$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{2,d}}{b \cdot a} \leq f_{c,90,d} \quad [3.53]$$

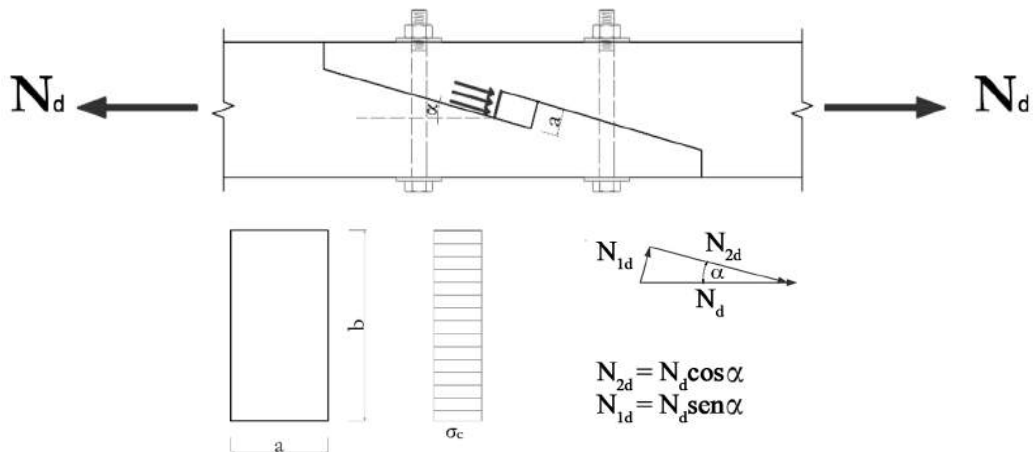


Fig. 3.29: Indicazioni per la verifica a compressione del dente a contatto del cuneo e del cuneo stesso nel giunto a 'dardo di Giove' (CNR DT 206-R1, 2018).

Unioni chiodate

I chiodi sono elementi cilindrici metallici di piccolo diametro che vengono inseriti nel legno per infissione. Nei collegamenti moderni, si opera con chiodi o viti ad aderenza migliorata ma nel costruito storico esistente è frequente imbattersi in unioni realizzate attraverso l'uso di chiodi in ferro battuto con gambo liscio. Ai fini della verifica di un collegamento chiodato è necessario individuare il numero di piani di taglio presenti, ossia il numero di sezioni efficaci per ciascun chiodo, mentre per la determinazione del valore caratteristico della capacità portante, devono essere considerati i contributi della resistenza allo snervamento, al rifollamento e all'estrazione. Nella progettazione odierna è necessario impedire che, prima del raggiungimento della resistenza dell'unione, non si verifichino specifici meccanismi di rottura fragile per il collegamento (Fig. 3.30), mentre per il costruito storico esistente ci si limita a verificare visivamente se tali meccanismi siano avvenuti o ne sia evitabile l'attivazione.

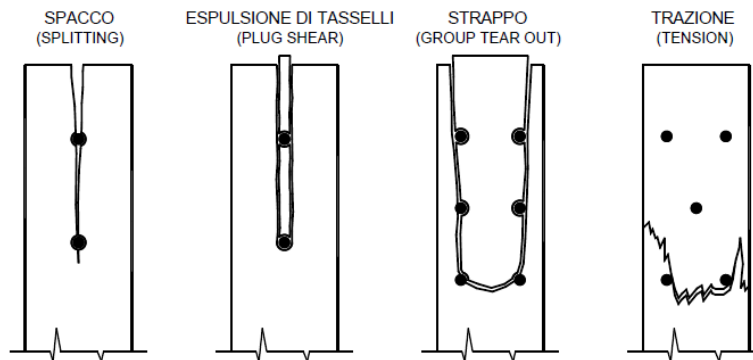


Fig. 3.30: Tipologie di rotture fragili per le unioni chiodate (CNR DT 206-R1, 2018).

Nel caso di unioni chiodate legno-legno, come ad esempio il collegamento tra puntone e saetta in una capriata, il valore caratteristico della capacità portante ($F_{v,Rk}$), per ciascun piano di taglio e ciascun mezzo di unione, è da assumersi pari al minimo tra i valori ottenibili dalle formule di Johansen di seguito riportate [3.54]:

$$F_{v,Rk} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1,k} t_1 d \quad (a) \\ f_{h,2,k} t_2 d \quad (b) \\ \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right] + \beta^3 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (c) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (d) \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta)M_{y,k}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (e) \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,k} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \quad (f) \end{array} \right. \quad [3.54]$$

dove il primo termine è la resistenza calcolata secondo la teoria di Johansen, mentre il secondo termine ($F_{ax,Rk}/4$) è il contributo alla resistenza dovuto all'eventuale effetto tirante, che può essere considerato solo nel caso di reale attivazione. Tale contributo, nel caso di chiodo a gambo liscio, può essere messo in conto nel rispetto del limite del 15% del primo termine.

Nel caso di collegamenti soggetti ad una sollecitazione combinata di carico assiale ($F_{ax,d}$) e carico tagliante ($F_{v,d}$), deve essere soddisfatta la seguente condizione:

$$\frac{F_{ax,d}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,d}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad [3.55]$$

dove $F_{ax,Rd}$ e $F_{v,Rd}$ sono le capacità portanti di calcolo dell'unione caricata rispettivamente con il solo carico assiale o laterale.

3.3.2.4 Altre verifiche di resistenza

Ulteriori osservazioni e verifiche sono da compiersi per elementi lignei di forma particolare come ad esempio le travi ad altezza variabile e le travi curve. Se per l'edilizia moderna tali configurazioni sono realizzate tramite macchinari di taglio a controllo numerico, nell'edilizia storica esistente sono legate all'esito delle lavorazioni delle manovalanze.

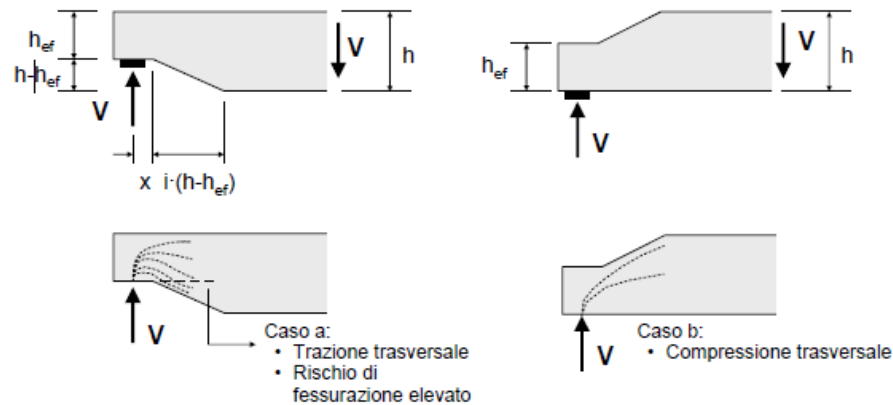


Fig. 3.31: Intagli agli appoggi e relativi stati tensionali indotti (Bernasconi et al., 2005).

Unioni con riduzioni di sezione

Unitamente alla verifica delle connessioni di carpenteria è necessario procedere alla verifica degli elementi lignei che, per la realizzazione delle stesse connessioni, presentino intagli o rastremazioni in prossimità degli appoggi o dei nodi. Per tali elementi è necessario tenere in considerazione lo stato tensionale causato dall'intaglio, riferendosi all'altezza effettiva ridotta h_{ef} della sezione trasversale, visto che può essere molto sfavorevole a causa del rischio di fessurazione e quindi portare al collasso precoce dell'elemento (Fig. 3.31). A causa dell'intaglio, infatti, la resistenza al taglio della sezione terminale della trave deve essere ridotta ben oltre alla riduzione geometrica dell'area della sezione (Bernasconi et al., 2005).

Sulla base delle indicazioni normative, la verifica può essere condotta verificando:

$$\tau_d = \frac{1,5 \cdot V_d}{b \cdot h_{ef}} \leq f_{v,d} \cdot k_v = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \cdot k_v \quad [3.56]$$

dove h_{ef} è l'altezza effettiva della sezione al netto dell'intaglio e k_v un coefficiente di riduzione della resistenza a taglio definito in funzione della configurazione dello stesso intaglio.

Elementi rastremati

In presenza di elementi con un'altezza variabile della sezione la direzione della fibratura diviene parallela ad uno dei bordi, solitamente l'intradosso di aste o travi. Nelle travi rettangolari a semplice rastremazione (Fig. 3.32) la presenza del lembo rastremato modifica lo stato tensionale e le tensioni per flessione assumono un andamento non lineare con il conseguente spostamento dell'asse neutro nella direzione opposta alla rastremazione.

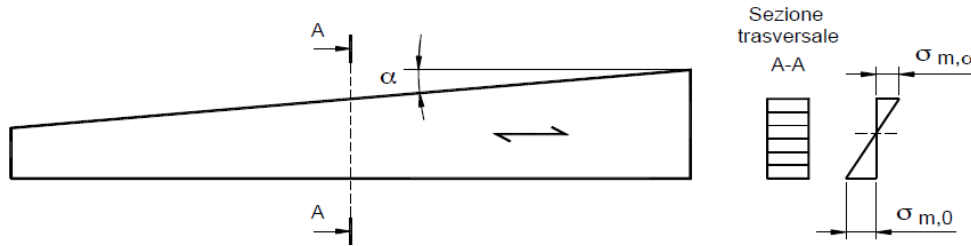


Fig. 3.32: Trave a semplice rastremazione (CNR DT 206-R1, 2018).

La determinazione rigorosa dell'andamento delle sollecitazioni a flessione può essere fatta ricorrendo alla teoria dell'elasticità; tuttavia un'espressione semplificata ma sufficientemente approssimata è quella fornita da Riberholt [3.57] in funzione del rapporto M/W , per le tensioni normali che si determinano parallelamente ai bordi della trave rastremata (Zan, 2018).

Le tensioni dovute alla flessione sono pari a:

$$\sigma_{m,\alpha,d} = k_{m,\alpha} \cdot \frac{M_d}{W} \quad [3.57]$$

dove $k_{m,\alpha}$ è un coefficiente di rastremazione, calcolato in funzione dell'angolo di rastremazione $\alpha \leq 10^\circ$, differente per il bordo parallelo alla fibratura [3.58] e per il bordo rastremato rispetto alla fibratura [3.59]:

$$k_{m,\alpha} = (1 + 4 \cdot \tan^2 \alpha) \quad [3.58]$$

$$k_{m,\alpha} = (1 - 4 \cdot \tan^2 \alpha) \quad [3.59]$$

La verifica risulta soddisfatta se le tensioni per flessione al bordo, parallelo e rastremato rispetto alla fibratura, della generica sezione trasversale soddisfano le seguenti condizioni:

$$\sigma_{m,0,d} = k_{m,\alpha} \cdot \frac{M_d}{W} \leq f_{m,d} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} \quad [3.60]$$

$$\sigma_{m,\alpha,d} = k_{m,\alpha} \cdot \frac{M_d}{W} \leq f_{m,\alpha,d} \quad [3.61]$$

dove $f_{m,\alpha,d}$ è la resistenza di calcolo a flessione nel caso di tensioni inclinate rispetto alla fibratura. Quest'ultima può essere determinata secondo la teoria di Hankinson (1921), sia nel caso di tensioni di trazione che di compressione, in funzione delle rispettive resistenze di calcolo perpendicolari alla fibratura dell'elemento:

$$f_{m,\alpha,d} = \frac{f_{m,d} \cdot f_{t/c,90,d}}{f_{m,d} \cdot \sin^2 \alpha + f_{t/c,90,d} \cdot \cos^2 \alpha} \quad [3.62]$$

4. IL CASO-STUDIO DI VILLA PISANI

Il capitolo, interamente dedicato al caso-studio dell'elaborato, presenta e descrive il Museo Nazionale di Villa Pisani a Stra dandone dapprima un inquadramento generale, accompagnato da un'analisi storico-critica del complesso strutturale, con un *focus* sulla copertura lignea del corpo centrale. Successiva è la descrizione dei rilievi e delle indagini eseguiti *in situ*, cui fanno seguito le prime analisi dei risultati e la valutazione dello stato di conservazione generale delle strutture lignee, appartenenti al sottotetto centrale e oggetto delle indagini strutturali.

4.1 Il Museo Nazionale di Villa Pisani

Il Codice dei Beni Culturali individua tra gli istituti e i luoghi di cultura i «complessi monumentali» formati da «pluralità di fabbricati anche di epoche diverse, che col tempo hanno acquisito, come insieme, un'autonoma rilevanza artistica, storica e etnoantropologica»¹⁹. A tale categoria di beni appartiene il complesso monumentale Villa Pisani Museo Nazionale, di proprietà demaniale, in consegna alla Direzione Regionale Musei Veneto che ne cura la gestione con il finanziamento del Ministero della Cultura, sotto la supervisione e tutela della Soprintendenza ai Beni Culturali del Veneto Orientale.

Il complesso sorge nel territorio di Stra in località un tempo detta Fossolovara. L'intera proprietà occupa vasta estensione di terreno, pari a circa 11 ettari, racchiusa all'interno di un'ampia ansa del naviglio Brenta e delimitata a settentrione da una strada comunale. Le ragguardevoli dimensioni dell'edificio, i numerosi annessi e il vasto parco fanno di Villa Pisani forse la più splendida delle ville del patriziato veneto²⁰.

Oggi la Villa è un museo nazionale ed è immersa nel suo incantevole parco che offre ai visitatori viste scenografiche; tra le sue 114 stanze conserva arredi ed opere d'arte del XVII e XVIII secolo, tra cui una fatica di Giambattista Tiepolo, la 'Gloria della famiglia Pisani', affrescata sul

¹⁹ D.Lgs. 42/2004 – art. 101, c.2, lett. f.

²⁰ Fonte: culturaveneto.it.

controsoffitto della maestosa sala da ballo (Fig. 4.1), sita nel corpo centrale del fabbricato.



Fig. 4.1: Affresco di Gianbattista Tiepolo sul controsoffitto del salone centrale (©Mattia Rizzi, 2019).

4.1.1 Inquadramento geografico

Villa Pisani Museo Nazionale sorge a Stra, in provincia di Venezia, lungo la riviera del fiume Brenta, più precisamente nel punto in cui nasce il Naviglio, ramo minore che partendo da Stra arriva a sfociare nella laguna veneta. Il complesso, individuato dalle coordinate geografiche 45.4083051° di latitudine e 12.0125488° di longitudine, è delimitato a sud-est dal il corso fluviale Naviglio del Brenta, ad ovest da Villa Foscarini-Rossi, a nord dalla località Bassa, frazione del limitrofo Comune di Fiesso d'Artico (Fig. 4.2).

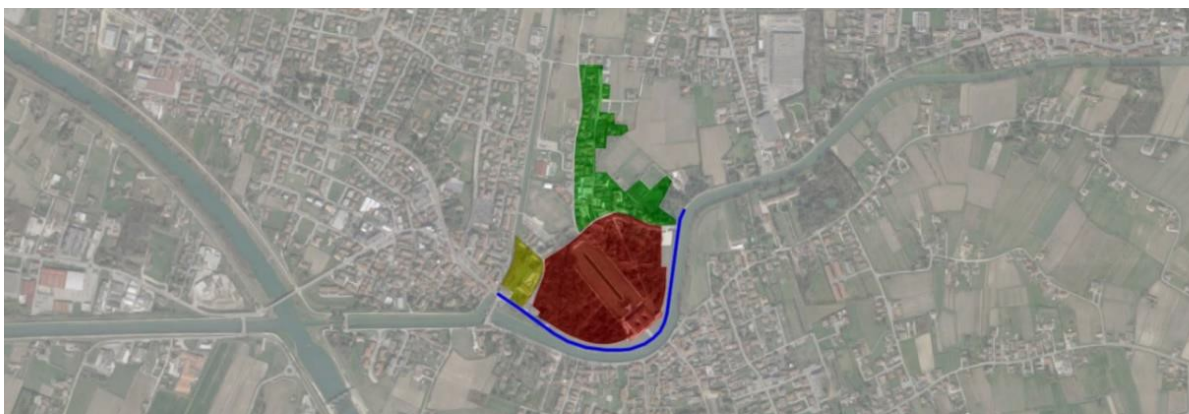


Fig. 4.2: Ortofoto del Comune di Stra con evidenziati: in rosso il complesso Villa Pisani Museo Nazionale, in blu l'ansa del Naviglio del Brenta, in giallo Villa Foscarini-Rossi ed in verde la località Bassa.

Dalla foto aerea (Fig. 4.3) appare evidente come il complesso sorga in posizione privilegiata e sia collocato sull'ansa del corso fluviale, principale via di comunicazione al tempo del massimo splendore della Villa. Il fitto parco verde lo isola dall'area residenziale del Comune di Stra, sviluppatasi nei secoli successivi, limitando l'accesso dalla Strada Regionale 11 Padana Superiore, che nel tratto che corre lungo l'argine corrisponde a via Doge Pisani.



Fig. 4.3: Vista aerea del complesso Villa Pisani Museo Nazionale (Fonte: villapisani.beniculturali.it).

4.1.2 Inquadramento vincolistico

Si riassumono in tale paragrafo gli elaborati cartografici reperiti ed esaminati ai fini dell'inquadramento del complesso monumentale, con particolare riferimento al Piano di Assetto del Territorio ed al Piano degli Interventi del Comune di Stra, ad oggi aggiornati al 17 agosto 2010.

4.1.2.1 Piano di Assetto del Territorio (P.A.T.)

Il Piano di Assetto del Territorio (P.A.T.), come definito dall'articolo 13 della legge regionale 11 del 2004, fissa gli obiettivi e le condizioni di sostenibilità degli interventi e delle trasformazioni ammissibili ed è redatto, dai Comuni, sulla base di previsioni decennali.

Dall'elaborato 1 del P.A.T., Carta dei Vincoli e della Pianificazione Territoriale (Fig. 4.4), si evince come l'area del complesso monumentale di Villa Pisani sia oggetto di vincolo paesaggistico, vincolo monumentale e di vincolo paesaggistico sui corsi d'acqua, ai sensi del D. Lgs 42/2004; e sia inoltre oggetto di vincolo sismico secondo l'O.P.C.M 3274/2003 – Grado 4.



Fig. 4.4: Estratto della Carta dei Vincoli e della Pianificazione Territoriale (Fonte: comune.stra.ve.it).

Villa Pisani, inoltre, è compresa nella zona identificata come centro storico e quindi oggetto di pianificazione di livello superiore.

Dall'elaborato 2 del P.A.T., Carta delle invarianti (Fig. 4.5), si evince che l'area del complesso monumentale è un'invariante di natura storico-monumentale in quanto collocato in ambito di edifici storico-monumentali.



Fig. 4.5: Estratto della Carta delle Invarianti (Fonte: comune.stra.ve.it).

Dall'elaborato 3 del P.A.T., Carta delle Fragilità (Fig. 4.6), si evince che l'area del complesso monumentale di Villa Pisani sorge in terreni idonei alla condizione di tipo B (ex terreni mediocri) dove l'edificabilità è consentita a particolari condizioni. Si tratta di terreni poco permeabili a granulometria prevalentemente limosa. La soggiacenza della falda è tra 1-2 m.

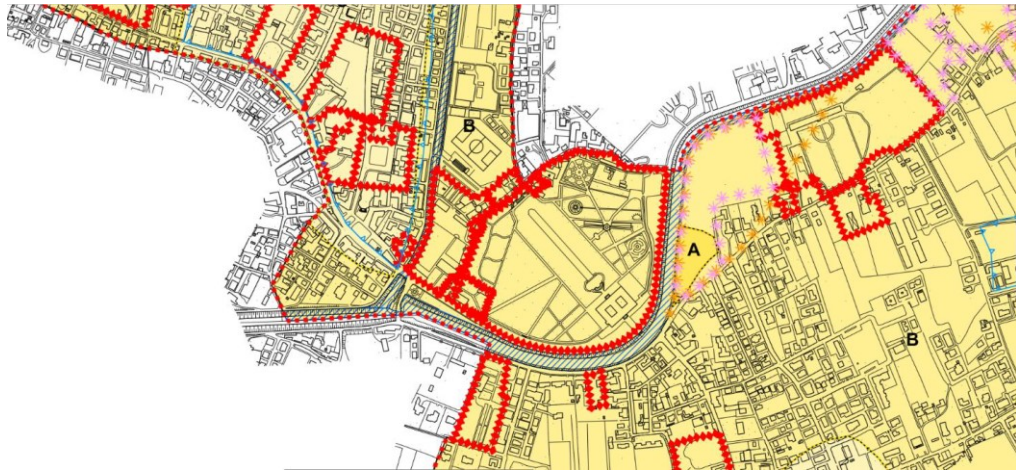


Fig. 4.6: Estratto della Carta delle Fragilità (Fonte: comune.stra.ve.it).

L'area di Villa Pisani, inoltre, è identificata come di interesse storico, ambientale e artistico.

Dall'elaborato 4a del P.AT., Carta delle Trasformabilità – A.T.O. (Fig. 4.7), si evince che l'area del complesso monumentale di Villa Pisani rientra nell'Ambito Territoriale Omogeneo 1 (A.T.O. 1) definito come contesto urbano prevalentemente residenziale. Rientra inoltre nel limite urbano del sito ma non è individuata come area di urbanizzazione consolidata ed è infatti indicata la presenza di servizi di interesse comune maggiormente rilevanti, in riferimento al polo museale.

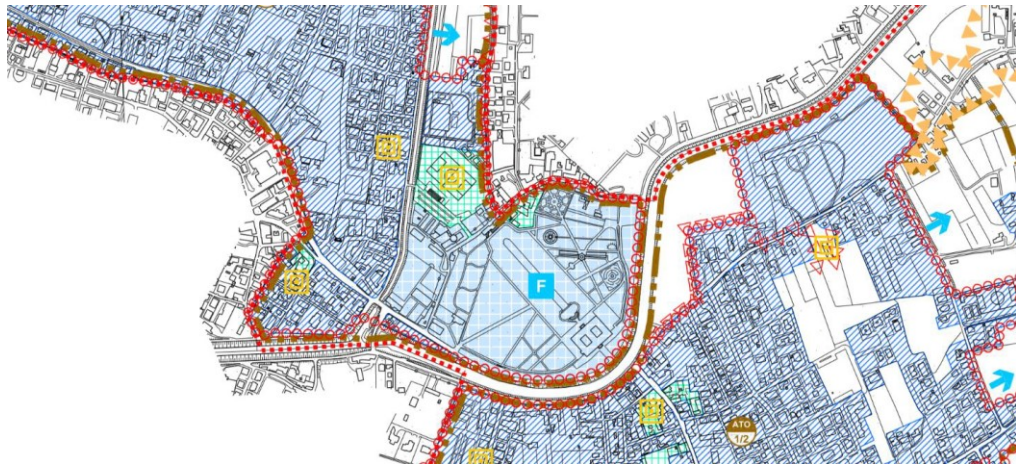


Fig. 4.7: Estratto della Carta delle Trasformabilità – A.T.O. (Fonte: comune.stra.ve.it).

Dall'elaborato 4b del P.AT., Carta delle Trasformabilità – Valori e Tutele (Fig. 4.8), si evince che le costruzioni del complesso di Villa Pisani sono individuate nella pubblicazione dell'Istituto Regionale per le Ville Venete. L'area del complesso è una pertinenza scoperta da tutelare, con la presenza interna all'area stessa di elementi lineari, corridoi ecologici di connessione.

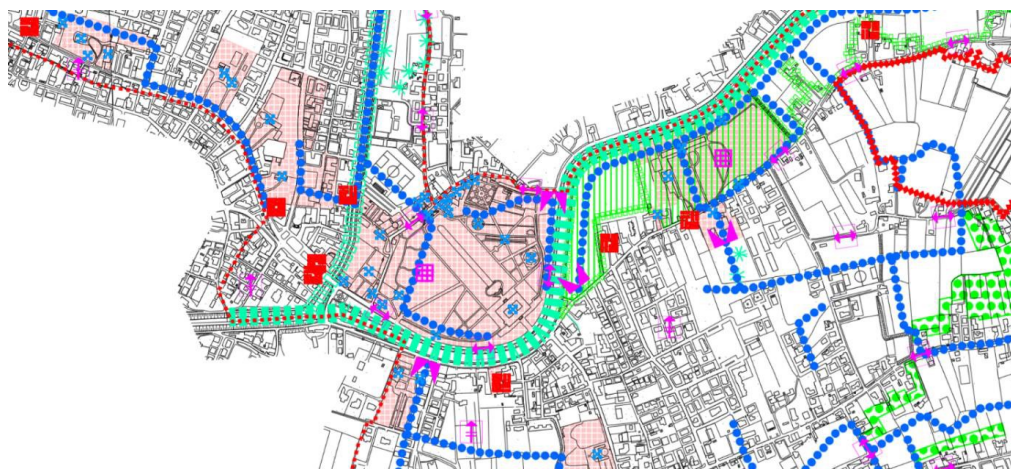


Fig. 4.8: Estratto della Carta delle Trasformabilità - Valori e Tutele (Fonte: comune.stra.ve.it).

4.1.2.2 Piano degli Interventi (P.I.)

Il Piano degli interventi (P.I.) disciplina l'assetto edilizio e lo sviluppo in generale del territorio comunale, considerandone la totalità, ed è redatto sulla base di previsioni quinquennali.

Dall'elaborato P01-Vincoli e Tutele (Fig. 4.9) del P.I. vigente, si evince ai sensi del D.Lgs. 42/2004 che il complesso di Villa Pisani è una pertinenza scoperta da tutelare e le costruzioni appartenenti al complesso sono sottoposte a vincolo monumentale. Vige inoltre un vincolo paesaggistico ai sensi dell'art. 136 D. Lgs. 42/2004. Tutte le costruzioni del complesso di Villa Pisani sono vincolate in quanto identificate come appartenenti alla categoria 'Ville Venete'.

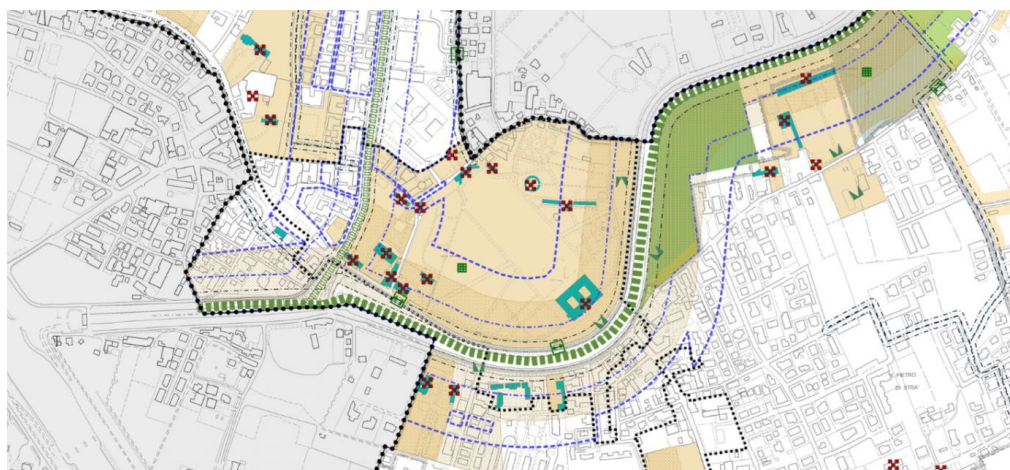


Fig. 4.9: Estratto del Piano Interventi - Elaborato P01: Vincoli e Tutele (Fonte: comune.stra.ve.it).

Dall'elaborato P02 - Invarianti e Fragilità (Fig. 4.10) del P.I. vigente, si evince che la zona del complesso monumentale di Villa Pisani identifica un'invariante di natura storico-monumentale, nello specifico per la presenza di edifici di valore storico-monumentale.

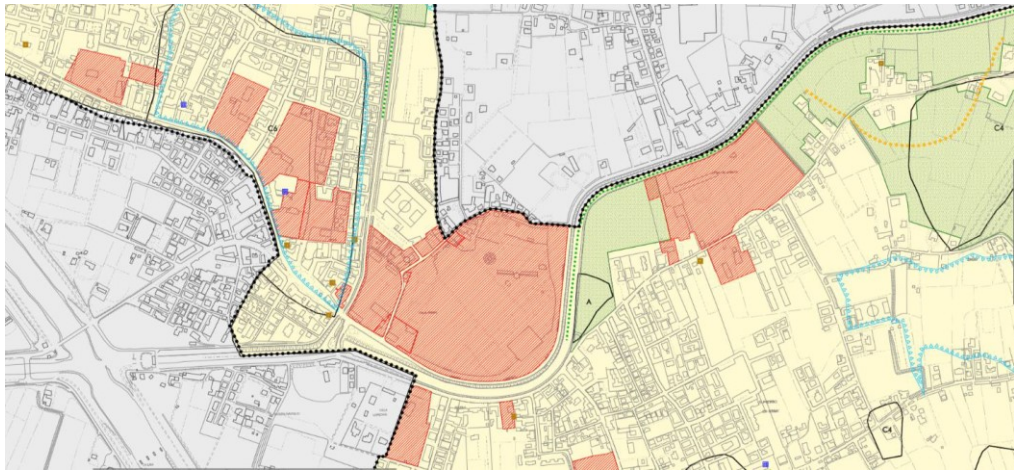


Fig. 4.10: Estratto del Piano Interventi – Elaborato P02: Invarianti e Fragilità (Fonte: comune.stra.ve.it).

Dall’elaborato P03 – Disciplina del suolo (Fig. 4.11) del P.I. vigente, si evince che il complesso di Villa Pisani è area di vincolo e tutela in quanto area privata. Vi sussiste un vincolo monumentale in ogni costruzione del complesso. Gli edifici vincolati sono tutti schedati con numeri di riferimento, la Villa principale oggetto di studio ha come riferimento il numero 75.

Nei pressi della stessa è presente un ramo secondario del fiume Brenta, il Naviglio del Brenta che risulta essere un corso d’acqua tutelato secondo una fascia di tutela idrografica principale che rientra anche nella zona del complesso di Villa Pisani Museo Nazionale. Parte del giardino è oggetto di vincolo paesaggistico ai sensi dell’art.142 del D.lgs. 42/2004. Vi è, inoltre, un cono visuale sottoposto a tutela, individuato dal limite del corso d’acqua e in direzione del prospetto sud-est del fabbricato.

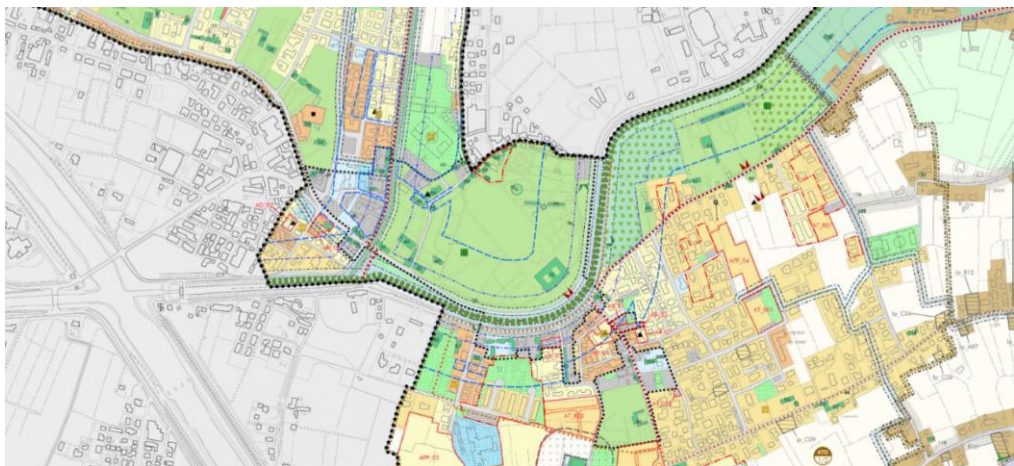


Fig. 4.11: Estratto del Piano Interventi – Elaborato P03: Disciplina del suolo (Fonte: comune.stra.ve.it).

Dall’elaborato P04 – Centro urbano e aree degradate (Fig. 4.12) del P.I. vigente, si evince che il complesso è collocato all’interno del centro abitato ai sensi del D.lgs. 285/1992.

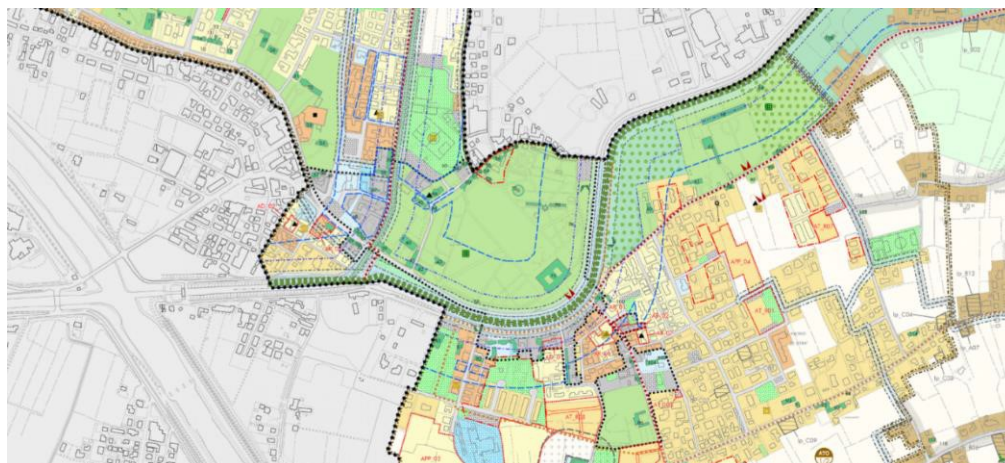


Fig. 4.12: Estratto del Piano Interventi - Elaborato P04: Centro urbano e aree degradate (Fonte: comune.stra.ve.it).

4.1.3 Inquadramento geologico

Dalla consultazione della Carta Litostratigrafica della Regione Veneto (Fig. 4.13) si evince che il complesso monumentale di Villa Pisani si colloca su un terreno formato da depositi alluvionali, fluvio-glaciali, lacustri e paludosi, risalente al periodo geologico più recente, noto in geologia come il Quaternario.

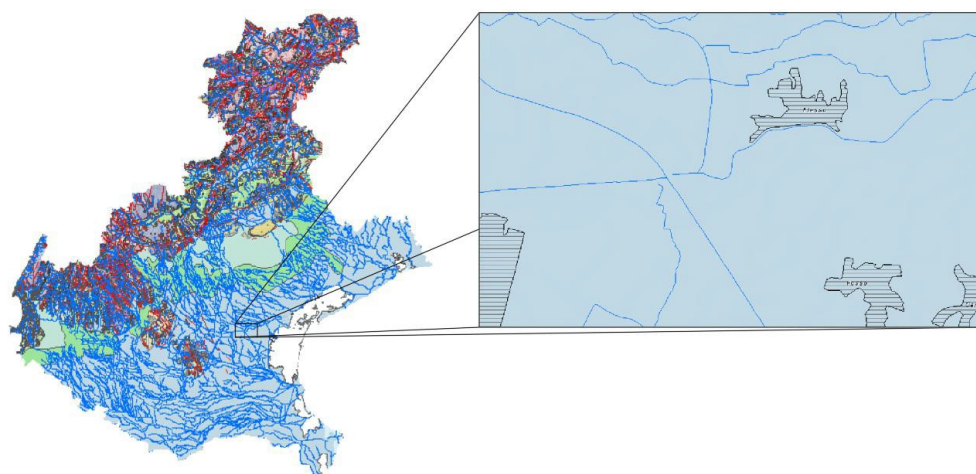


Fig. 4.13: Estratto della Carta Litostratigrafica (Fonte: gisgeologia.regione.veneto.it).

Consultando, invece, la Carta del Suolo della Regione Veneto (Fig. 4.14) si evince che il suolo su cui si colloca il complesso in esame è riconducibile alla tipologia BR, definita come bassa pianura recente, calcarea, a valle della linea delle risorgive, con modello deposizionale a dossi sabbiosi e piane e depressioni a depositi fini, risalenti all'epoca dell'Olocene²¹.

²¹ In geologia, l'Olocene è l'ultima epoca del periodo geologico Quaternario, successiva al Pleistocene.

Nello specifico è classificato come BR2, ossia relativo a suoli su dossi della pianura alluvionale, formatisi da sabbie e limi, da molto ad estremamente calcarei. Suoli molto profondi, a differenziazione del profilo da bassa a moderata, a decarbonatazione iniziale o nulla. Un'ultima e approfondita suddivisione, la BR2.2, ne descrive i caratteri specifici del suolo della zona con dossi fluviali del Brenta, pianeggianti (<0,2% di pendenza), il cui materiale parentale è costituito da sabbie e limi fortemente calcarei.

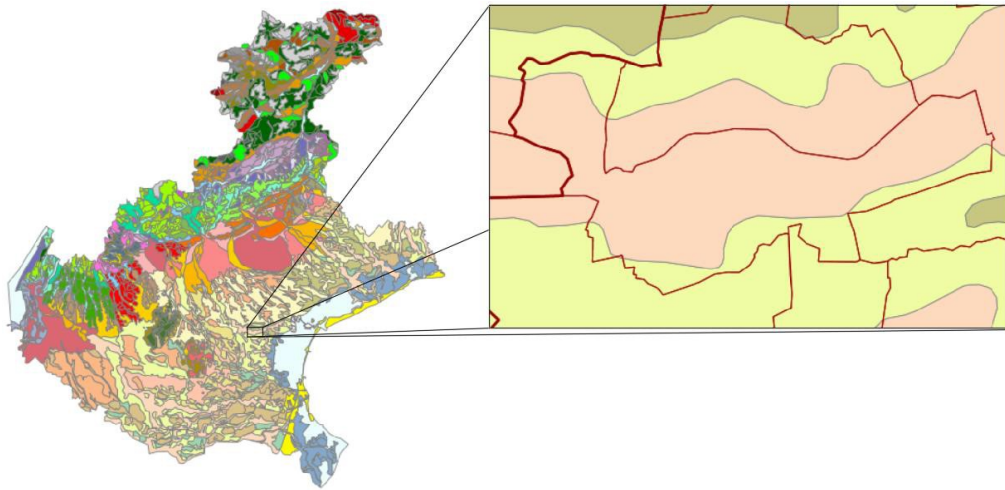


Fig. 4.14: Estratto della Carta del suolo (Fonte: gisgeologia.regione.veneto.it).

4.2 Analisi storico-critica

Alla base di ogni studio ed indagine strutturale deve sempre essere condotta una ricerca legata all'evoluzione storica del manufatto, evidenziandone i caratteri costruttivi e gli interventi eseguiti nell'arco di vita dell'opera, al fine di adempiere alla fase preliminare di anamnesi.

4.2.1 Cenni storici costruttivi

L'imponente Villa voluta da Alvise Pisani sorge oggi dove era presente una costruzione Seicentesca, demolita per far posto al complesso attuale. Sin dal 1615 infatti i Pisani possedevano a Stra una quindicina di campi coltivati, cintati e sui quali venne edificata un'abitazione con l'apposizione di una loggia a due ordini su di un basamento a scarpa (Fig. 4.15).

Figure di spicco della società veneziana avevano fornito notorietà alla famiglia Pisani nella Repubblica Serenissima, ma fu l'ambasceria svolta dallo stesso Alvise a Versailles a farle guadagnare il notevole prestigio necessario all'elezione a doge di Alvise nel 1735. A seguito dell'esperienza in Francia ed ai contatti con Luigi XIV, venne dato mandato all'architetto Girolamo

Frigimelica di progettare una nuova villa ispirata ad altre residenze reali dell'epoca. Il Frigimelica pensò ad una soluzione con un fabbricato entro quattro avancorpi, secondo uno schema che richiamava le sontuose dimore parigine e che doveva estendersi ben oltre lo spazio della villa preesistente. Vennero inoltre acquistati dal Doge oltre dieci ettari di terreno per creare un vasto parco; il tutto fu arricchito dalle maestranze e dagli artisti di fama che vi lavorarono. Il Frigimelica riuscì a dare inizio al cantiere, tuttavia non è noto lo stato di avanzamento dei lavori al 1721, anno in cui egli non vi sarà più presente, se non per mezzo di direttive spedite via missiva da Modena, dove morirà nel 1732.

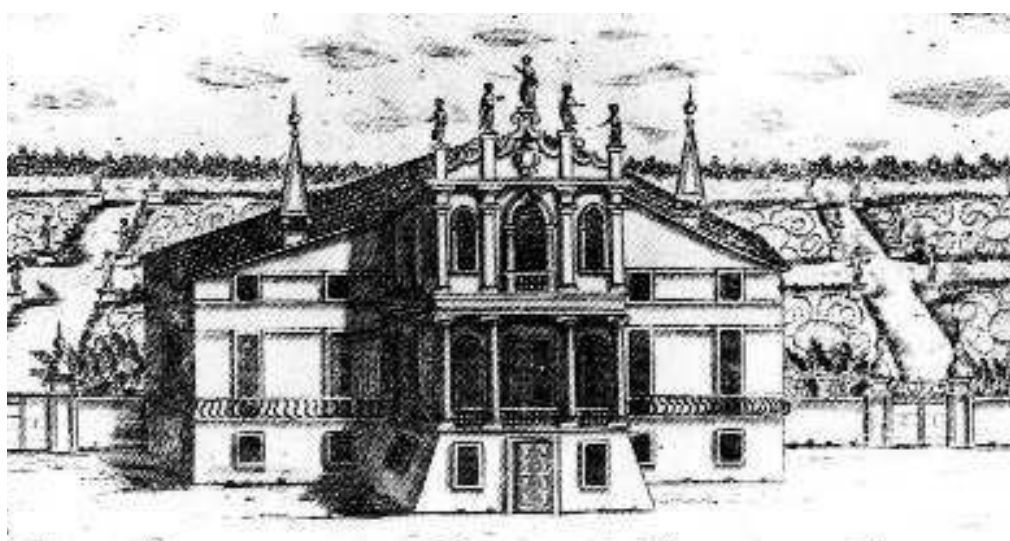


Fig. 4.15: Veduta della prima villa nell'incisione di G.F. Coronelli (Musei Civici, Venezia, 1709).



Fig. 4.16: Veduta della Villa nell'incisione di G.F. Costa (Musei Civici, Venezia, 1762).

Alla sua morte gli succedette Francesco Maria Preti, il quale prese in attenta considerazione il lavoro svolto dal suo predecessore. Secondo alcune ipotesi si pensa che le

modifiche apportate al progetto siano dovute ad un conto di spesa effettuato dal Preti che rivelava un costo eccessivo, oltre che al suo riguardo verso un'idea più classica di maestosità, ispirata alla tradizione palladiana. Ecco che piuttosto di optare per il rifacimento del progetto egli preferì intervenire mediante la riformulazione di alcune parti di esso. Le modifiche furono apportate a cantiere aperto, completandolo nel 1735, anno in cui Alvise Pisani venne eletto doge (Fig. 4.16). Villa Pisani Museo Nazionale presenta una pianta a forma rettangolare ed è connotata dal sistema dei due cortili gemelli affiancati a un atrio centrale con peristilio interno a colonne libere bugnate; i tre ambienti, collegati tra loro, sono attornati da un sistema di ambulacri, delimitati da campate ad arco inquadrata da un ordine di lesene bugnate. Tali vestiboli, replicati ai piani superiori, costituiscono anche il percorso distributivo principale. Sopra l'atrio colonnato, al primo piano, è posto il grande salone da ballo a doppia altezza, al quale si accede da due sale minori poste a nord e a sud. La facciata principale si articola su tre corpi gerarchicamente distinti e collegati tra di loro da elementi orizzontali. Il corpo centrale, a sette assi, presenta al piano terra un basamento bugnato mentre vede stucchi e decorazioni classiche nei due piani superiori, oltre i quali vi è il timpano, racchiuso nella cornice del frontone e recante lo stemma della Famiglia Pisani (Fig. 4.17).

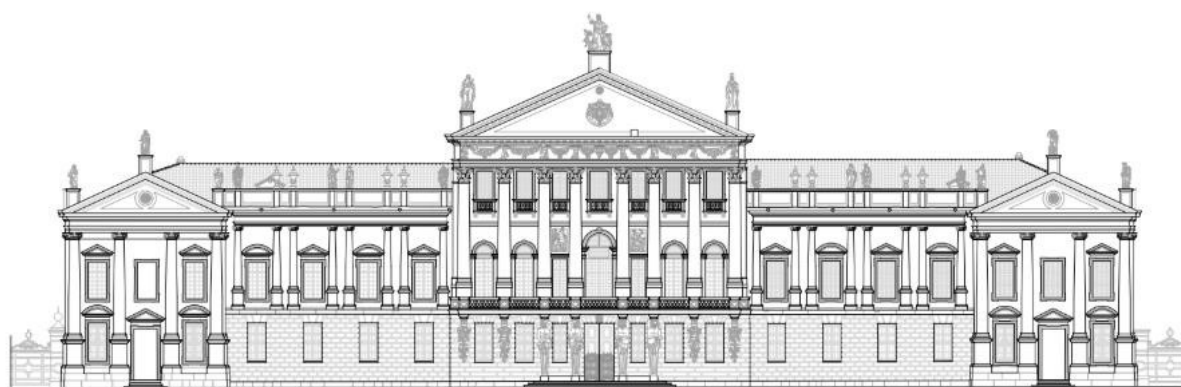


Fig. 4.17: Prospetto principale sud di Villa Pisani.

Le stanze all'interno sono in totale 114, tutte disposte lungo i quattro lati del quadrilatero, al centro del quale sono racchiuse la sala da ballo e le gallerie che circondano i due cortili. Le modifiche interne più rilevanti furono apportate nell'Ottocento a seguito dell'acquisto della Villa da parte di Napoleone Bonaparte, il quale vi si trasferì con la consorte in seguito alla caduta della Repubblica in favore dell'esercito francese. Le aree più estreme del prospetto sud, dove si trovavano una cappella e una rimessa per le carrozze, entrambe a doppia altezza, vennero trasformate rispettivamente in appartamento e cappella votiva privata, grazie all'introduzione di solai lignei. Il pianterreno fu adibito al corpo di guardia e ai servizi di corte e cambiò destinazione

d'uso nel 1849 quando, durante i moti insurrezionali scatenatisi nel veneziano, fu adibito ad ospedale per le migliaia di feriti, mentre la Villa era passata sotto la proprietà degli Asburgo già nel 1815. A seguito dell'Unità d'Italia il complesso venne dapprima messo all'asta e successivamente dichiarato monumento nazionale dal Ministero delle Finanze nel 1890.

Tra le funzioni ospitate dalla Villa, quelle di maggior rilievo furono, durante i primi anni del Novecento, l'Istituto per le ricerche idrotecniche dell'Università di Padova e, in concomitanza con la Prima Guerra Mondiale, l'ospedale convalescenziario militare. Nel periodo in cui essa fu affidata all'Università venne realizzata una vasca per sperimentazioni idrauliche al centro del parterre posteriore alla residenza. Solo alla fine del XX secolo, dopo un periodo di completo abbandono, rinacque nei confronti di Villa Pisani una maggiore sensibilità. Dal 1974, la gestione e responsabilità della Villa fu interamente assegnata alla Soprintendenza e tutto il complesso fu oggetto di sistematici lavori di restauro e conservazione. Nelle sale al piano superiore gli ambienti mantengono lo splendore e le tracce degli anni in cui essa fu protagonista, mentre al piano inferiore il lungo colonnato centrale accompagna chi entra verso il maestoso giardino ricco di architetture, permettendo di rivivere l'atmosfera tipica del periodo in cui la villa fu concepita. Attualmente la villa ospita funzioni distinte nei due piani: inferiormente vi sono prettamente funzioni destinate alla gestione dell'edificio, mentre al livello superiore si distribuisce il percorso espositivo (Angeletti et al., 2020).

4.2.2 Interventi di restauro

Rallo (2000) evidenzia che, tra la fine degli anni 1960 fino ai primi anni 1970, la Villa appariva ancora in buone condizioni e che, solo dopo tale periodo, la stessa fu abbandonata. In particolare, il parco e le sue architetture subirono i più grossi deterioramenti al punto che nel 1974 venne avviato un piano di recupero per le coperture delle scuderie e della *coffee-house*. Tali lavori furono interrotti nel 1976 in seguito al forte sisma del Friuli, poiché si dovette spostare l'attenzione sui danni strutturali subiti dall'edificio principale.

Nel 1979 furono destinati dei fondi per il consolidamento delle travi del salone del Tiepolo, i cui affreschi furono restaurati solo nel 1984, a causa di interventi di maggiore importanza in copertura e al pianterreno. Negli anni '90 la Villa è stata sottoposta a una completa verifica delle situazioni di degrado presenti, stabilendo la priorità degli interventi in base alla gravità dei danni. In generale si è riscontrata una estesa situazione di distacco e degrado dei soffitti voltati e per ciascuno di essi è stata effettuata una approfondita analisi con la relativa indicazione degli

interventi da effettuarsi in ordine di priorità, stabilendo quindi un intervento straordinario immediato per le aree più critiche e allestendo contemporaneamente un piano di interventi da effettuarsi negli anni successivi. Nello specifico il piano nobile non veniva mantenuto da svariati decenni, gli ultimi interventi che lo interessarono furono eseguiti negli anni '70 e riguardavano la copertura. Quest'ultima presentava in molteplici punti fenomeni di infiltrazioni che si rivelarono poi essere la principale causa del degrado delle strutture lignee di sostegno dei soffitti.

Come descritto da Rallo (2000), gli interventi di restauro interessarono in particolare i soffitti decorati delle varie sale, sostenuti da una struttura lignea costolonata alla quale sono inchiodate delle arelle in legno che hanno la funzione di sostenere gli intonaci, rifiniti a marmorino o in malta predisposta per l'affresco. I fenomeni di degrado interessavano il distacco di intonaco in molti casi, in altri andavano a colpire anche le arelle stesse, che risultavano marcescenti. Per la risistemazione di questa parte strutturale, non potendo operare dal basso, si fu costretti a smontare il pavimento in cotto del sottotetto così da poter intervenire dall'alto. L'operazione prevedeva la pulizia dai detriti e dallo sporco accumulato nel tempo seguita da un attacco della struttura lignea voltata ai muri portanti d'ambito, dunque la travatura secondaria che sorreggeva i soffitti doveva essere ricollegata alla travatura del tetto tramite imperniaggi (Figg. 4.18 a-b).



Figg. 4.18 a-b: Interventi di restauro sulle strutture lignee dei soffitti del piano nobile (Rallo, 2000).

L'intervento non si limitò alla semplice messa in sicurezza della copertura ma tentò di ridare leggibilità alle superfici decorate e affrescate, che ormai risultavano fortemente degradate dalle infiltrazioni e dai depositi di polvere. Si andò ad operare dapprima consolidando la superficie tramite l'utilizzo di carta giapponese e acido polivinilico, poi togliendo i tamponamenti di garze che erano state utilizzate in restauri precedenti per evitare cadute parziali. I residui delle vecchie

resine utilizzate per gli interventi precedenti furono rimossi, in più passaggi, tramite l'utilizzo di solventi applicati attraverso della carta, in maniera tale che questa assorbisse le resine una volta disciolte. In seguito allo smontaggio del pavimento del sottotetto della cappella soprastante l'atrio ovest, furono ritrovate le tracce di un incendio ben visibili nella struttura lignea portante dei controsoffitti, la parte bruciata o danneggiata fu sostituita o bruciata con la posa di nuove arelle. Per quanto concerne le superfici dipinte, che risultavano in uno stato di degrado più avanzato, si operò tramite delle operazioni di pulitura con impacchi e stucature delle microfessurazioni.

4.2.3 La copertura del corpo centrale

L'edificio costituente la Villa si sviluppa su due piani fuori terra con un terzo livello nel suo corpo centrale, in affaccio sul salone da ballo a doppia altezza. Al di sopra di tale livello vi sono gli ambienti del sottotetto, il cui colmo centrale si trova alla quota di circa 23 metri dal livello campagna. L'assetto strutturale dell'intero corpo di fabbrica è riconducibile alle tecniche ed ai materiali costruttivi dell'epoca di realizzazione e vede una struttura principale in mattoni di laterizio legati da malte di calce ed intonacati, mentre la copertura è realizzata a due falde tramite strutture principali a capriate lignee palladiane su cui insistono le orditure secondarie. Per il manufatto è identificabile un'unica unità strutturale (Fig. 4.19) che comprende l'intero edificio, caratterizzato per tutti i suoi tre corpi da elementi in elevazione portanti in muratura su cui poggiano gli orizzontamenti e le capriate lignee di copertura.

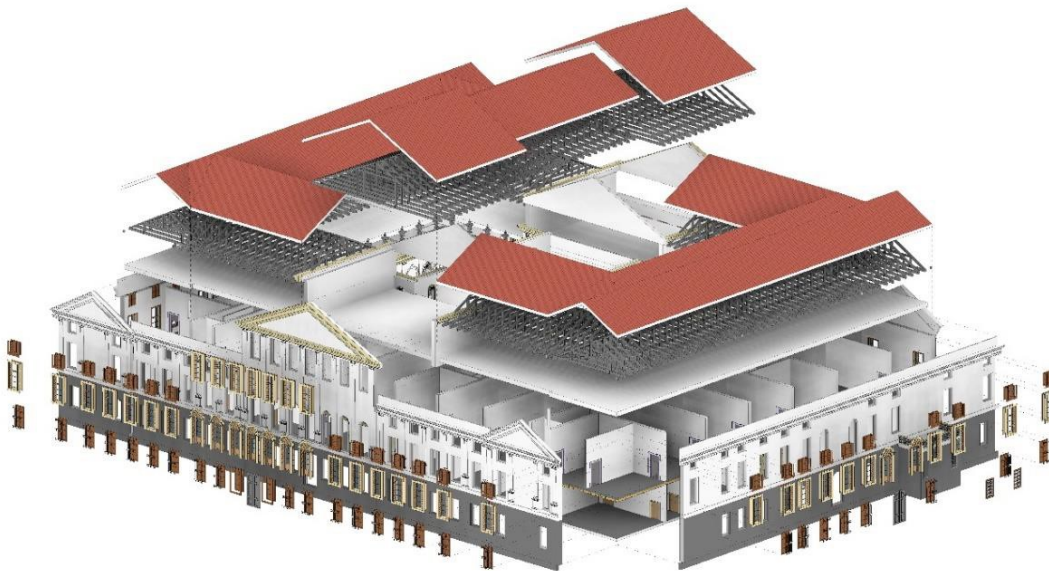


Fig. 4.19: Esploso assonometrico dell'unità strutturale di Villa Pisani.

La copertura del corpo centrale (Fig. 4.20), oggetto delle indagini strutturali e delle relative analisi del presente elaborato, è accessibile per le sole attività manutentive. L'accesso ai locali del sottotetto avviene dalle scale di servizio che conducono anche al piano ammezzato, oggi adibito a deposito, ed è stato consentito dalla Direzione del Museo per le finalità di rilievo e ispezione legate ad una convenzione stipulata tra lo stesso polo museale e la società Expin Srl, *spin-off* dell'Università di Padova.

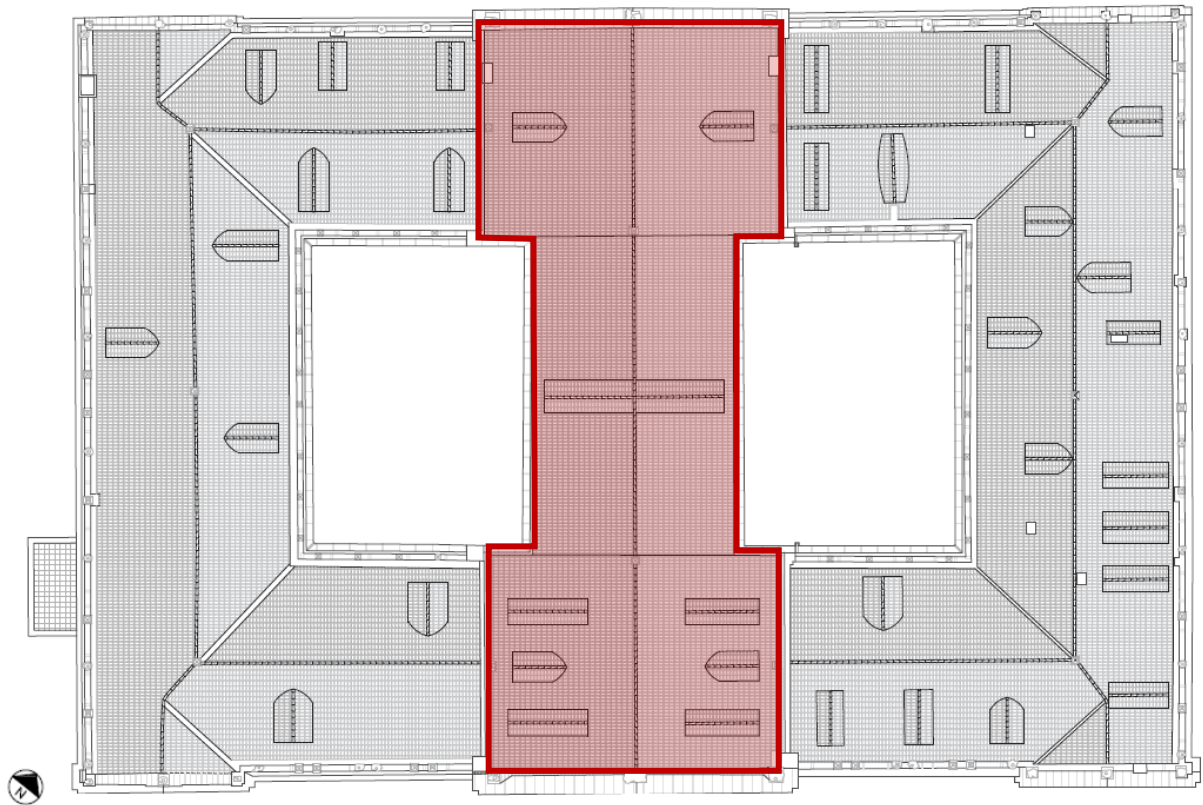


Fig. 4.20: Individuazione della copertura del corpo centrale di Villa Pisani.

Il corpo centrale vede la presenza di tre differenti locali — costituenti il sottotetto di copertura ed un tempo occupati dalla servitù — individuanti tre zone delimitate dalle murature che si elevano dai piani sottostanti, in particolare dalle sale del piano ammezzato (Zona A e Zona C) e dal salone da ballo (Zona B). Le strutture di copertura sono costituite da capriate lignee palladiane di differenti tipologie e dimensioni, poggianti direttamente sulle murature d'ambito del corpo centrale, dando origine ad una tipologia di copertura di tipo non spingente. Sono presenti aperture realizzate per mezzo di abbaini, poste simmetricamente rispetto al colmo. L'ispezione dei locali ed il concomitante rilievo in sito hanno permesso di investigare gli ambienti e soprattutto indagare la geometria e lo stato delle strutture lignee di copertura.

4.3 Rilievo in sito degli elementi lignei

Sulla base di quanto esposto nel Capitolo 3, si è proceduto al rilievo in sito degli elementi delle strutture lignee di copertura del corpo centrale della Villa, avendo cura di attenersi alle indicazioni delle norme UNI 11119:2004 ed UNI EN 17121:2019. Dovendo operare in collaborazione con tecnici e operatori del settore ligneo, si è svolta preliminarmente una riunione con i responsabili di Expin Srl e R-Struct Engineering Srl, società già operanti a Villa Pisani in virtù del progetto di monitoraggio dell'affresco della sala da ballo e del recupero degli ambienti del sottotetto, ai fini dell'organizzazione e pianificazione delle operazioni di rilievo, oltre che per ricevere informazioni sull'ispezione preliminare svolta dalle stesse società.

4.3.1 Rilievo geometrico e fotografico

A partire dal materiale digitale CAD fornito, basato su precedenti interventi di analisi e studi preliminari relativi ai solai e alla copertura²², è stato possibile creare una base geometrica di partenza. L'acquisizione di tali dati è stata svolta parallelamente all'ispezione visiva che ha consentito di classificare preliminarmente le strutture lignee in funzione delle tre zone del sottotetto, accertando la presenza di 31 capriate totali così suddivise:

- 12 capriate palladiane composte con saette nella 'Zona A';
- 8 capriate palladiane composte nella 'Zona B';
- 11 capriate palladiane composte con saette nella 'Zona C'.

Si è inoltre riscontrato come le capriate della 'Zona A' e quelle della 'Zona C' siano analoghe sia in termini dimensionali che tipologici, presentando una soluzione alla palladiana composta, con saette a sostegno dei puntoni e della controcatena, mentre come le capriate della 'Zona B' presentino una configurazione tipologica che richiama la capriata palladiana classica o all'italiana, descritta dal Mazzocchi nel suo trattato. Ai fini dell'esecuzione delle operazioni di rilievo, si è convenuto di individuare con una simbologia alfanumerica le 31 capriate oggetto di indagini (Fig. 4.21), definendo inoltre due principali 'Capriate Tipo' alla base delle successive analisi ed elaborazioni: la 'Capriata Tipo A-C' (Fig. 4.22) e la 'Capriata Tipo B' (Fig. 4.23).

²² Nel 1996 è stato eseguito un rilievo digitale a cura della Soprintendenza per i Beni Culturali e per il Paesaggio del Veneto Orientale a cui ha fatto seguito nel 2002 il progetto preliminare di restauro a cura degli arch. G. Monti e L. Cerocchi. A riguardo si veda De Giacometti e Barp (2002).

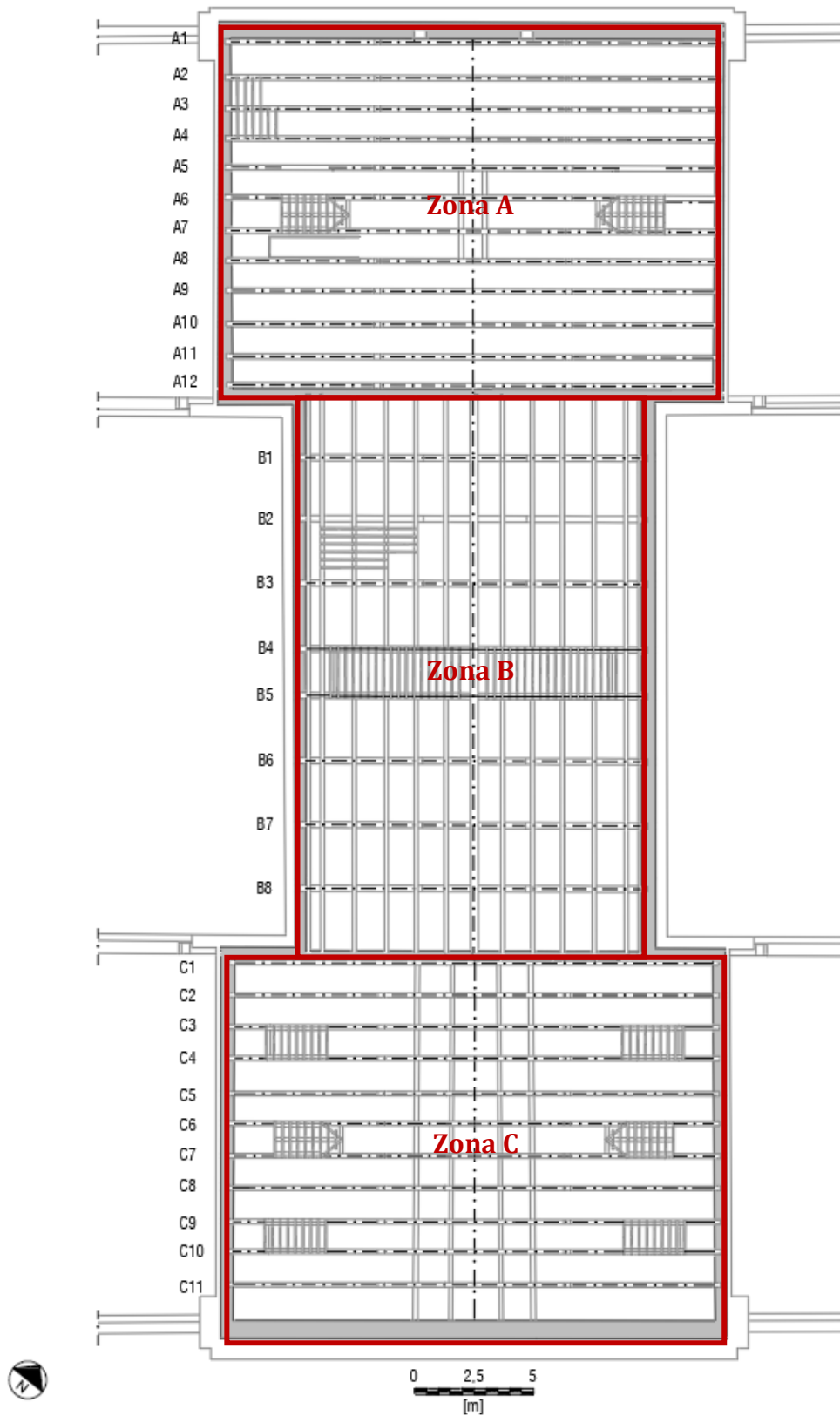


Fig. 4.21: Individuazione delle zone A, B, C del sottotetto centrale di Villa Pisani.

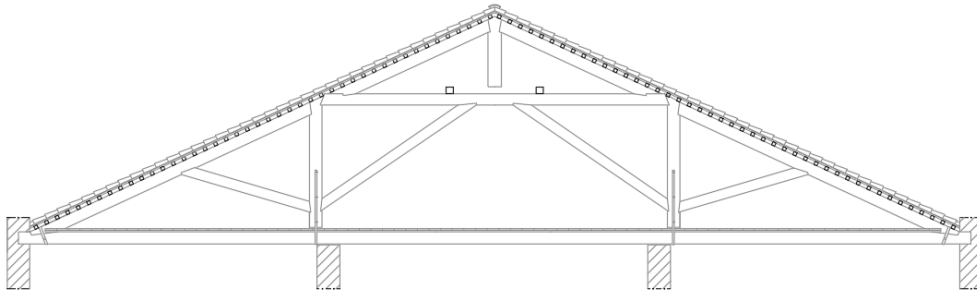


Fig. 4.22: Configurazione della capriata palladiana composta con saette delle Zone A e C.

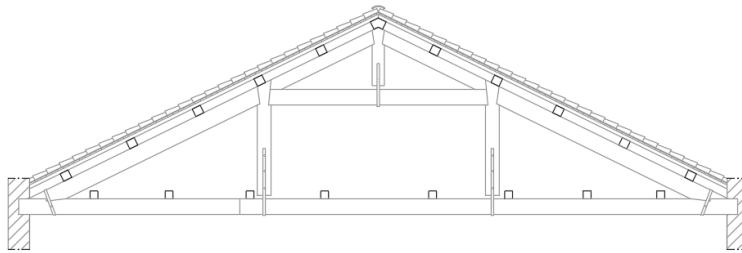


Fig. 4.23: Configurazione della capriata palladiana composta della Zona B.

Come raccomandato dalla norma UNI 11119:2004 «il rilievo geometrico deve essere eseguito in maniera tale da esplicitare fino a un livello di dettaglio ritenuto congruo al raggiungimento degli obiettivi dell'ispezione». Si è quindi proceduto alla rilevazione delle dimensioni e della forma delle aste componenti le capriate, avendo cura di numerarle per una più facile ed immediata individuazione; così come analogamente è stato operato per i nodi tra le stesse aste, dei quali è stato eseguito il rilievo sia geometrico che fotografico. Parallelamente si sono rilevati i parametri geometrici atti alla classificazione delle aste secondo la resistenza, quali smussi, nodi singoli, gruppi di nodi, inclinazioni della fibratura, fessurazioni e lesioni varie, annotando misure e rilievi su di un brogliaccio realizzato per ogni singola capriata (Fig. 4.24).

ASTA	SEZIONE (BxH)	LUNGHEZZA	SMUSSI	LESIONI	NODI SINGOLI	GRUPPO DI NODI	INCLINAZIONE FIBRATURA	NOTE
1								TESTA CATTOLATA COSTR. (VEDI SCALE)
2	22x27,5		/	RITIRO	4/22	/	<10%	
3	16x29	2,89	1	SUBDUE FACCE	3/24	/	~10%	LESIONI //
4	21x28	2,855	/	RITIRO	3,5/27	/	<10%	LOCALI SMUSSI DA USURA/DEGRADO
5	15,5x19,5	3,98	/	RITIRO	3/15	3(2,5+2)/12,5	<10%	
6	14,5x22	3,82	/	RITIRO (6-F.C.M)	3/24,5	(3+3,5)/21,5	<10%	
7	24,5x27,5	2,855	/	RITIRO	3,5/27	/	<10%	USURA CATTO NOTO
8	17x19	2,855	/	RITIRO?	3,5/16,5	/	<10%	FORTE DEGRADO, FORO SULL'INTO A 10,5m DA NODI
9	21,5x28,5		/	RITIRO	4,5/27,5	/	<10%	TESTA STAVE FACCE ANIMALIATA
10				RITIRO		/	~10%	
11				RITIRO		/	<10%	
12								NON RILEVABILE CAUSA SPERDITA DI ACQUA
13				RITIRO		/	<10%	

Fig. 4.24: Esempio di brogliaccio relativo al rilievo geometrico della 'Capriata Tipo A-C'.

A causa della presenza di rivestimenti e pavimentazioni o per l'eccessiva quota altimetrica, le dimensioni e le caratteristiche geometriche di alcuni elementi non sono state rilevabili nella loro totalità, se non per alcune capriate maggiormente ammalorate, per le quali sono state previste opportune e specifiche ispezioni. Per tutte le informazioni non reperibili e non ispezionabili, si è fatto riferimento al precedente rilievo in sito eseguito dagli ingg. De Giacometti e Barp nel 2002.

I dati geometrici rilevati hanno permesso di definire le misure medie delle aste componenti le tre tipologie di capriata (Tab. 4.1) e di determinare le caratteristiche quantificabili secondo le indicazioni definite in normativa, riportando i relativi valori dapprima nel brogliaccio di cantiere e successivamente in fogli elettronici (§ 4.4.1.3).

Tab. 4.1: Dimensioni medie delle aste delle capriate lignee derivanti dal rilievo geometrico.

Asta	Capriate Tipo A			Capriate Tipo B			Capriate Tipo C		
	Sezione		Luce	Sezione		Luce	Sezione		Luce
#	B	H	L	B	H	L	B	H	L
[-]	[cm]	[cm]	[m]	[cm]	[cm]	[m]	[cm]	[cm]	[m]
1	22,00	28,71	NR	25,94	29,75	NR	22,64	28,07	NR
2	21,21	26,88	NR	22,50	31,31	4,80	20,82	27,27	NR
3	15,29	20,50	2,86	21,63	28,94	2,19	16,86	24,23	2,82
4	21,88	26,83	2,85	21,69	28,44	2,19	20,14	27,45	2,95
5	14,54	19,42	3,87	22,63	32,38	4,78	16,77	23,73	3,90
6	15,25	20,25	3,86	22,44	26,75	2,56	16,82	24,27	3,80
7	20,75	27,17	2,84	22,56	28,88	4,40	20,05	27,45	2,97
8	15,46	19,08	2,82	22,63	26,13	2,26	17,09	24,00	2,82
9	22,04	27,46	NR	21,50	27,75	1,12	20,23	28,41	6,56
10	16,21	24,79	NR	-	-	-	16,50	23,92	NR
11	17,50	23,17	NR	-	-	-	16,63	28,25	NR
12	22,00	26,67	1,34	-	-	-	18,00	27,50	1,35
13	18,00	23,00	NR	-	-	-	18,67	26,33	NR

Dal rilievo in sito è emersa la notevole precisione delle maestranze operanti ai tempi della realizzazione, avendo rilevato dimensioni pressoché costanti per le medesime aste delle capriate appartenenti alle varie zone del sottotetto. Ciò appare ancora più rilevante se si pensa che la realizzazione è avvenuta tramite lavorazioni manuali ad ascia. Fanno eccezione da questo punto di vista gli smussi rilevati per alcuni elementi lignei che permangono comunque nell'ordine del centimetro e non comportano particolari riduzioni delle sezioni. Le dimensioni sono risultate maggiori per gli elementi principali costituenti la capriata, quali la catena (asta 1 per tutte le tipologie di capriata), i puntoni laterali (aste 2-9 per le capriate 'Tipo A-C e aste 2-5 per le capriate 'Tipo B') ed i monaci (aste 4-7 per le capriate 'Tipo A-C' e aste 3-4 per le capriate 'Tipo B'). La luce delle catene è stata definita a partire dalla dimensione dei locali, incrementata dello spessore delle murature perimetrali, considerando gli elementi in appoggio fino alla loro mezzeria.

Il rilievo è stato esteso a campione anche ai principali nodi di carpenteria delle capriate, per i quali è stato operato sistematicamente anche il rilievo fotografico. Per il nodo puntone-catena della 'Capriata Tipo B' si è rilevata una configurazione a dente arretrato (Fig. 4.25), diversamente da quanto indicato nella documentazione digitale fornita, ove la rappresentazione era a dente semplice, configurazione invece confermata per il medesimo nodo della 'Capriata Tipo A-C'.



Fig. 4.25: Rilievo geometrico e fotografico del nodo puntone-catena della 'Capriata Tipo B'.

Tutte le dimensioni geometriche rilevate sono state tabellate ed integrate agli allegati in Appendice (§ A.2) relativi alle schede di rilievo delle capriate del sottotetto, a cui si rimanda per una visione più completa e dettagliata.

4.3.1.1 'Capriata Tipo A-C'

Tale tipologia di capriata palladiana (Fig. 4.26) è relativa agli ambienti delle Zone A e C. Copre una luce di circa 20 metri con un interasse di circa 1,25 metri tra le varie capriate. Tra le sue aste componenti vede la presenza di saette (aste 3, 5, 6, 8) a sostegno dei puntoni (aste 2 e 9) e della controcattena (asta 10). Il collegamento puntone-catena (nodi 1 e 10) è a dente semplice ed è staffato, quello puntone-sottocattena (nodi 3 e 8) è invece a dente arretrato (Fig. 4.27).

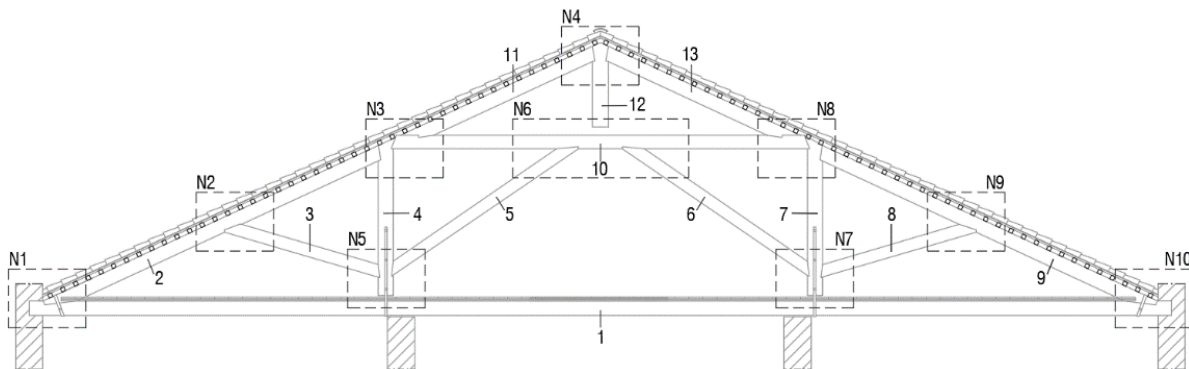


Fig. 4.26: Individuazione di aste e nodi nella 'Capriata Tipo A-C'.

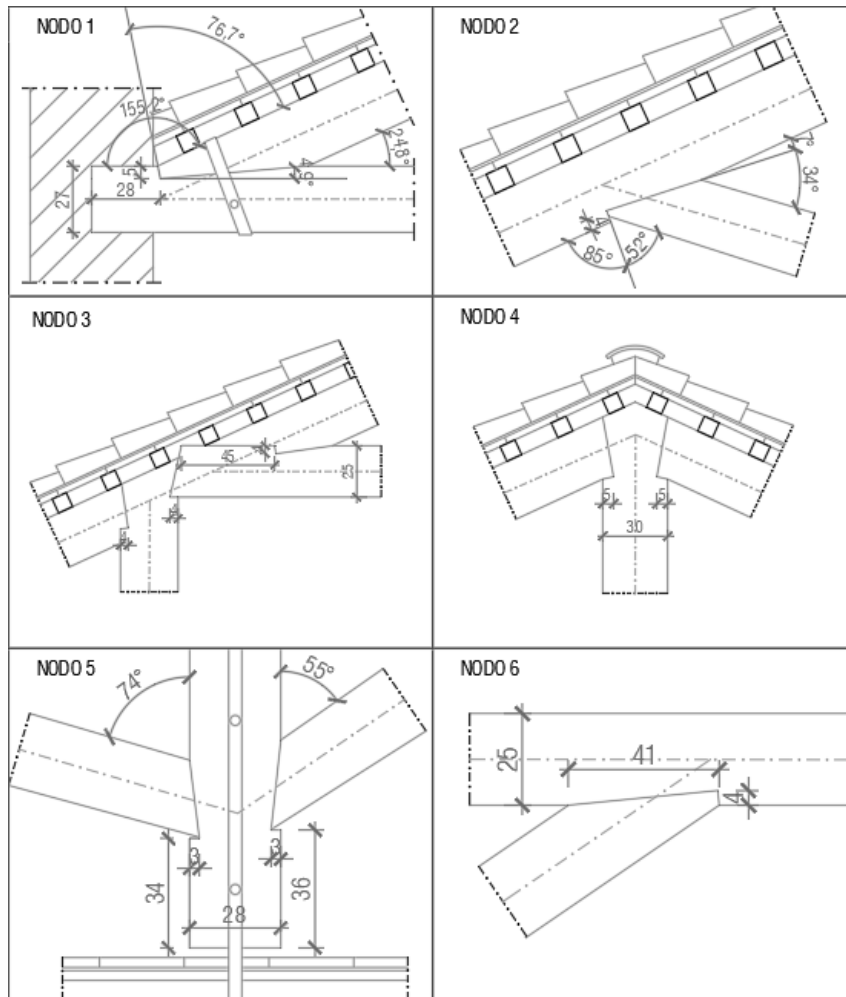


Fig. 4.27: Restituzione CAD del rilievo geometrico dei nodi della 'Capriata Tipo A-C'.

4.3.1.2 'Capriata Tipo-B'

Tale tipologia di capriata palladiana (Fig. 4.28) è presente nell'ambiente di sottotetto della 'Zona B', al di sopra del salone centrale della Villa, e copre una luce di circa 14 metri con un interasse di circa 1,45 metri tra le varie capriate. Presenta una configurazione composta con i puntone (aste 2 e 5) in appoggio ai monaci (aste 3 e 4) e alla catena (asta 1). Il collegamento puntone-catena (nodi 1 e 8) è a dente arretrato ed è staffato, mentre quello puntone-controcattena (nodi 2 e 7) richiama la configurazione indicata dal Mazzocchi (1871). La soluzione a dente arretrato è presumibile sia da attribuirsi alla volontà di ottenere una dimensione maggiore del tacco resistente della catena, visto il gravare dell'orditura composta della copertura sugli stessi puntone (Fig. 4.29).

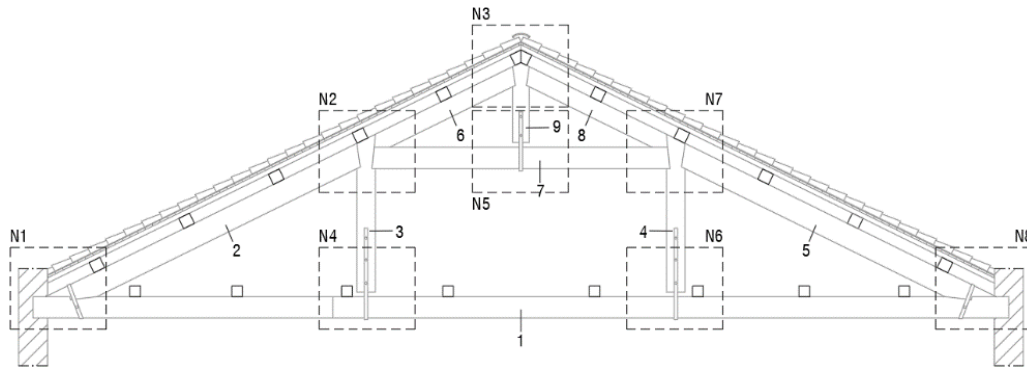


Fig. 4.28: Individuazione di aste e nodi nella 'Capriata Tipo B'.

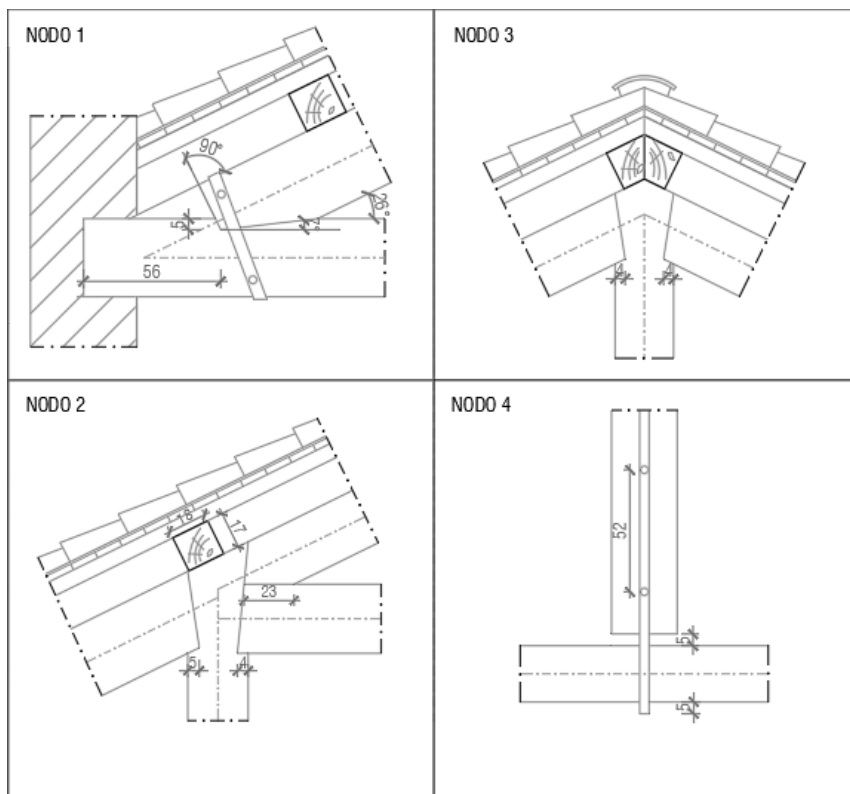


Fig. 4.29: Restituzione CAD del rilievo geometrico dei nodi della 'Capriata Tipo B'.

In prossimità dei monaci, la catena presenta delle giunzioni a 'dardo di Giove' tipiche delle connessioni di carpenteria storiche. Si è proceduto al rilievo geometrico (Fig. 4.30) e fotografico (Fig. 4.31), a seguito delle anomalie riscontrate per alcuni dei cunei di tale connessione.

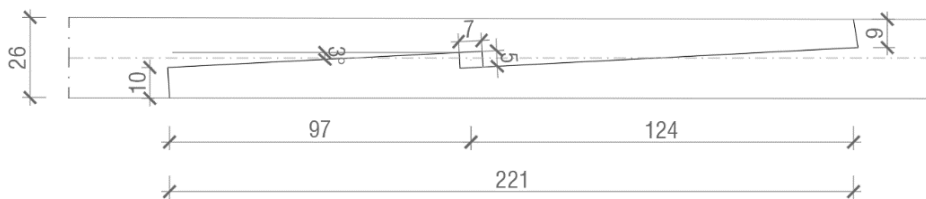


Fig. 4.30: Restituzione CAD del rilievo geometrico del giunto a 'dardo di Giove'.



Fig. 4.31: Rilievo fotografico del giunto a 'dardo di Giove'.

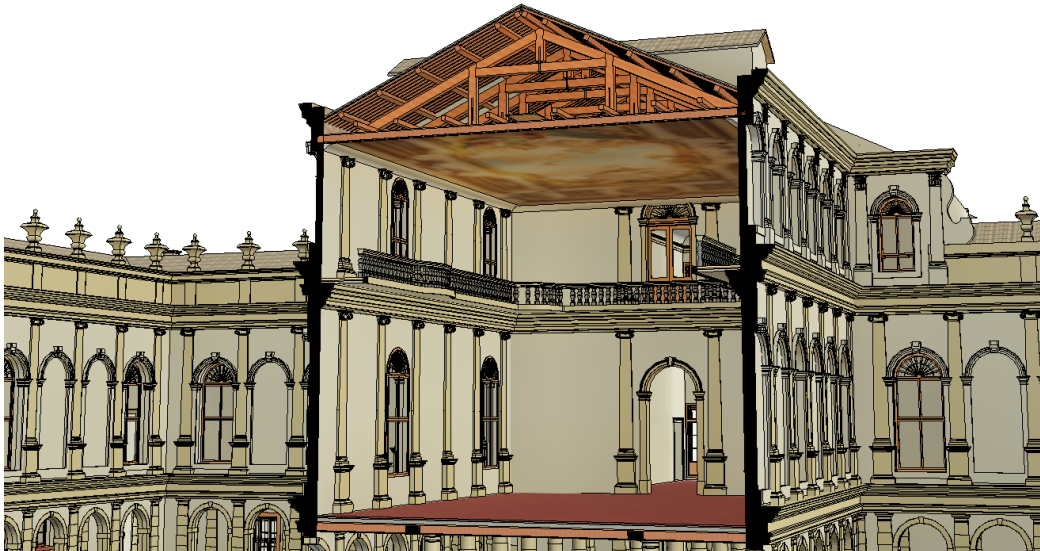


Fig. 4.32: Spaccato assometrico di Villa Pisani a Stra, realizzato con il software BIM Autodesk Revit: in primo piano la 'Zona B' del corpo centrale con le relative strutture lignee di copertura ed il sistema di sospensione a sostegno del controsoffitto affrescato che adorna la sala da ballo.

Sulle catene delle capriate della 'Zona B' risulta gravare il peso del sistema di sospensione a sostegno del controsoffitto affrescato della sala da ballo sottostante (Fig. 4.32). Di tale articolato sistema si è provveduto a verificarne le dimensioni geometriche e a rilevarne i dettagli sulla base della documentazione fornita, essendo stato oggetto di un precedente intervento di monitoraggio strutturale da parte di Expin Srl. Il sistema (Fig. 4.33) vede una serie di travi di ripartizione — poggianti sulle catene delle capriate — da cui dipartono delle staffe ritorte in ferro che sostengono una serie di travi sulle quali è appigliata la centinatura delle volte e del controsoffitto affrescato con il capolavoro del Tiepolo inferiormente, mentre superiormente il tavolato di calpestio dell'ambiente del sottotetto.

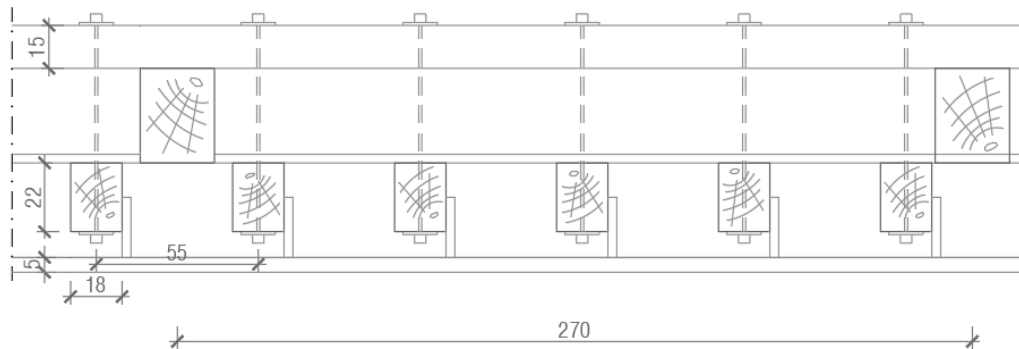


Fig. 4.33: Restituzione CAD del rilievo geometrico del sistema di sospensione.

Il sistema di sospensione sarà debitamente considerato nell'analisi dei carichi gravanti sulle 'Capriate Tipo B' e nelle relative verifiche, essendo per le catene un carico agente in direzione ortogonale alla fibratura.

4.3.2 Rilievo del degrado biotico

Macchioni e Palanti (2020), hanno identificato macroscopicamente le due specie legnose delle capriate lignee nelle seguenti:

- abete rosso (*Picea abies*) per la 'Zona A' e la 'Zona C';
- larice (*Larix decidua*) per la 'Zona B'.

Secondo gli stessi esperti la scelta del larice per la 'Zona B' è presumibile sia avvenuta, vista la presenza dell'affresco di pregio, poiché considerato in passato tra le specie più durabili, migliore dell'abete rosso. Le stesse due specie sono oggi rispettivamente classificabili secondo la UNI EN 350-02 come «moderatamente durabile» e «poco durabile». Inoltre, come affermato da Tomasi (2011), in generale il larice è marginalmente più resistente agli attacchi fungini rispetto all'abete rosso, ed il suo durame è resistente agli attacchi di insetti, a differenza di quello dell'abete rosso.

L'analisi eseguita è stata eminentemente visiva, coadiuvata dall'uso di semplici strumenti quali martello, scalpello, punteruolo, per valutare la risposta alla percussione e la profondità dell'eventuale attacco biotico. L'osservazione è avvenuta esclusivamente a vista e non da vicino per le porzioni di capriata poste più in alto, ovvero la porzione più alta dei puntoni e del monaco centrale. Le catene dei locali A e C risultavano interamente coperte dal tavolato di calpestio e dalle sovrastanti tavelle in cotto, mentre apparivano relativamente visibili le porzioni all'incastro con i puntoni (Macchioni e Palanti, 2020). L'ispezione si è svolta nei giorni 3 e 4 settembre 2020 ed ha constatato come il biodegradamento sia prevalente negli elementi lignei posti in prossimità degli

abbaini e delle murature d'ambito, a conferma di come il grado di umidità e le infiltrazioni d'acqua piovana ne siano le principali e dirette cause. All'identificazione complessiva è seguito un accurato rilievo del biodegradamento con annotazione delle specifiche anomalie per ogni singola capriata delle tre zone del sottotetto (Fig. 4.34), accompagnato dal supporto fotografico digitale.

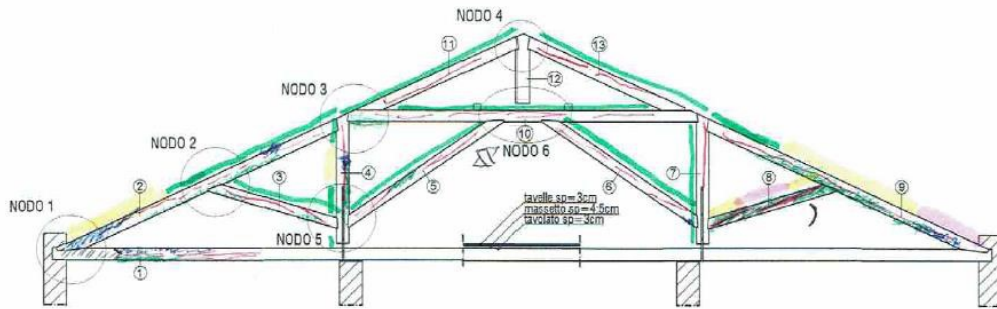


Fig. 4.34: Esempio di brogliaccio del rilievo biotico e prima valutazione sommaria del danno.

In Appendice (§ A.2) sono allegate le specifiche schede di rilievo delle singole capriate, nella cui rappresentazione di dettaglio si è proceduto alla distinzione tra degrado legato all'azione di insetti e degrado fungino, quest'ultimo sempre identificato come carie. Nel caso non fosse possibile rilevare la tipologia di degrado o l'elemento non fosse visibile perché nascosto da rinforzi e/o consolidamenti, se ne è presunta la presenza, ritenendo tali rinforzi posti in atto per ovviare ad un attacco di carie fungina. Gli elementi non ispezionabili sono stati contrassegnati come tali.

4.3.3 Rilievo del degrado meccanico

Tale tipologia di rilievo ha visto la valutazione di tutte le 31 capriate nelle loro parti accessibili. Analogamente alla fase di rilievo biotico, si è operato annotando il quadro fessurativo delle singole aste componenti le capriate, individuando le tipologie di lesioni seguenti:

- lesioni strutturali passanti;
- lesioni da ritiro profonde (almeno 6 cm);
- lesioni da ritiro superficiali;
- lesioni di altra natura e tipo.

Si è inoltre esaminato lo stato degli elementi strutturali dal punto di vista statico, valutandone lo stato di deformazione in funzione di eventuali scorrimenti laterali, abbassamenti, svergolamenti ed inflessioni. Il rilievo ha interessato anche le connessioni di carpenteria, per le quali è stata operata una sistematica rilevazione fotografica al fine di valutarne lo stato meccanico. Le specifiche annotazioni relative al rilievo del degrado meccanico sono anch'esse riportate nelle

schede di rilievo delle singole capriate allegate in Appendice (§ A.2). In linea generale le lesioni sono risultate prevalentemente legate al fenomeno del ritiro e si presentano di tipo superficiale; nessuna lesione è risultata di tipo passante, mentre in qualche specifico caso sono risultate di tipo profondo. Le condizioni dei nodi sono buone per la maggior parte delle capriate; gli interventi eseguiti nel precedente rilievo hanno ripristinato la funzionalità e limitato la vulnerabilità, anche se vi sono situazioni particolari — come per il nodo 3 della capriata A1 (Fig. 4.35) — per le quali lo stato della connessione è apparso ai limiti della sufficienza.



Fig. 4.35: Rilievo fotografico delle connessioni di carpenteria della Capriata A1.

4.3.4 Mappatura delle criticità a seguito del rilievo in sito

Il risultato finale della prima fase di rilievo in sito ha permesso di stilare una prima schematica mappatura di criticità delle strutture lignee del corpo centrale di Villa Pisani, elemento di partenza per le successive indagini specifiche. Nella planimetria del sottotetto (Fig. 4.36) si sono evidenziate in rosso le zone dove gli elementi lignei e le connessioni hanno presentato le anomalie e i difetti più rilevanti derivanti dall'ispezione visiva, da investigarsi tramite opportune indagini strumentali. La collocazione di tali aree è risultata essere situata principalmente in prossimità degli abbaini, a conferma di come il biodegradamento dovuto all'acqua penetrante da tali varchi sia la principale causa di carie per gli elementi lignei posti nelle zone adiacenti alle aperture.

La 'Zona C' del sottotetto è apparsa quella in condizioni peggiori, vista anche la presenza di sei abbaini, seguita dalla 'Zona A', esposta verso Nord, mentre per la 'Zona B' lo stato di conservazione è apparso essere decisamente migliore.

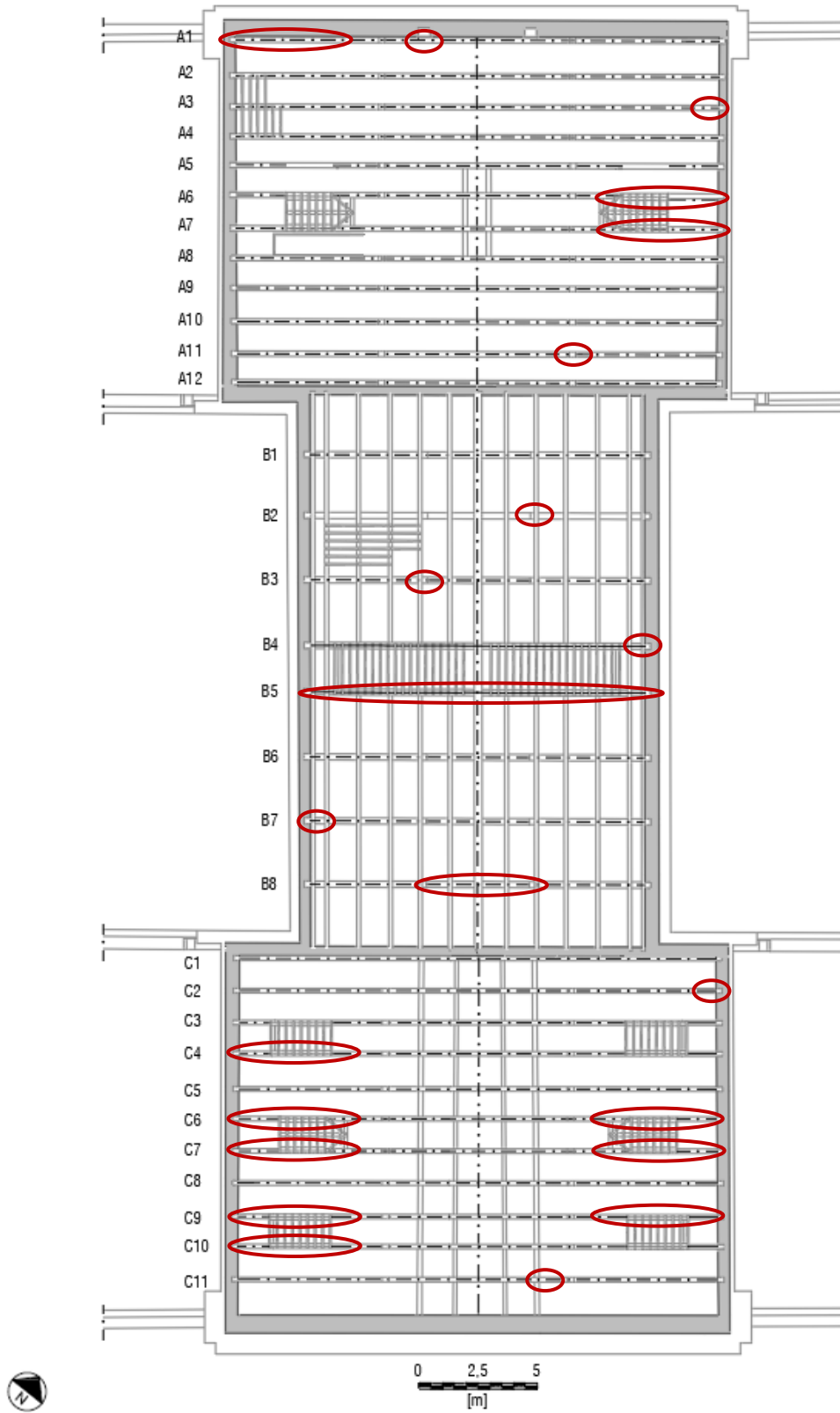


Fig. 4.36: Mappatura di criticità preliminare a seguito dell'ispezione visiva eseguita in sito. In rosso sono indicate le aree con le maggiori anomalie da approfondirsi con indagini strumentali.

4.4 Ispezioni e prove d'indagine eseguite

La norma UNI 11119:2004 e la più recente norma UNI EN 17121:2019 raccomandano l'esecuzione di prove di indagine — visive e strumentali — ai fini della classificazione delle strutture lignee esistenti appartenenti al costruito storico-monumentale. Rientrando il caso studio in tale ambito, alle operazioni di rilievo *in situ* sono seguite valutazioni visive, integrate con l'esecuzione di prove strumentali non distruttive svolte in collaborazione con il Laboratorio Autorizzato Expin Srl, *spin-off* dell'Università di Padova incaricata dalla Direzione museale al monitoraggio delle strutture di copertura, ai fini della classificazione secondo la resistenza e della determinazione della 'sezione efficace' degli elementi lignei.

4.4.1 Indagini di I livello

Una volta verificato il soddisfacimento delle condizioni preliminari nei termini di accessibilità, pulizia ed illuminazione, si è potuto procedere all'ispezione visiva delle strutture lignee del sottotetto, avendo cura di indossare i relativi dispositivi di protezione individuale (DPI), quali scarpe antinfortunistica, casco antiurto, tuta di protezione e guanti, eseguendo un primo rilievo fotografico preliminare (Fig. 4.37).



Fig. 4.37: Rilievo fotografico preliminare alle indagini - Vista della 'Zona B'.

L'accessibilità ai locali era garantita dalla preventiva realizzazione di opere atte alle idonee condizioni di sicurezza e di lavoro, come nel caso del sottotetto relativo alla 'Zona B', per il quale la Soprintendenza e la Direzione del polo museale hanno previsto l'installazione fissa di una passerella di tavole e di un relativo corrimano, anche a salvaguardia del controsoffitto affrescato.

4.4.1.1 Definizione delle condizioni di servizio del legname

Tra le operazioni legate alle indagini di I livello vi è la definizione delle condizioni di servizio del legname in sito secondo la norma UNI EN 335:2013 che consente di definire la classe di rischio biologico e le condizioni di servizio del legname tramite la sua umidità e la tipologia di attacco. Per il caso-studio in esame, la temperatura dei locali nei giorni dell'indagine visiva era di 7-10°C e l'umidità relativa dell'aria circa del 75%. L'alto valore di umidità ambientale è da porre in relazione alle infiltrazioni d'acqua provenienti dalla copertura e osservabili macroscopicamente grazie alle tracce lasciate sulle facce degli elementi.

In tali condizioni termoisometriche il legno assume un'umidità di equilibrio di circa il 15% ma a volte può spingersi oltre il 20% (Bertolini Cestari et al., 2009). Per i locali del sottotetto si è definita una 'Classe di rischio 2', ossia relativa ad un ambiente riparato ma con elevata umidità dell'aria e per la quale sono possibili attacchi sia fungini, sia da parte di insetti, come confermato dallo stesso rilievo biotico.

4.4.1.2 Determinazione dell'umidità del legno

Come riportato al punto 7.2 della norma UNI 11119:2004 «la determinazione dell'umidità relativa del legno deve essere condotta per mezzo di procedure specifiche per la determinazione su manufatti lignei di interesse storico». Tale rilevazione è avvenuta per mezzo dell'igrometro elettrico a resistenza Trotec T510 (it.trotec.com) ed ha consentito di indagare le parti ammalorate indicate nella mappatura di criticità preliminare, oltre che ottenere un importante dato a supporto delle zone oggetto di indagini strumentali successive (Fig. 4.38).



Fig. 4.38: Indagine con igrometro elettrico a resistenza Trotec T510.

4.4.1.3 Determinazione delle caratteristiche quantificabili

Ai fini della classificazione degli elementi strutturali lignei è necessario procedere alla determinazione delle loro caratteristiche misurabili in opera, che influiscono sulla resistenza o in generale sul comportamento strutturale. Tali caratteristiche, come anticipato in precedenza, sono legate alla presenza e all'incidenza geometrica di smussi, nodi singoli, gruppi di nodi, inclinazioni della fibratura, fessurazioni e lesioni varie (Fig. 1.7).

L'elaborazione dei risultati derivanti dal rilievo geometrico ha consentito di assegnare ad ogni asta di tutte le capriate una specifica categoria (cat. I, II, III), in funzione delle caratteristiche quantificabili, a seconda delle relative regole di classificazione e dei limiti specificati (Fig. 1.6), attribuendo ad ogni elemento ligneo lo specifico valore di tensione²³ ed il modulo medio di elasticità in funzione della categoria di appartenenza e della specie legnosa, secondo il prospetto normativo della UNI 11119:2004 (Fig. 1.8), derivato da Giordano (1993).

In Appendice sono riportate le schede riepilogative delle capriate del sottotetto (§ A.2), con indicate le categorie di classificazione assegnate alle aste componenti. In linea generale i risultati ottenuti hanno definito la classificazione di categoria I per oltre il 75% degli elementi lignei, con il restante 25% suddiviso tra le categorie II e III per condizioni legate principalmente all'inclinazione della fibratura o alla presenza di lesioni profonde. La maggior parte delle lesioni riscontrate per gli elementi sono risultate essere legate al fenomeno del ritiro naturale del materiale e quindi non vincolanti dal punto di vista della classificazione normativa. Le irregolarità delle sezioni dovute agli smussi, attribuibili alle lavorazioni ad ascia delle maestranze, non hanno invece inciso nella classificazione a vista delle aste, risultate per oltre il 90% in categoria I, a conferma di come tale difetto incida più sulle dimensioni, e quindi sulla 'sezione efficace' degli elementi, piuttosto che sulle resistenze e sui parametri meccanici del materiale. I difetti legati ai nodi ed ai gruppi di nodi sono coincisi con particolari deviazioni della fibratura, caratteristica risultata essere determinante ai fini della classificazione a vista secondo la norma UNI 11119:2004.

²³ Come riportato nel Prospetto 3 della norma UNI 11119:2004 i valori di tensione massima sono relativi al metodo delle tensioni ammissibili, non più previsto dalle attuali Norme Tecniche. Nel Capitolo 5 si seguirà un approccio di correlazione di tali tensioni con i valori dei parametri meccanici forniti dalle attuali norme UNI EN 338:2016, validi ai fini delle verifiche agli Stati Limite presentate al Capitolo 3 e disposte dalle attuali Norme Tecniche (NTC 2018, EC5).

4.4.2 Indagini di II livello

La sola ispezione visiva non è sufficiente alla classificazione degli elementi strutturali lignei, seppur sia alla base di tale procedura, così come afferma la norma UNI 11119:2004: «in alcuni casi l'ispezione *in situ* può essere accompagnata da indagini supplementari mediante l'esecuzione di una o più prove non distruttive». Per le caratteristiche delle strutture analizzate le indagini di II livello o strumentali sono da svolgersi in tutte le parti che non consentano il regolare espletamento dell'ispezione visiva, come per esempio testate di travi all'interno di murature d'appoggio, o in cui sia necessaria una più puntuale valutazione delle condizioni di degrado.

Sulla base di tali premesse e considerazioni, per il caso-studio in esame, sulle 31 capriate, si sono svolte due differenti tipologie di indagini strumentali:

- prove sonore di percussione;
- prove penetrometriche con resistografo.

Mentre la valutazione del danno tramite prova sonora è stata eseguita per la totalità delle 371 aste componenti le strutture di copertura, le prove resistografiche sono state effettuate in specifiche sezioni, definite in funzione della mappatura di criticità preliminare, per un totale di 121 indagini.

4.4.2.1 Prove sonore di percussione

Le superfici delle varie aste sono state percosse con un martello in gomma, ascoltandone il suono prodotto da tale percussione. Il principio alla base di tale prova è la differente risposta sonora per effetto della presenza di cavità o porzioni degradate all'interno dell'elemento ligneo indagato quando lo stesso è sottoposto a sollecitazioni di tipo dinamico. La valutazione è stata estesa alle intere strutture lignee al fine di poter fornire una prima sommaria valutazione del danno degli elementi componenti, classificabili in funzione della risposta sonora.

Nella classificazione in sito si sono distinte le seguenti tipologie di risposta sonora:

- buona o con lievi anomalie locali;
- con anomalie distinguibili;
- sorda.

Gli elementi rinforzati o inaccessibili, non direttamente valutabili, sono stati indicati come non ispezionabili. Il risultato delle prove è stato riportato in ambiente CAD (Fig. 4.39) ottenendo un'indicativa valutazione del danno delle singole capriate, al fine di poter indagare con prove di

tipo resistografico le porzioni delle aste che presentassero una risposta sonora sorda, corrispondente ad un elemento con notevoli anomalie locali e quindi ad un danno grave.

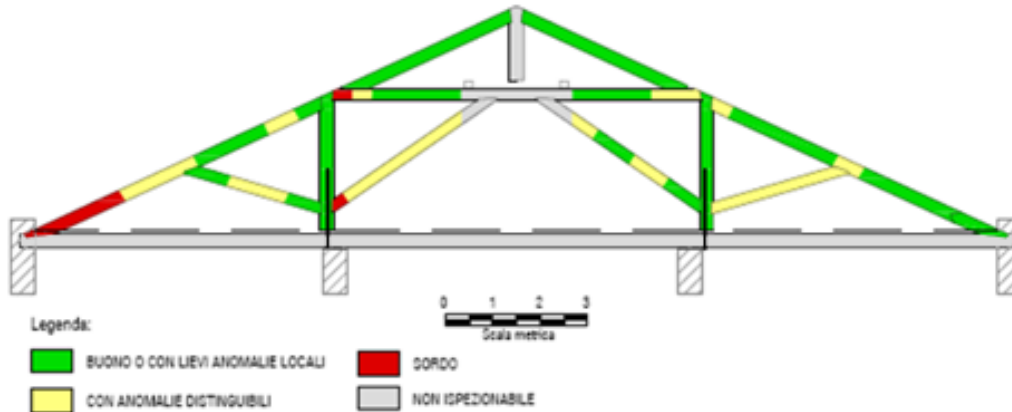


Fig. 4.39: Esempio di classificazione degli elementi in funzione della risposta sonora.

L'esito delle indagini sonore ha consentito di stimare l'entità del danno ed ha fornito dei primi risultati in funzione della risposta sonora, risultata:

- buona o con lievi anomalie per circa il 70% delle aste;
- con anomalie distinguibili per circa il 20% delle aste;
- sorda per circa il 10% delle aste.

L'indagine strumentale con martello in gomma ha permesso di quantificare le porzioni di elementi con anomalie, affiancando l'ispezione visiva e confermando le regioni individuate nella mappatura di criticità preliminare (Fig. 4.36). Le principali anomalie sonore sono infatti state riscontrate in prossimità degli abbaini o dei nodi catena-puntone a conferma dell'incidenza del biodegradamento legato all'umidità ed alle infiltrazioni delle acque meteoriche.

4.4.2.2 Prove penetrometriche con resistografo

Le indagini strumentali con trapano resistografico (Fig. 4.40) sono state svolte in collaborazione con il Laboratorio Autorizzato Expin Srl, *spin-off* dell'Università di Padova incaricata dalla Direzione museale al monitoraggio delle strutture di copertura. Lo strumento utilizzato per tale tipologia di prova debolmente distruttiva è stato il resistografo RESI Power Drill 400 della IML Service (iml-service.com). Le prove resistografiche sono state eseguite a campione nelle porzioni di aste individuate come ammalorate o definite come da indagarsi nella loro sezione trasversale interna. Prima dell'esecuzione di ogni prova, è stata rilevata la percentuale di umidità relativa di ogni elemento ligneo per mezzo dell'igrometro elettrico a resistenza Trotec T510

(it.trotec.com), annotandola su tabelle di rilievo ove si sono registrate anche l'angolo di esecuzione delle prove, le dimensioni delle sezioni indagate ed eventuali note. Alcune indagini sono state svolte anteponendo all'asta un tester in legno di abete²⁴ di classe di resistenza nota (Fig. 4.41), al fine di avere un confronto nella lettura del profilo densimetrico restituito dallo strumento.



Fig. 4.40: Strumentazione per prove con trapano resistografico IML RESI PD 400.



Fig. 4.41: Esecuzione di una prova resistografica con tester.

²⁴ Tale soluzione è stata sperimentata da Scancelli (2017).

4.5 Valutazione dello stato di conservazione

Tra gli obiettivi del presente lavoro vi è quello di fornire una valutazione dello stato di conservazione delle strutture lignee di copertura del corpo centrale di Villa Pisani. A partire dai risultati delle indagini in sito è possibile effettuare alcune prime considerazioni, non prima però di aver analizzato ed elaborato i dati derivanti dal rilievo geometrico e dalle prove resistografiche, i cui risultati sono alla base anche delle analisi e modellazioni numeriche agli elementi finiti, trattate nel successivo Capitolo 5.

4.5.1 Analisi ed elaborazione dei dati rilevati

A margine della campagna di rilievo *in situ*, oltre alla mera rappresentazione in ambiente CAD e BIM di tutti gli elementi geometrici e dei principali risultati delle prove d'indagine, si è provveduto ad analizzare i dati rilevati, elaborandoli con il supporto di fogli di calcolo elettronici.

4.5.1.1 Analisi dimensionale degli elementi lignei

I dati derivanti dal rilievo geometrico sono stati interpretati eseguendone il confronto dimensionale con i valori di quelli relativi alle indagini degli anni 2000. Il confronto è avvenuto per mezzo di un'analisi statistica ed ha evidenziato una differenza dimensionale nell'ordine del $\pm 5\%$ per la totalità delle aste rilevate, con poche eccezioni nell'ordine del $\pm 10\%$, risultato legato più alla precisione del rilievo piuttosto che a difetti o anomalie del materiale ligneo.

Relativamente alle capriate della 'Zona B', la rappresentazione tabellare del rilievo geometrico eseguito ha visto l'analisi dimensionale relativa alle altezze delle aste componenti le singole capriate. Oltre ad una variabilità dovuta alla lavorazione manuale degli elementi lignei, si evidenzia come per l'asta 6 della capriata B5 l'altezza di tale sezione sia maggiore di quasi 1/5 di quella delle medesime aste delle restanti capriate della stessa zona (Fig. 4.42). Ciò è attribuibile alla probabile sostituzione dell'elemento, come evidenziato in fase di ispezione, visto anche il miglior stato di conservazione e la più accurata lavorazione, databile a tempi più recenti.

IL CASO-STUDIO DI VILLA PISANI

Tab. 4.2: Confronto tra i valori dimensionali medi delle capriate della 'Zona A'.

CAPRIATE TIPO A											
RILIEVO 2002			RILIEVO 2020				CONFRONTO				
ASTA	SEZIONE		LUCE	ASTA	SEZIONE		LUCE	ASTA	SEZIONE		LUCE
#	B	H	L	#	B	H	L	#	B	H	L
[-]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[cm]	[cm]	[m]
1	22,0	27,0	21,00	1	22,0	28,7	NR	1	±5%	±10%	NC
2	22,0	24,0	6,70	2	21,2	26,9	NR	2	±5%	NC	NC
3	16,0	21,0	2,86	3	15,3	20,5	2,86	3	±5%	±5%	±5%
4	22,0	27,0	2,85	4	21,9	26,8	2,85	4	±5%	±5%	±5%
5	14,0	20,0	3,96	5	14,5	19,4	3,87	5	±5%	±5%	±5%
6	14,0	20,0	3,96	6	15,3	20,3	3,86	6	±10%	±5%	±5%
7	22,0	27,0	2,85	7	20,8	27,2	2,84	7	±10%	±5%	±5%
8	16,0	21,0	2,86	8	15,5	19,1	2,82	8	±5%	±10%	±5%
9	22,0	24,0	6,70	9	22,0	27,5	NR	9	±5%	NC	NC
10	17,0	25,0	7,77	10	16,2	24,8	NR	10	±5%	±5%	NC
11	18,0	23,0	3,60	11	17,5	23,2	NR	11	±5%	±5%	NC
12	18,0	26,0	1,57	12	22,0	26,7	1,34	12	NC	±5%	NC
13	18,0	23,0	3,60	13	18,0	23,0	NR	13	±5%	±5%	NC

Tab. 4.3: Confronto tra i valori dimensionali medi delle capriate della 'Zona B'.

CAPRIATE TIPO B											
RILIEVO 2002			RILIEVO 2020				CONFRONTO				
ASTA	SEZIONE		LUCE	ASTA	SEZIONE		LUCE	ASTA	SEZIONE		LUCE
#	B	H	L	#	B	H	L	#	B	H	L
[-]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[cm]	[cm]	[m]
1	26,00	32,00	15,00	1	25,94	29,75	NR	1	±5%	±10%	NC
2	23,00	34,00	4,80	2	22,50	31,31	4,80	2	±5%	±10%	±5%
3	22,00	30,00	2,30	3	21,63	28,94	2,19	3	±5%	±5%	±5%
4	22,00	30,00	2,30	4	21,69	28,44	2,19	4	±5%	±10%	±5%
5	23,00	34,00	4,80	5	22,63	32,38	4,78	5	±5%	±5%	±5%
6	22,00	27,00	2,35	6	22,44	26,75	2,56	6	±5%	±5%	±10%
7	23,00	32,00	4,42	7	22,56	28,88	4,40	7	±5%	±10%	±5%
8	22,00	27,00	2,35	8	22,63	26,13	2,26	8	±5%	±5%	±5%
9	22,00	25,00	1,20	9	21,50	27,75	1,12	9	±5%	>10%	±10%

Tab. 4.4: Confronto tra i valori dimensionali medi delle capriate della 'Zona C'.

CAPRIATE TIPO C											
RILIEVO 2002			RILIEVO 2020				CONFRONTO				
ASTA	SEZIONE		LUCE	ASTA	SEZIONE		LUCE	ASTA	SEZIONE		LUCE
#	B	H	L	#	B	H	L	#	B	H	L
[-]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[cm]	[cm]	[m]
1	26,0	32,0	21,00	1	22,6	28,1	NR	1	>10%	>10%	NC
2	19,0	26,0	6,70	2	20,8	27,3	NR	2	±10%	±5%	NC
3	15,0	26,0	2,86	3	16,9	24,2	2,82	3	>10%	±10%	±5%
4	19,0	28,0	2,85	4	20,1	27,5	2,95	4	±10%	±5%	±5%
5	18,0	23,0	3,96	5	16,8	23,7	3,90	5	±10%	±5%	±5%
6	18,0	23,0	3,96	6	16,8	24,3	3,80	6	±10%	±10%	±5%
7	19,0	28,0	2,85	7	20,0	27,5	2,97	7	±10%	±5%	±5%
8	15,0	26,0	2,86	8	17,1	24,0	2,82	8	>10%	±10%	±5%
9	19,0	26,0	6,70	9	20,2	28,4	6,56	9	±10%	±10%	±5%
10	17,0	25,0	7,77	10	16,5	23,9	NR	10	±5%	±5%	NC
11	19,0	26,0	3,60	11	16,6	28,3	NR	11	>10%	±10%	NC
12	18,0	26,0	1,57	12	18,0	27,5	1,35	12	±5%	±10%	>10%
13	19,0	26,0	3,60	13	18,7	26,3	NR	13	±5%	±5%	NC

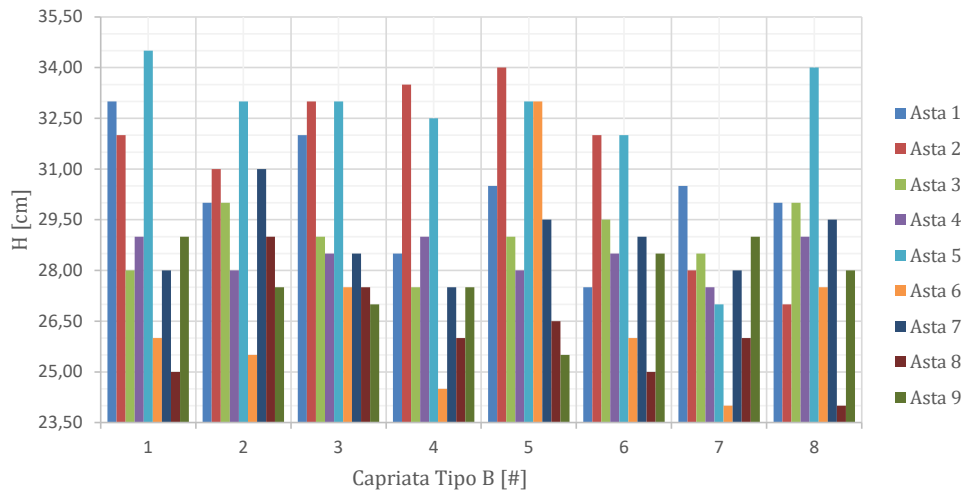


Fig. 4.42: Confronto tra i valori delle altezze delle aste relative alle capriate della 'Zona B'.

4.5.1.2 Analisi dei valori di umidità relativa del legno

A partire dai valori percentuali dell'umidità relativa degli elementi lignei, è stata eseguita un'analisi statistica che ha consentito di determinare il valore medio di U per ognuna delle zone del sottotetto, il cui esito ha confermato la previsione per un valore di equilibrio attorno al 15% (Tab. 4.5), in funzione delle condizioni termigrometriche considerate.

Tab. 4.5: Confronto tra i valori medi di umidità relativa

Zona [-]	U [%]
A	15,6
B	14,0
C	14,8

Il valor medio per la 'Zona A' appare il più elevato (15,6%), dato probabilmente legato all'esposizione a nord del relativo locale, mentre la 'Zona B' ha evidenziato in generale i valori minori di umidità relativa (14,0%), come dimostra il buono stato di conservazione delle sue capriate, contrariamente alle capriate della 'Zona C' che, seppur presentando un valor medio attorno a quello di equilibrio (14,8%), vedono le maggiori criticità, nonostante l'esposizione a sud del relativo ambiente del sottotetto.

Successiva è stata la definizione della variazione percentuale $\Delta E'$ del modulo di elasticità E , dipendente dall'umidità di equilibrio (Giordano, 1993):

«con riferimento all'umidità di equilibrio del 12%, il fattore di correzione del modulo elastico da adottarsi vede una variazione del 2% per ogni punto percentuale di cui differisce l'umidità dell'elemento» (Giordano, 1993).

A partire dal valore di equilibrio del legno in condizioni normali ($U_{norm}=12\%$), si è determinata la variazione percentuale ΔU di ogni valore di umidità rilevato per le aste indagate (U_i), che ha consentito la definizione del fattore di correzione ($\Delta E'_0$) da considerarsi per le riduzioni percentuali del modulo elastico.

$$\Delta U = |U_{norm} - U_i| \quad [4.1]$$

$$\Delta E'_0 = 2 \cdot \Delta U \quad [4.2]$$

L'applicazione di tale sistematica procedura a tutte le 121 rilevazioni effettuate, ha consentito di determinare, tramite analisi statistica, il valor medio della riduzione percentuale $\Delta E'_0$ del modulo di elasticità E_0 per ognuna delle tre zone del sottotetto oggetto di studio (Tab. 4.6).

Tab. 4.6: Confronto tra i valori medi di E'_0 e $\Delta E'_0$.

Zona [-]	E'_0 [%]	$\Delta E'_0$ [%]
A	93	7
B	96	4
C	94	6

In prima valutazione si evince come per le tre zone del sottotetto, per le porzioni di elementi indagati, sia da considerarsi un parametro meccanico E'_0 che differisce dal modulo di elasticità definito dalla classificazione secondo la resistenza della quantità percentuale $\Delta E'_0$, in media rispettivamente pari al 7%, 4% e 6% per le zone A, B e C.

In generale per le singole aste delle capriate indagate è valida la relazione [4.3] che tiene conto dell'influenza dell'umidità relativa del materiale nella definizione dello specifico parametro meccanico, in funzione delle considerazioni esposte e delle indicazioni reperite in letteratura.

$$E'_0 = E_0 - \Delta E'_0 \quad [4.3]$$

4.5.1.3 Analisi prove resistografiche

I dati pervenuti dalle prove strumentali con trapano resistografico sono stati riordinati e tabellati al fine di poterne eseguire una prima analisi. In Appendice (§ A.3) sono riportate le tabelle riepilogative relative alle prove eseguite che, in considerazione delle tre zone del sottotetto centrale, hanno portato alla seguente suddivisione delle 121 indagini:

- n. 28 prove resistografiche per la 'Zona A';
- n. 49 prove resistografiche per la 'Zona B';
- n. 44 prove resistografiche per la 'Zona C'.

All'accorpamento per zone è seguito quello relativo ad ogni singola capriata, in funzione del codice alfanumerico che la individua. Per ogni prova sono stati indicati, oltre al tipo, l'asta interessata dalla prova, le dimensioni della sezione trasversale dell'elemento, gli specifici dati di esecuzione della prova (riferimento, angoli di inclinazione, sezione resistente) ed eventuali note e osservazioni. Grazie a tale riorganizzazione si è potuto individuare con maggiore immediatezza il rapporto tra il profilo totale di penetrazione (P_t) ed il profilo resistente stimato (P_r), definito da Expin (2020) per ogni singola prova, con la finalità di attenzionare i risultati più allarmanti in termini di danno. Per rapporti $(P_r/P_t) \leq 0,70$, si sono eseguite specifiche valutazioni in funzione del profilo densimetrico: tale *output* grafico — ove e quando possibile — è stato riportato in scala sulla rappresentazione geometrica con l'obiettivo di stimare la sezione resistente effettiva di ogni elemento ligneo indagato. Appare evidente come i rilievi geometrico e fotografico siano stati un valido supporto a tali operazioni, consentendo un confronto diretto ed immediato in funzione della posizione puntuale della prova resistografica e dello stato di degrado per l'asta in esame.

A titolo esemplificativo si riportano le elaborazioni condotte per le principali capriate ammalorate di ogni zona del sottotetto. Per la 'Zona A', il nodo 3 della capriata A1, per il quale sono state considerate le prove resistografiche eseguite sulla controcatena (asta 10), già in fase di ispezione visiva si era notato come fosse stato oggetto in passato di un intervento manutentivo per mezzo di puntelli lignei chiodati al monaco. La testa dell'elemento appariva fortemente degradata e umida, tanto che la stessa rilevazione dell'umidità relativa non è stata possibile. È presumibile che l'attacco biotico da carie sia avvenuto per via dell'esposizione della capriata a ridosso della muratura perimetrale coincidente con il timpano della facciata sul lato nord della Villa. Il rilievo meccanico ha evidenziato abbassamenti nell'ordine del centimetro per lo stesso nodo 3 e, di conseguenza, anche per il monaco (asta 4), qualificando la capriata A1 come vulnerabile.

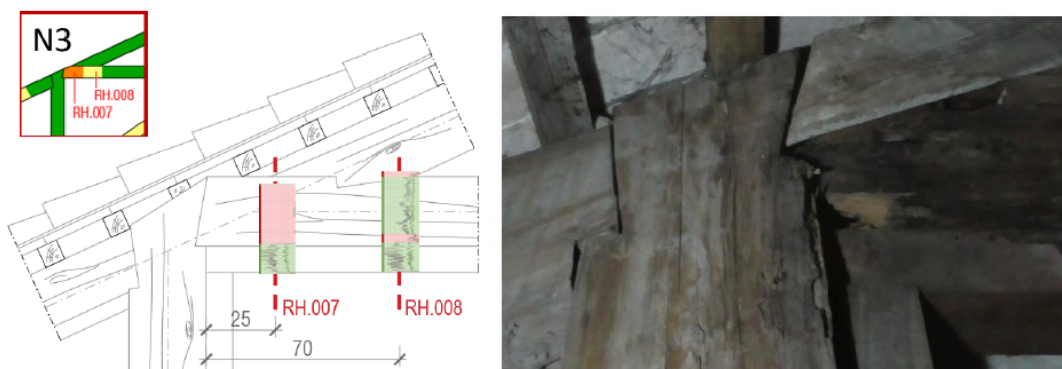


Fig. 4.43: Esempio di analisi prove resistografiche della capriata A1.

Le prove resistografiche in esame RH.007 ed RH.008 sono state eseguite rispettivamente ad una distanza di 25 cm e di 70 cm dal monaco, al fine di valutare l'estensione interna del degrado biologico da carie, sia in senso longitudinale che trasversale. La sovrapposizione grafica dei profili densimetrici alla restituzione del nodo 3 ha permesso di comprendere e rappresentare l'effettivo stato interno dell'elemento indagato (Fig. 4.43). Si nota come il puntello ligneo veda una sezione interamente resistente, mentre come l'asta 10 presenti una sezione completamente marcia in prossimità del nodo e un degrado puntuale a 70 cm dallo stesso.

Per la 'Zona B' la Capriata B8 ha evidenziato il peggiore rapporto ($P_r/P_t = 0,49$) nella testa della catena (asta 1), in adiacenza alla muratura d'appoggio. L'analisi della relativa prova resistografica RH.177 ha mostrato come la sezione resistente effettiva da considerarsi in fase di verifica debba considerare una riduzione di quasi il 50% per la dimensione geometrica della base della catena.

Per la capriata C6 si è rilevato, tramite la prova resistografica RH.186, il rapporto più critico dell'intero sottotetto centrale ($P_r/P_t = 0,15$) in prossimità della testa della catena (asta 1), a conferma di come il biodegradamento da carie incida notevolmente in termini di danno e di sezione resistente effettiva degli elementi lignei e di conseguenza sulle prestazioni residue.

Analoghe considerazioni in termini di valutazione del rapporto tra il profilo totale di penetrazione (P_t) ed il profilo resistente stimato (P_r) minore della soglia critica (0,70) hanno permesso di individuare le principali capriate ammalorate del sottotetto del corpo centrale (Tab. 4.7).

Tab. 4.7: Individuazione delle principali capriate ammalorate a seguito delle indagini.

Zona A	Zona B	Zona C
Capriata A1	Capriata B3	Capriata C2
Capriata A3	Capriata B7	Capriata C6
Capriata A7	Capriata B8	Capriata C9
-	-	Capriata C10

4.5.2 Mappatura dello stato di conservazione

A seguito dell'ispezione visiva e dell'integrazione delle indagini di I livello con le prove resistografiche di II livello, è stato possibile tracciare la mappatura relativa allo stato di conservazione delle zone della copertura del corpo centrale (Fig. 4.44). Il parametro discriminante della scala di valutazione è legato alla sezione resistente effettiva di ogni elemento indagato, dato citato anche nelle più recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (MIT 2018) ai fini della verifica dei collegamenti e delle verifiche agli Stati Limite degli elementi lignei.

In relazione all'entità del degrado e dell'effettiva sezione resistente degli elementi indagati, è stata definita (Expin, 2020) una scala di valutazione basata sul rapporto tra il profilo totale di penetrazione (P_t) ed il profilo resistente stimato (P_r), per valori compresi tra 0,5 e 1:

- $0,9 < P_r / P_t < 1,0$ – danno estremamente lieve;
- $0,7 < P_r / P_t < 0,8$ – danno lieve;
- $0,5 < P_r / P_t < 0,7$ – danno moderato;
- $P_r / P_t < 0,5$ – danno grave.

Per le 121 indagini strumentali eseguite con trapano resistografico si è calcolata la percentuale associata alle stesse in funzione della tipologia di danno riscontrato, ottenendo che:

- l'82% delle prove hanno dato esito di danno estremamente lieve;
- l'11% delle prove hanno dato esito di danno lieve;
- il 4% delle prove hanno dato esito di danno moderato;
- il 3% delle prove hanno dato esito di danno grave.

È immediato osservare come oltre il 90% delle prove resistografiche abbiano dato un esito di danno estremamente lieve o lieve contribuendo a ridimensionare le stime dello stato di danno desunto dalla sola ispezione visiva. Inoltre, le prove classificate con esito di danno moderato o grave, hanno evidenziato una corrispondenza con i risultati delle indagini di I livello e ancor più con quelle strumentali di II livello ottenute tramite la prova a percussione sonora con martello.

Pur presentando dei risultati puntuali, relativi quindi al punto di esecuzione, le prove resistografiche consentono di poter affermare che gli attacchi da insetti coinvolgono quasi esclusivamente le porzioni di alburno e sono totalmente pregressi. Gli attacchi fungini sono localizzati in prossimità degli abbaini, principali varchi di ingresso delle acque meteoriche.

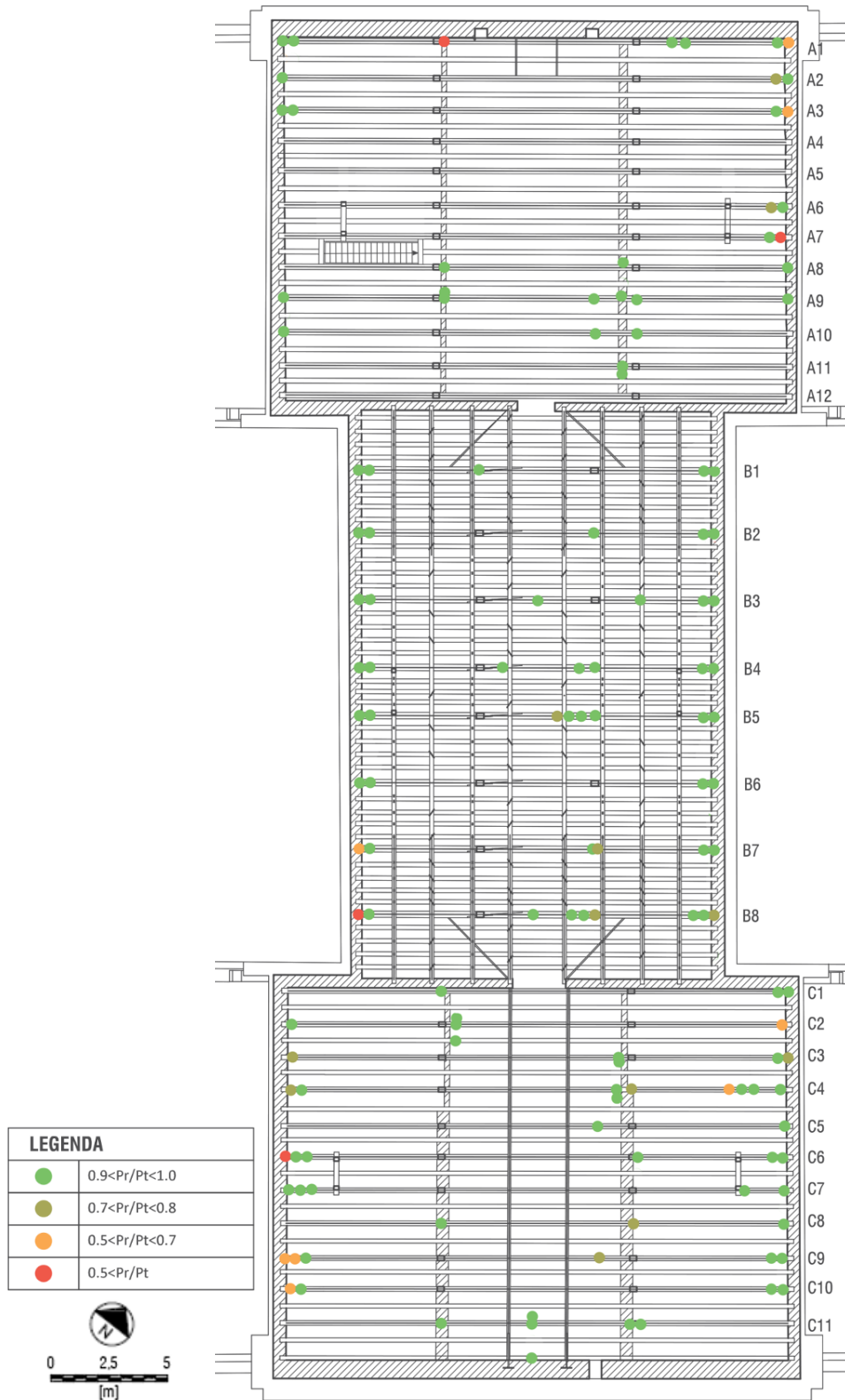


Fig. 4.44: Mappatura dello stato di conservazione delle capriate lignee di copertura del corpo centrale.

4.5.3 Restituzione grafica delle prove di indagine

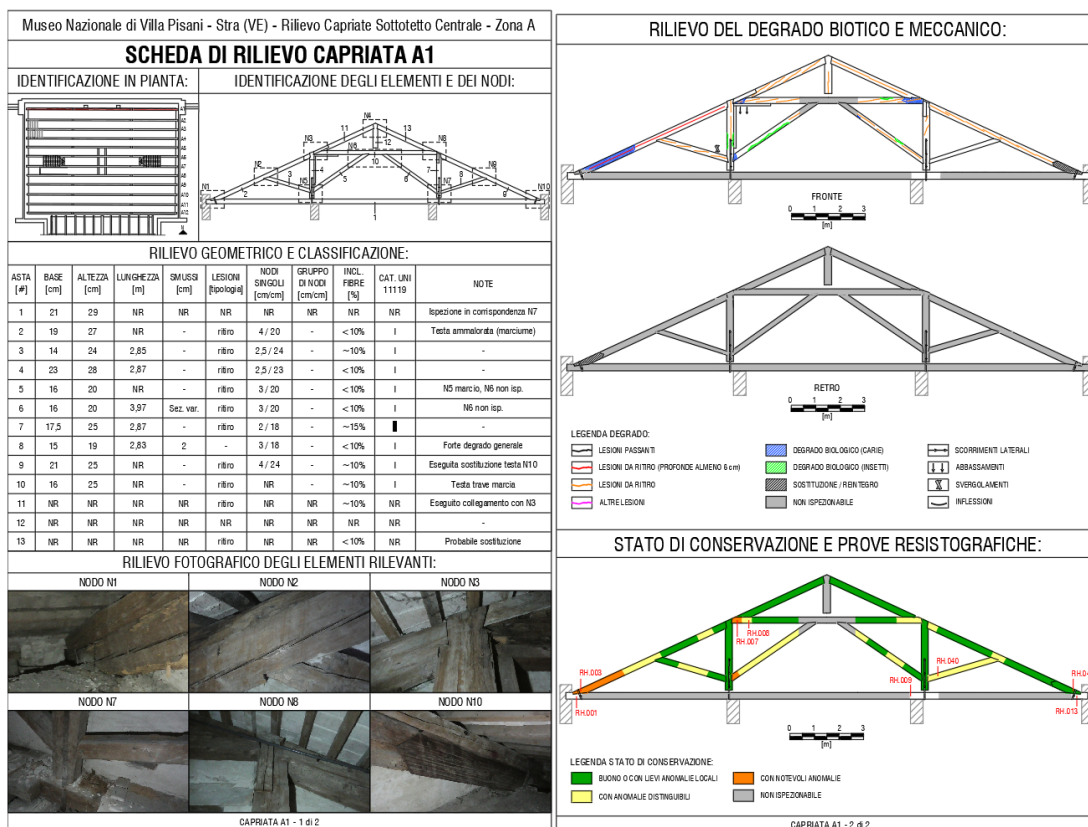
La rappresentazione dei risultati è, in generale, una delle operazioni da compiersi nella maniera più pratica, schematica e leggibile. In tema di edilizia-storica, oltre che con il supporto di tabelle e grafici, è opportuno operare tramite restituzioni grafiche, bidimensionali e tridimensionali, realizzate con l'ausilio di software CAD o BIM.

Relativamente alle indagini in sito, si è provveduto alla loro restituzione grafica per mezzo di specifiche schede, realizzate per ognuna delle 31 capriate palladiane della copertura del corpo centrale della Villa, a partire dal brogliaccio di rilievo. Eseguite le opportune elaborazioni tabellari e grafiche, ogni scheda è stata compilata includendo i dati seguenti:

- denominazione alfanumerica della capriata;
- identificazione in pianta della capriata;
- identificazione delle aste e dei nodi;
- restituzione del rilievo geometrico e classificazione;
- restituzione del rilievo fotografico degli elementi rilevanti;
- restituzione del rilievo del degrado biotico e meccanico (fronte/retro);
- identificazione puntuale delle prove resistografiche.

Tutti gli elementi o le parti di essi non visibili o non raggiungibili con alcuna tipologia di indagine, sono stati classificati come 'non ispezionabili'. La schedatura delle singole capriate è stata effettuata con la finalità di ottenere una rappresentazione sistematica dello stato di conservazione della copertura lignea del corpo centrale di Villa Pisani.

Le schede di rilievo e restituzione grafica sono state allegate in Appendice, limitandosi in questo paragrafo alla loro semplice descrizione. L'obiettivo di ogni singola scheda è quello di raccogliere tutti i principali dati degli elementi strutturali delle capriate lignee della copertura del corpo centrale e di offrire un contributo significativo all'integrazione del livello di conoscenza del complesso museale, oltre che una documentazione aggiornata per eventuali interventi futuri. Come affermato nella norma UNI EN 17121:2019 «il rilevamento e la valutazione delle condizioni forniscono i dati necessari per l'analisi storica, la valutazione della sicurezza strutturale e la pianificazione delle opere di intervento». Appare evidente come i dati raccolti debbano essere restituiti secondo un'impostazione di facile lettura, in considerazione del fatto che le successive valutazioni strutturali potranno essere eseguite da tecnici che non hanno preso parte alle indagini in sito.



L'impostazione generale scelta (Fig. 4.45) rispecchia l'organizzazione puntuale descritta e suddivide la scheda in sezioni che dapprima inquadrano la capriata e ne identificano le aste e i nodi, riportano i dati relativi al rilievo geometrico ed alla classificazione secondo la resistenza prevista dalla norma UNI 11119:2004, danno chiara lettura del rilievo del degrado (biotico e meccanico) e delle anomalie statiche, identificano la posizione delle prove resistografiche eseguite e mostrano la valutazione complessiva dello stato di conservazione della stessa capriata rilevata. Tale procedura consente da un lato una pratica lettura e identificazione dei dati derivanti dalle indagini in sito e da un altro una base di partenza per la definizione del modello meccanico del materiale ligneo, in funzione dello stesso stato di conservazione del legname in opera.

L'esito di tale operazione di schedatura ha consentito la definizione dello stato di conservazione di ogni singola asta delle capriate secondo una scala di valutazione definente lo stesso come:

- buono o con lievi anomalie locali;
- con anomalie distinguibili;
- con notevoli anomalie.

Il recente sviluppo dei software digitali, unito alle conoscenze teoriche e normative, consente una modellazione informativa BIM (*Building Information Modeling*) tramite strumenti che hanno il vantaggio di fornire un modello virtuale tridimensionale che non si limiti alla sola resa 3D, ma che consenta di ottenere un database di informazioni di carattere geometrico, strutturale, costruttivo e storico. Per i manufatti storici esistenti si parla di H-BIM (*Heritage Building Information Modeling*), ossia di un approccio che intende fornire un modello interoperabile che simuli la costruzione dal punto di vista tridimensionale e che ne incorpori le principali caratteristiche geometriche, strutturali, costruttive e storiche, essendo in grado di restituirne abachi ed informazioni e consentendo applicare un processo di *'reverse engineering'*²⁵.

Ai fini del presente lavoro di tesi si è usufruito della modellazione BIM principalmente per la rappresentazione tridimensionale degli elementi (Fig. 4.46), operando l'aggiornamento del modello esistente di Villa Pisani, il quale è stato integrato nelle sue informazioni geometriche e costruttive relativamente al corpo centrale ed agli ambienti del sottotetto, non accessibili al tempo della sua prima versione realizzata.

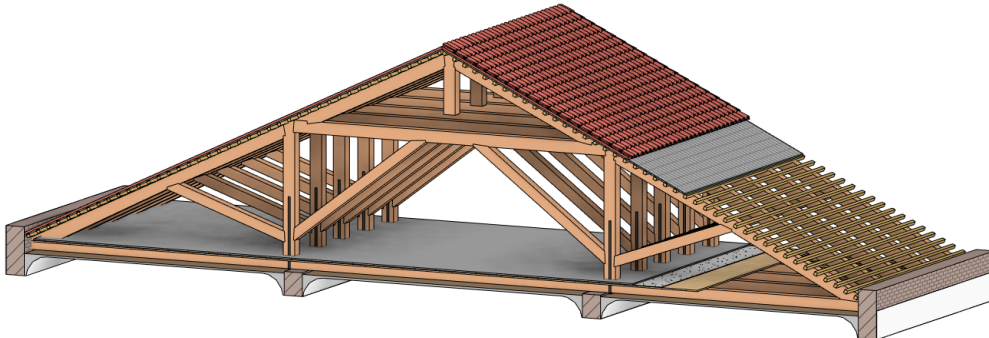


Fig. 4.46: Esempio di modellazione BIM eseguita con il software Autodesk Revit.

In allegato all'elaborato sono consultabili le schede di rilievo delle 31 capriate costituenti le strutture lignee principali del sottotetto del corpo centrale di Villa Pisani Museo Nazionale e quelle delle 121 prove con trapano resistografico, unitamente ai disegni di dettaglio.

²⁵ Il *'reverse engineering'* è un processo atto a identificare le proprietà di un oggetto fisico attraverso l'analisi completa di struttura, funzioni e operatività di tale elemento. L'H-BIM permette di applicare tale processo poiché nel percorso di modellazione si studiano anche i processi costruttivi che hanno portato alla realizzazione del manufatto (Angeletti et al., 2020).

5. ANALISI E MODELLAZIONE NUMERICA

È presentata e descritta in questo capitolo la procedura di analisi e modellazione numerica delle capriate lignee del caso-studio, eseguita attraverso un approccio agli elementi finiti (FEM) con il software Straus7®. Oltre alla definizione dei carichi ed alla loro combinazione, si è voluto dare ampio spazio alle fasi di definizione dei parametri meccanici del materiale ed alla calibrazione del modello, quest'ultima avvenuta tramite opportune analisi parametriche di sensitività. La validazione di due modelli FEM specifici per le 'Capriate Tipo' del sottotetto centrale ha tenuto conto dei risultati delle indagini strumentali svolte in sito.

5.1 Analisi dei carichi

L'analisi dei carichi è stata effettuata nel rispetto delle indicazioni fornite dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (MIT, 2018) e dalla relativa Circolare Esplicativa (MIT, 2019). Si ritiene di riportare sinteticamente alcune formulazioni, indicando il riferimento tecnico per approfondimenti.

5.1.1 Definizione delle azioni

Le azioni agenti sulle costruzioni sono classificabili secondo la variazione della loro intensità nel tempo, definendo per le stesse situazioni permanenti (G), variabili (Q), eccezionali (A) e sismiche (E) da combinarsi in funzione di specifici aspetti.

5.1.1.1 Azioni permanenti

Nei carichi permanenti è stato considerato il peso proprio dei vari elementi distinguendo tra strutturali (g_1) e non strutturali (g_2). Tali azioni sono agenti in direzione verticale e sono riferite alla superficie inclinata della falda della copertura (Fig. 5.1).

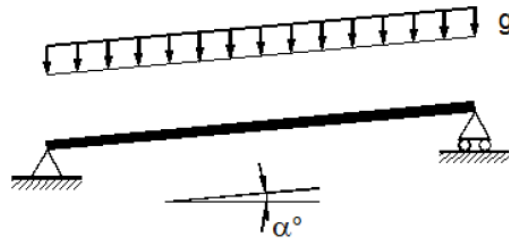


Fig. 5.1: Base di riferimento per le azioni permanenti (Andreolli, Tomasi, 2009).

Il peso proprio strutturale delle capriate lignee è stato considerato come un carico di tipo gravitazionale, in funzione delle relative dimensioni e della massa volumica, definendolo direttamente nel software agli elementi finiti. Brigante e Toraldo (2012), in tema di coperture relative al costruito storico e monumentale, indicano come in passato «il peso proprio della capriata veniva calcolato mediante una relazione di comodo, di tipo empirica, finalizzata a semplificare la trasformazione dei carichi sia al metro quadrato che rispetto alle azioni trasmesse sulle murature». Usualmente la relazione adottata era del tipo:

$$P = K \cdot L^2 \quad [5.1]$$

dove il peso P della capriata è espresso in chilogrammi, K è un coefficiente numerico pari a circa 9 per le capriate lignee e circa 10 per quelle metalliche, mentre L è la luce della capriata espressa in metri. L'adozione di tale formula empirica per valutazioni di massima si è dimostrata un valido supporto pratico nella fase di analisi di calcolo preliminare.

5.1.1.2 Azioni variabili

Nei carichi variabili gravanti sulla copertura sono stati considerati i sovraccarichi²⁶ (q_H) dipendenti dalla destinazione d'uso degli ambienti, l'azione della neve (q_s) e l'azione del vento (q_w). Mentre il sovraccarico agisce in direzione verticale ed è riferito alla superficie inclinata, il carico dovuto alla neve è agente in direzione verticale ma è riferito alla proiezione orizzontale della superficie della falda (Fig. 5.2). Il carico dovuto al vento agisce invece perpendicolarmente alla superficie di copertura (Fig. 5.3). Tali assunzioni saranno considerate nel software di calcolo agli elementi finiti, in fase di definizione dei carichi lineari agenti sui puntoni delle capriate lignee.

²⁶ I valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso sono riportati nella Tab. 3.1.II delle NTC 2018.

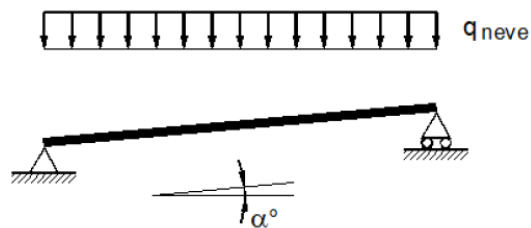


Fig. 5.2: Base di riferimento per l'azione della neve (Andreolli, Tomasi, 2009).

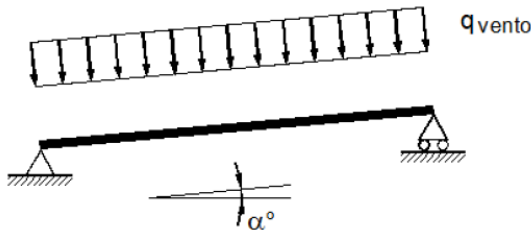


Fig. 5.3: Base di riferimento per l'azione del vento (Andreolli, Tomasi, 2009).

5.1.1.3 Azioni sismiche

Gli effetti dell'azione sismica sono valutabili tenendo conto delle masse associate ai carichi gravitazionali tramite la formulazione definita dalla Normativa Tecnica:

$$E = G_1 + G_2 + \sum_j \Psi_{2j} Q_{kj} \quad [5.2]$$

dove il coefficiente di combinazione Ψ_{2j} risulta essere definito in funzione della categoria d'uso²⁷.

Le capriate sono strutture chiuse che, anche se internamente spingenti, non danno luogo a spinte sulle murature, pertanto su di esse le azioni sismiche verticali sono da considerarsi per luci superiori ai 20 metri. Merita particolare attenzione il collegamento dei vari elementi costituenti l'orditura ed i collegamenti a muro, auspicato dalle normative antisismiche (Ceccotti et al., 2005).

5.1.2 Definizione dei carichi gravanti sulle capriate

Al fine di effettuare l'analisi dei carichi si sono considerate le stratigrafie di calpestio e di copertura degli ambienti del sottotetto definite per mezzo del rilievo geometrico. La restituzione grafica con l'ausilio del software BIM ha consentito di comprendere quali fossero gli effettivi carichi gravanti sulle capriate (Fig. 5.4). Per le zone A e C si è tenuto conto del solo contributo della copertura e del pacchetto di calpestio, poiché quello relativo alle volte in canniciata degli ambienti sottostanti è stato riscontrato gravare sugli elementi lignei di affiancamento alle catene

²⁷ Si veda la Tab. 2.5.1 - Valori dei coefficienti di combinazione delle NTC.

delle capriate, poggianti, oltre che sulle murature d'ambito, anche su quelle intermedie definenti i locali relativi al piano ammezzato della Villa. Differenti osservazioni sono state fatte per la zona B, per la quale si è tenuto in considerazione, oltre che della sua specifica stratigrafia di copertura, anche dei carichi permanenti portati dovuti al peso degli elementi del sistema di sospensione dell'affresco della sala da ballo, la cui volta in cannicciata risulta essere appigliata per mezzo di centinature lignee.

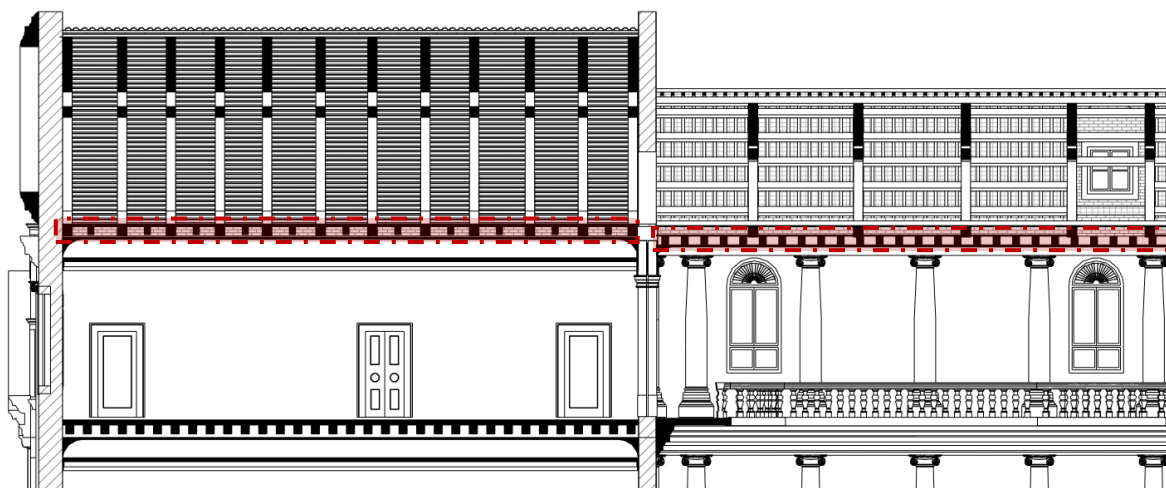


Fig. 5.4: Particolare della sezione longitudinale di Villa Pisani derivata dal modello BIM.
In evidenza gli elementi lignei degli orizzontamenti di calpestio delle zone A e B.

5.1.2.1 Orizzontamento di calpestio del sottotetto della 'Zona A-C'

Fa riferimento al solaio di calpestio che poggia sulle catene delle capriate lignee costituenti la copertura dei locali relativi alle zone A e C del sottotetto centrale. Sulla base della documentazione fornita e del rilievo effettuato in sito, a seguito di opportune ispezioni, è stata definita una stratigrafia (Fig. 5.5) composta da: tavelle (sp. 3 cm), strato di allettamento (sp. 1 cm) e tavolato in legno di abete (sp. 3 cm).

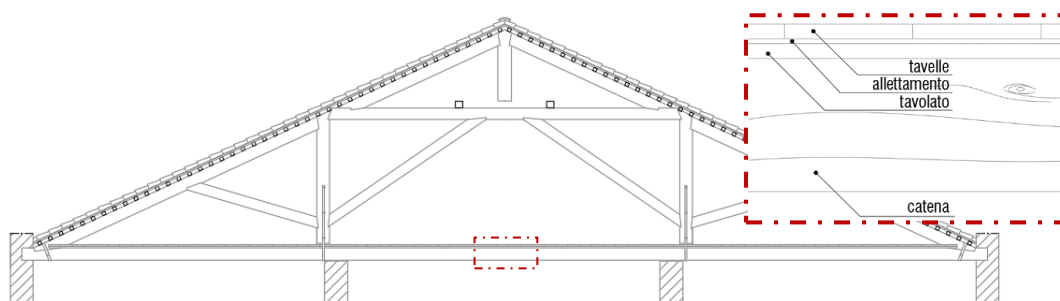


Fig. 5.5: Stratigrafia orizzontamento zone A e C gravante sulle catene delle capriate.

Si riportano di seguito i valori relativi all'analisi dei carichi permanenti:

Tab. 5.1: Analisi dei carichi permanenti relativi al solaio di calpestio della 'Zona A-C'.

Strato	Altezza [m]	Larghezza [m]	Passo [m]	γ [kg/m ³]	Peso [kg/m ²]	Tipo di carico
Tavelle	0,03	0,25	0,25	1700	51	g'_2
Allettamento	0,01	1,00	1,00	1800	18	g'_2
Tavolato	0,03	1,00	1,00	350	11	g'_2
TOTALE	-	-	-	-	80	g'_2

5.1.2.2 Copertura inclinata della 'Zona A-C'

La stessa stratigrafia è presente in corrispondenza delle porzioni di solaio di copertura inclinata dei locali A e C del sottotetto centrale. Dal sopralluogo in sito si è potuto rilevare come la copertura gravi direttamente sulle capriate lignee secondo una soluzione tecnologica (Fig. 5.6) che vede una fitta serie di morali, ad interasse costante, sostenere le tavelle ed il manto di copertura in coppi. Non essendo certa la presenza di una guaina bituminosa a seguito di interventi che hanno interessato altre porzioni della copertura della Villa, tale strato è stato trascurato.

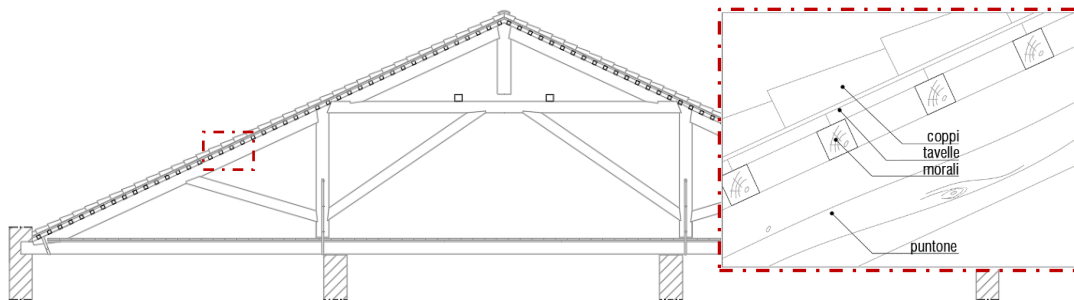


Fig. 5.6: Stratigrafia copertura inclinata delle zone A e C.

Di seguito vengono riportati i valori relativi all'analisi dei carichi permanenti:

Tab. 5.2: Analisi dei carichi permanenti relativi alla copertura inclinata della 'Zona A-C'.

Strato	Altezza [m]	Larghezza [m]	Passo [m]	γ [kg/mc]	Peso [kg/mq]	Tipo di carico
Coppi	-	-	-	-	80	g''_2
Tavelle	0,030	0,250	0,250	1700	51	g''_2
Moralì	0,075	0,075	0,270	450	9	g''_2
TOTALE	-	-	-	-	140	g''_2

5.1.2.3 Orizzontamento di calpestio del sottotetto della 'Zona B'

Fa riferimento al solaio di calpestio che poggia sulle catene delle capriate lignee costituenti la copertura del locale relativo alla 'Zona B' soprastante il salone principale del corpo centrale della Villa (Fig. 5.7a). Sulla base della documentazione fornita e del rilievo effettuato in sito, è stata desunta una soluzione che vede gravare sulle catene delle stesse capriate, un articolato sistema di

sospensione (Fig. 5.7b) a sostegno del controsoffitto affrescato sottostante cui è interposto un tavolato in legno di abete (sp. 3 cm). Al sistema, costituito da travi di ripartizione in legno di larice (sez. 15x15 cm), sono collegate per mezzo di staffe ritorte le travi intermedie tra le capriate (sez. 18x22 cm), cui sono chiodate le centine per la definizione delle volte in cannicciata e lo stesso affresco. Il peso del controsoffitto è stato stimato al metro quadrato considerando quello per unità di volume dello strato di stucchi e degli elementi a supporto per uno spessore medio (sp. 5 cm) come da valutazioni di strutture analoghe effettuate ad esempio da Mazzolani et al. (2004).

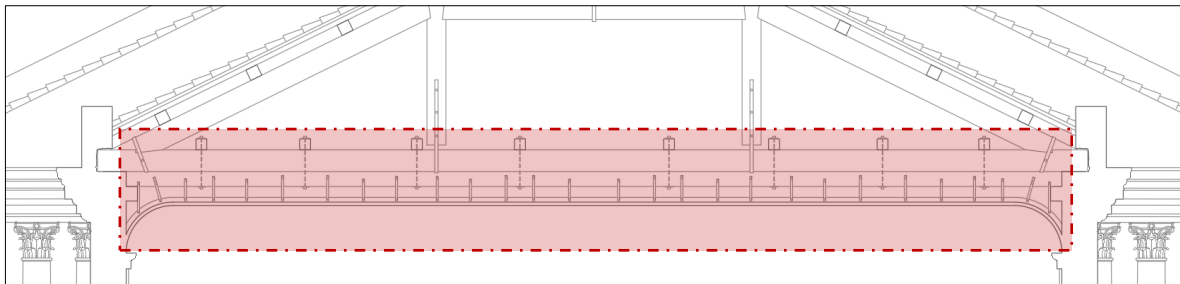


Fig. 5.7a: Individuazione del solaio di calpestio della 'Zona B' nella sezione trasversale.

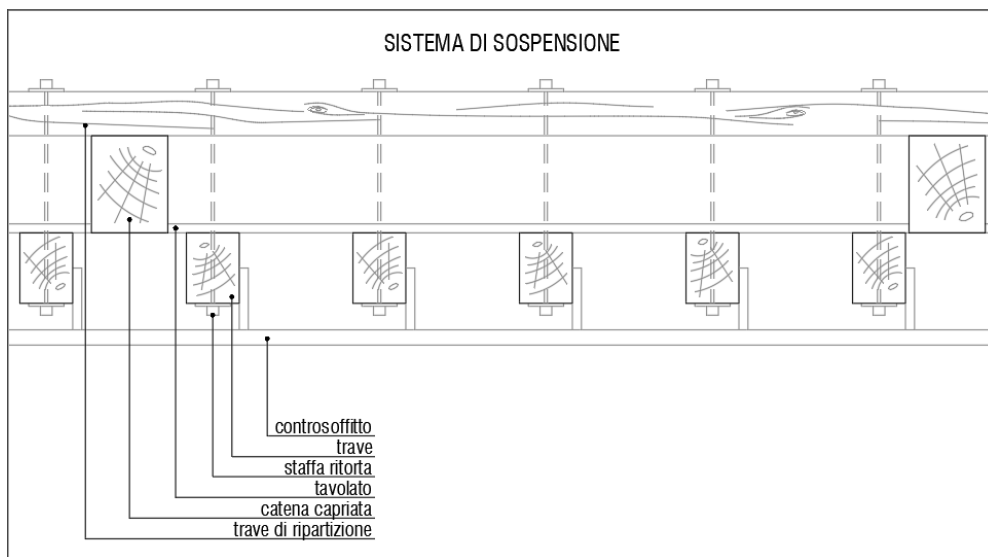


Fig. 5.7b: Dettaglio del sistema di sospensione della 'Zona B' nella sezione longitudinale.

Si riportano di seguito i valori relativi all'analisi dei carichi permanenti:

Tab. 5.3: Analisi dei carichi permanenti relativi al solaio di calpestio della 'Zona B'.

Strato	Altezza [m]	Larghezza [m]	Passo [m]	γ [kg/m ³]	Peso [kg/m ²]	Tipo di carico
Travi di rip.	0,15	0,15	1,75	550	7	g' ₂
Tavolato	0,03	1,00	1,00	350	11	g' ₂
Travi	0,22	0,18	0,55	550	40	g' ₂
Controsoffitto	0,05	1,00	1,00	1500	75	g' ₂
TOTALE	-	-	-	-	133	g'₂

5.1.2.4 Copertura inclinata della 'Zona B'

Tale stratigrafia è presente in corrispondenza del solaio di copertura inclinata che ricopre la porzione centrale dell'edificio, in corrispondenza del salone centrale.

Sulla base dei rilievi in sito e delle tavole tecniche fornite, si è delineata una stratigrafia (Fig. 5.8) che vede gravare sulle capriate i carichi dovuti agli arcarecci in legno di abete, su cui poggia l'orditura secondaria dei morali, della medesima specie legnosa, a sostegno di tavelle in cotto e del manto di copertura in coppi. Non essendo certa la presenza di una guaina bituminosa a seguito di interventi che hanno interessato altre porzioni della copertura, tale strato è stato trascurato.

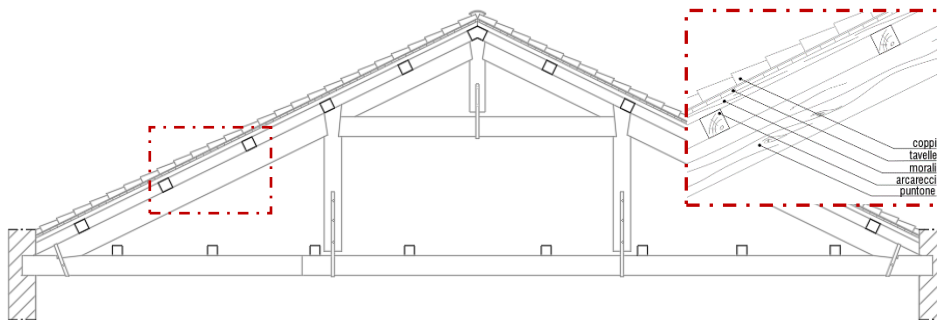


Fig. 5.8: Stratigrafia relativa alla copertura inclinata della 'Zona B'.

Di seguito vengono riportati i valori relativi all'analisi dei carichi di tale copertura:

Tab. 5.4: Analisi dei carichi permanenti relativi alla copertura inclinata della 'Zona B'.

Strato	Altezza [m]	Larghezza [m]	Passo [m]	γ [kg/mc]	Peso [kg/mq]	Tipo di carico
Coppi	-	-	-	-	80	g''_2
Tavelle	0,030	0,250	0,250	1700	51	g''_2
Morali	0,075	0,075	0,270	450	9	g''_2
Arcarecci	0,170	0,180	1,450	450	10	g''_2
TOTALE	0,105	-	-	-	150	g''_2

5.1.2.5 Sovraccarico da manutenzione (q_H)

Trattandosi di ambienti e coperture non praticabili, se non per sole attività di ispezione e manutenzione, il relativo sovraccarico definito dalle norme tecniche è quello indicato come di categoria H, da considerarsi pari a:

$$q_H = 0,50 \text{ [kN/m}^2\text{]} \cong 50 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad [5.3]$$

5.1.2.6 Azione della neve (q_s)

Gli orizzontamenti di copertura inclinata sono sottoposti all'azione della neve che deve essere presa in considerazione con la formula fornita dalla normativa tecnica²⁸:

$$q_s = q_{sk} \mu_i C_E C_t \quad [5.4]$$

L'edificio è localizzato in Zona II ad un'altezza sul livello medio mare $a_s = 9$ metri il cui relativo valore di riferimento del carico neve al suolo è pari a:

$$q_{sk} = 100 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad [5.5]$$

Dalla [5.4], dopo aver assegnato i valori dei vari coefficienti, si ricava:

$$q_s = 80 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad [5.6]$$

con il coefficiente di forma $\mu_i = 0,8$ data l'inclinazione delle falde inferiore a 30° , il coefficiente di esposizione $C_E = 1$ ed il coefficiente termico $C_t = 1$. Si è considerata la condizione di carico più gravosa, ossia di massimo carico su entrambe le falde. Si precisa di aver trascurato il caso di neve aggettante rispetto al bordo della copertura poiché tale condizione non risulta essere rilevante per gli edifici posti ad una quota inferiore a 800 m s.l.m. come indicato nei testi normativi.

5.1.2.7 Azione del vento (q_w)

L'azione dovuta al carico da vento incide in copertura in termini di pressione secondo la seguente relazione fornita dalle norme tecniche²⁹:

$$q_w = q_r c_e c_p c_d \quad [5.7]$$

dove q_r è la pressione cinetica di riferimento, c_e il coefficiente di esposizione, c_p quello di forma e c_d quello dinamico.

L'edificio è localizzato in Zona 1 ad un'altezza sul livello medio mare $a_s = 9$ m; ne consegue che la velocità base di riferimento sia pari a $v_{b,0} = 25$ m/s ed il relativo coefficiente di altitudine risulti $c_a = 1$. La velocità di riferimento finale, assumendo un periodo di ritorno T_r pari a 50 anni, cui corrisponde un coefficiente di ritorno $c_r = 1$, risulta essere anch'essa pari a $v_r = 25$ m/s. La pressione cinetica di riferimento può calcolarsi come:

²⁸ Si veda il capitolo delle NTC 3.4 - Azioni della neve.

²⁹ Si veda il capitolo delle NTC 3.3 - Azioni del vento.

$$q_r = \frac{1}{2} \rho v_r^2 = 0,39 \text{ kN/m}^2 \quad [5.8]$$

dove ρ è la densità dell'aria, assunta convenzionalmente costante e pari a $1,25 \text{ kg/m}^3$. Considerando una classe di rugosità del terreno di tipo B, ne consegue una categoria di esposizione del sito di tipo III, tramite i cui parametri è possibile determinare il coefficiente di esposizione c_e tenendo conto che il colmo della copertura risulta ad una quota maggiore di quella fornita dai valori tabellari³⁰. Tramite la specifica formulazione si ottiene:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] = 2,20 \quad [5.9]$$

dove: $k_r=0,20$; $z_0=0,10$ e $c_t=1$.

Ai fini della determinazione del coefficiente di esposizione c_p si assume che la costruzione sia stagna e quindi che le pressioni interne siano nulle. Relativamente alle pressioni esterne, si osserva che per vento incidente perpendicolarmente alla direzione del colmo, nel caso di falda sopravento, le pressioni possono variare rapidamente da valori positivi a valori negativi, di conseguenza sono stati considerati i relativi coefficienti di pressione esterna con entrambi i segni. Assunta una pendenza delle falde pari a $\alpha = 25^\circ$ si ottengono:

$$\text{sopravento:} \quad c_{pe}^- = -1 + (\alpha + 15) / 75 = -0,47 \quad [5.10]$$

$$c_{pe}^+ = \alpha / 75 = +0,33 \quad [5.11]$$

$$\text{sottovento:} \quad c_{pe}^- = -0,6 + (\alpha - 15) / 100 = -0,50 \quad [5.12]$$

Tramite la [5.7], dopo aver assegnato i valori ai vari coefficienti, si ricavano i valori assunti dall'azione del vento nelle condizioni di falda, rispettivamente, sopra e sottovento:

$$\text{sopravento:} \quad q_w^- = -40 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad [5.13]$$

$$q_w^+ = +28 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad [5.14]$$

$$\text{sottovento:} \quad q_w^- = -43 \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad [5.15]$$

dove il coefficiente dinamico c_d si è assunto convenzionalmente pari ad 1.

5.1.3 Combinazione delle azioni

Preliminarmente alla combinazione delle azioni si sono rese necessarie alcune considerazioni in funzione della geometria della copertura e dei carichi agenti sulle capriate lignee. Il rilievo geometrico ha fornito i dati relativi all'inclinazione delle falde ed all'interasse tra le stesse capriate (Tab. 5.5), così da poter esprimere le azioni agenti al metro lineare.

³⁰ Si veda la Tab. 3.3.II - *Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione* delle NTC.

Tab. 5.5: Dati geometrici relativi alla copertura delle zone.

Zona	Inclinazione [°]	Luce [m]	Interasse [m]
'Zona A'	24,8	19,55	1,25
'Zona B'	26,2	14,15	2,70
'Zona C'	25,2	19,55	1,25

Nonostante tali operazioni siano state semplificate grazie all'ausilio del software di calcolo, si è provveduto alla valutazione delle stesse anche per via analitica classica, con l'obiettivo di avere un riscontro dei risultati e poter definire la combinazione di carico più rilevante, da analizzarsi ai fini delle verifiche. Si riportano a seguire i carichi al metro lineare agenti sulle capriate precisando di aver assunto per il peso proprio di queste ultime dei valori di riferimento in funzione della luce e della specie legnosa (Ceccotti et al., 1998). Ai fini della scomposizione dei carichi (Fig. 5.9) si è assunto un angolo di inclinazione della falda medio pari ad $\alpha = 25^\circ$ mentre per l'azione del vento è stato considerato il solo caso di pressione, poiché per coperture in zone non particolarmente esposte, l'influenza della depressione è in genere modesta e non in grado di sollevare la struttura o parte di essa, se non per eventi eccezionali.

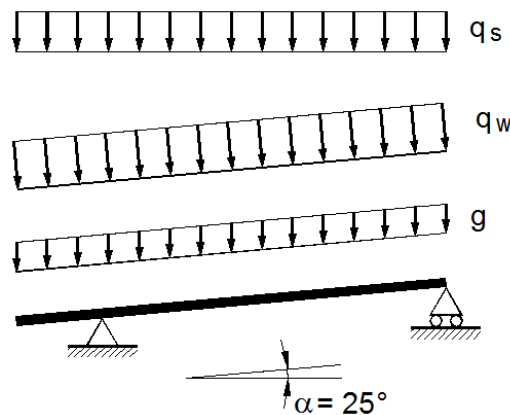


Fig. 5.9: Schema statico dei carichi agenti sulla falda in copertura (Andreolli, Tomasi, 2009).

Le combinazioni delle azioni da adottarsi in accordo alle norme tecniche sono date dalla relazione [5.16] in considerazione del fatto che la durata dell'azione influenza la resistenza del materiale, attribuendo quindi a ciascuna azione una classe di durata del carico.

$$F_d = \gamma_{G1} \cdot G_{k1} + \gamma_{G2} \cdot G_{k2} + \gamma_Q \cdot \left[Q_{k1} + \sum_{i=2}^{i=n} \psi_{0i} \cdot Q_{ik} \right] \quad [5.16]$$

Per il caso-studio in esame, essendo il carico da neve l'azione base da considerarsi³¹, risultano rilevanti due possibili combinazioni — oltre a quella legata ai carichi permanenti — che vedono una durata istantanea (comprendente anche l'azione del vento) e una durata breve (senza l'azione del vento). Il sovraccarico di manutenzione non risulta combinabile con l'azione da neve in copertura, mentre sarà considerato come un peso agente sulle catene delle capriate ai fini delle verifiche di compressione ortogonale alla fibratura.

Le combinazioni significative sono quindi:

- C.I (permanente) $F_d^I = 1,3 \cdot (G_{1\perp} + G_{2\perp})$ [5.17]

- C.II (istantanea) $F_d^{II} = 1,3 \cdot (G_{1\perp} + G_{2\perp}) + 1,5 \cdot Q_{s\perp}$ [5.18]

- C.III (breve) $F_d^{III} = 1,3 \cdot (G_{1\perp} + G_{2\perp}) + 1,5 \cdot [Q_{s\perp} + 0,6 \cdot Q_{w\perp}]$ [5.19]

dove i valori dei carichi proiettati in direzione ortogonale all'asse dei puntoni sono dati:

$$G_{i\perp} = G_i \cdot \cos \alpha \quad [5.20]$$

$$Q_{s\perp} = Q_s \cdot (\cos \alpha)^2 \quad [5.21]$$

$$Q_{w\perp} = Q_w \quad [5.22]$$

espressi al metro lineare a partire dai valori al metro quadrato definiti nelle analisi dei carichi.

In generale, in funzione dello specifico interasse tra le capriate lignee, risulta:

$$Q_i = q_i \cdot i \quad [5.23]$$

da considerarsi per le due tipologie di 'Capriata Tipo', con diverso interasse e orditura lignea.

5.1.3.1 Combinazione rilevante per la 'Capriata Tipo A-C'

In funzione dello specifico interasse tra le capriate dei locali A e C, i carichi al metro lineare agenti risultano avere i valori caratteristici di seguito determinati:

- Azioni permanenti:

$$G_{1_A-C} = 1,75 \text{ kN/m}$$

³¹ Nel caso di combinazioni di carichi di durata differente si deve far riferimento al carico di durata più breve per la determinazione della classe di durata della combinazione. Sono infatti le sollecitazioni di valore più elevato a causare il danneggiamento e quindi la rottura del materiale: tali sollecitazioni sono presenti soltanto durante l'azione contemporanea di tutti i carichi previsti dalla combinazione considerata, che si verifica soltanto durante un lasso di tempo paria alla durata dell'azione più breve fra quelle contenute nella combinazione considerata (Andreolli, 2009).

$$G'_{2,A-C} = g'_{2,A-C} \cdot i_{A-C} = 0,80 \cdot 1,25 \cong 1,00 \text{ kN/m}$$

$$G''_{2,A-C} = g''_{2,A-C} \cdot i_{A-C} = 1,40 \cdot 1,25 \cong 1,75 \text{ kN/m}$$

▪ Azioni variabili:

$$Q_{H,A-C} = q_{H,A-C} \cdot i_{A-C} = 0,50 \cdot 1,25 \cong 0,63 \text{ kN/m}$$

$$Q_{s,A-C} = q_{s,A-C} \cdot i_{A-C} = 0,80 \cdot 1,25 \cong 1,00 \text{ kN/m}$$

$$Q_{w,A-C} = q_{w,A-C} \cdot i_{A-C} = 0,28 \cdot 1,25 \cong 0,35 \text{ kN/m}$$

La cui proiezione in copertura secondo le [5.20-5.21-5.22] è pari a:

▪ Azioni permanenti:

$$G_{1,A-C \perp} = 1,75 \cdot \cos 25^\circ = 1,58 \text{ kN/m}$$

$$G'_{2,A-C \perp} = 1,00 \text{ kN/m}$$

$$G''_{2,A-C \perp} = 1,75 \cdot \cos 25^\circ = 1,58 \text{ kN/m}$$

▪ Azioni variabili:

$$Q_{H,A-C \perp} = 0,63 \text{ kN/m}$$

$$Q_{s,A-C \perp} = 1,00 \cdot (\cos 25^\circ)^2 \cong 0,82 \text{ kN/m}$$

$$Q_{w,A-C \perp} = 0,35 \text{ kN/m}$$

Tramite le [5.17-5.18-5.19] si ottengono le combinazioni seguenti:

- $F^I_{d,A-C} = 1,3 \cdot (1,58 + 1,58) = 4,11 \text{ kN/m}$
- $F^{II}_{d,A-C} = 1,3 \cdot (1,58 + 1,58) + 1,5 \cdot 0,82 = 5,34 \text{ kN/m}$
- $F^{III}_{d,A-C} = 1,3 \cdot (1,58 + 1,58) + 1,5 \cdot [0,82 + 0,6 \cdot 0,35] = 5,66 \text{ kN/m}$

che risultano differire nella durata di carico e nella loro entità. Dal confronto tra il rapporto tra le combinazioni e quello tra i relativi coefficienti correttivi k_{mod} in funzione della durata del carico, è possibile affermare che, dal momento che:

- $F^{III}_{d,A-C} / F^{II}_{d,A-C} = 5,66/5,34 = 1,05$
- $k^{III}_{mod} / k^{II}_{mod} = 1,10/0,90 = 1,22$

passando dalla combinazione C.II alla combinazione C.III la riduzione dei valori della resistenza sia maggiore rispetto alla riduzione dei valori dei carichi, con il risultato che per le verifiche allo Stato Limite Ultimo la combinazione C.II sia quella determinante.

5.1.3.2 Combinazione rilevante per la 'Capriata Tipo B'

In funzione dello specifico interasse tra le capriate della zona B, i carichi al metro lineare agenti risultano avere i valori caratteristici di seguito determinati:

- Azioni permanenti:

$$G_{1,B} = 1,25 \text{ kN/m}$$

$$G'_{2,B} = g'_{2,B} \cdot i_B = 1,33 \cdot 2,70 \cong 3,59 \text{ kN/m}$$

$$G''_{2,B} = g''_{2,B} \cdot i_B = 1,50 \cdot 2,70 \cong 4,05 \text{ kN/m}$$

- Azioni variabili:

$$Q_{H,B} = q_{H,B} \cdot i_B = 0,50 \cdot 2,70 \cong 1,35 \text{ kN/m}$$

$$Q_{s,B} = q_{s,B} \cdot i_B = 0,80 \cdot 2,70 \cong 2,16 \text{ kN/m}$$

$$Q_{w,B} = q_{w,B} \cdot i_B = 0,28 \cdot 2,70 \cong 0,76 \text{ kN/m}$$

La cui proiezione in copertura secondo le [5.20-5.21-5.22] è pari a:

- Azioni permanenti:

$$G_{1,B\perp} = 1,25 \cdot \cos 25^\circ = 1,13 \text{ kN/m}$$

$$G'_{2,B\perp} = 3,59 \text{ kN/m}$$

$$G''_{2,B\perp} = 4,05 \cdot \cos 25^\circ = 3,67 \text{ kN/m}$$

- Azioni variabili:

$$Q_{H,B\perp} = 1,35 \text{ kN/m}$$

$$Q_{s,B\perp} = 2,16 \cdot (\cos 25^\circ)^2 \cong 1,77 \text{ kN/m}$$

$$Q_{w,B\perp} = 0,76 \text{ kN/m}$$

Tramite le [5.17-5.18-5.19] si ottengono le combinazioni seguenti:

- $F_{d,B}^I = 1,3 \cdot (1,13 + 3,67) = 6,24 \text{ kN/m}$
- $F_{d,B}^{II} = 1,3 \cdot (1,13 + 3,67) + 1,5 \cdot 1,77 = 8,90 \text{ kN/m}$
- $F_{d,B}^{III} = 1,3 \cdot (1,13 + 3,67) + 1,5 \cdot [1,77 + 0,6 \cdot 0,76] = 9,58 \text{ kN/m}$

che risultano differire nella durata di carico e nella loro entità. Dal confronto tra il rapporto tra le combinazioni e quello tra i relativi coefficienti correttivi k_{mod} in funzione della durata del carico, è possibile affermare che, dal momento che:

- $F_{d,B}^{III} / F_{d,B}^{II} = 9,58/8,90 = 1,08$

- $k_{\text{mod}}^{\text{III}} / k_{\text{mod}}^{\text{II}} = 1,10/0,90 = 1,22$

passando dalla combinazione C.II alla combinazione C.III la riduzione dei valori della resistenza sia maggiore rispetto alla riduzione dei valori dei carichi, con il risultato che per le verifiche allo Stato Limite Ultimo la combinazione C.II sia quella determinante.

5.2 Analisi agli elementi finiti

I metodi ad elementi finiti (*Finite Element Method* - FEM) sono metodi che risolvono in modo approssimato equazioni differenziali alle derivate parziali riducendole ad un sistema di equazioni algebriche. Si applicano a corpi fisici suscettibili di essere suddivisi in più elementi di forma definita e dimensioni contenute, dai quali è possibile ricostruire il comportamento della struttura combinandone i comportamenti, tenendo conto delle condizioni di vincolo e dei carichi agenti sull'oggetto trattato e garantendo la continuità degli spostamenti e delle deformazioni. Il fine della costruzione di un modello FEM è quello di studiare il comportamento di un elemento strutturale e verificarne la capacità resistente, utilizzando analisi automatizzate di tipo numerico.

Trattandosi di metodi sofisticati è necessario modellare con strategie che semplifichino efficacemente l'oggetto dell'analisi, in particolare è possibile optare per criteri di macro o micro modellazione. Nell'ambito della macro-modellazione la struttura viene schematizzata attraverso elementi finiti (bidimensionali o tridimensionali) che ne descrivono il comportamento meccanico. Le procedure di micro-modellazione si basano invece sulla modellazione dei singoli componenti che compongono la struttura tramite elementi continui. Il comportamento d'insieme viene poi regolato da specifici elementi a comportamento non lineare che descrivono le proprietà meccaniche dell'interfaccia di connessione.

Nel caso-studio in esame si è ricorso alla macro-modellazione tramite l'ausilio del software Straus7®, distribuito dalla società HSH Srl, del quale è stata concessa una specifica licenza accademica ai fini delle analisi numeriche del presente elaborato.

5.2.1 Definizione della geometria strutturale

A partire dal rilievo geometrico, si è preliminarmente generato un modello CAD bidimensionale per entrambe le 'Capriate Tipo', associando ognuna delle aste componenti ad un differente *layer*. La definizione della geometria è avvenuta individuando l'asse di ogni elemento ligneo, avendo cura di raccordare in un unico punto le aste convergenti nei nodi. Dall'ambiente

CAD si è passati a quello FEM tramite un file in formato 'IGES', importato nel software ad elementi finiti, nel quale si è definito un modello (Fig. 5.10) che ha visto:

- i puntoni e le catene modellati con elementi tipo *beam*;
- la controcatena, i monaci e le saette modellati con elementi tipo *truss*.

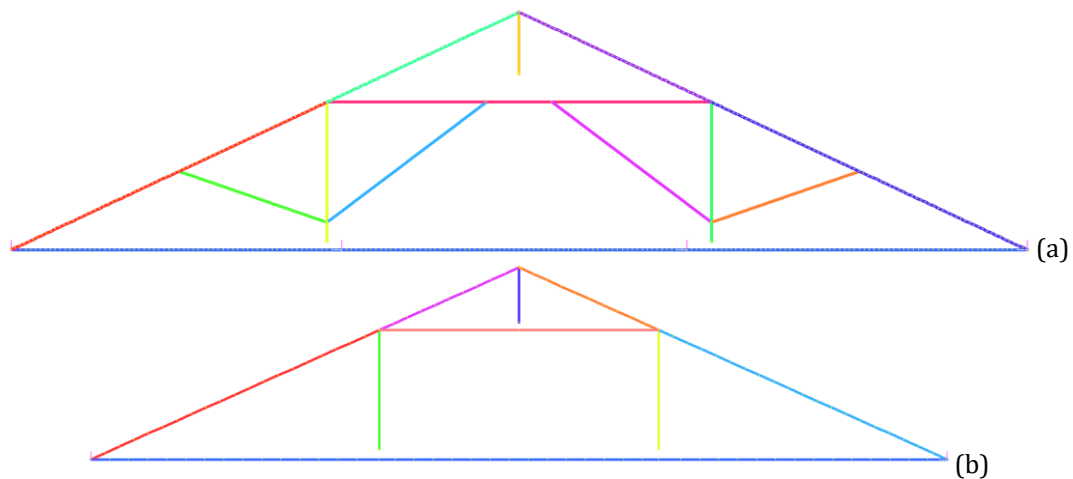


Fig. 5.10: Modelli agli elementi finiti delle 'Capriate Tipo':
 (a) 'Capriata Tipo A-C' palladiana composta con saette,
 (b) 'Capriata Tipo B' palladiana composta.

Gli elementi finiti di tipo *beam* sono elementi unidimensionali collegati tra due nodi alle loro estremità, la cui dimensione principale è la lunghezza. Nella loro forma più generale supportano sforzi assiali, di taglio e di momento flettente. Oltre alla formulazione convenzionale, vi sono specifiche definizioni, quali ad esempio gli elementi tipo *truss*, definiti per supportare i soli sforzi assiali. Per le capriate del caso-studio in esame, gli elementi tipo *beam* sono stati considerati unicamente per i puntoni e la catena, visto il gravare sugli stessi dei carichi distribuiti dovuti agli orizzontamenti di calpestio e copertura, che inducono azioni flettenti e taglianti. Per i monaci, la controcatena e le saette è stato assunto un comportamento puramente assiale tramite gli elementi tipo *truss*. Alla definizione degli elementi è seguita, per ogni asta, l'introduzione delle dimensioni delle sezioni con riferimento alle misure medie del rilievo geometrico, trascurando eventuali smussi e rastremazioni.

5.2.2 Definizione delle condizioni di vincolo e di carico

La capriata viene generalmente assimilata a una struttura reticolare i cui elementi sono collegati da nodi a cerniera. Nel caso di monaco distaccato dalla catena è possibile rimuovere il vincolo tra la catena e lo stesso monaco ottenendo uno schema strutturale che è più simile a quello di un arco a tre cerniere. Al fine di tener conto delle condizioni di sollecitazione effettive dei singoli

elementi della capriata, è necessario considerare la presenza di un carico distribuito sui puntoni, per i quali lo schema statico diventa quello di una trave in semplice appoggio. La presenza di eventuali saette, come nel caso delle 'Capriate Tipo A-C', oltre ad essere un collegamento tra il puntone ed il monaco, costituisce un supporto intermedio per il puntone stesso.

Per le capriate in esame si è ricorso alla definizione di opportune condizioni di vincoli interne tra le aste, introducendo degli specifici attributi agli elementi tipo *beam*. Operando attraverso il comando *end-releases* sono stati definiti degli svincoli parziali alle estremità degli elementi finiti, al fine di considerare la condizione di vincolo di cerniera interna nei nodi tra le varie aste. Gli appoggi delle catene alla muratura hanno invece visto la definizione di opportune condizioni di vincolo esterno secondo la tipologia classica di carrello semplice, unitamente a quella di cerniera in appoggio.

5.2.3 Definizione dei parametri meccanici

Sulla base di quanto esposto e definito al § 3.3.1 in merito al modello meccanico del materiale legno, si è proceduto ad una prima definizione dei parametri meccanici correlando i risultati delle prove di indagine alle classi di resistenza per uso generale nei codici strutturali. Aveta e Monaco (2007) hanno determinato una correlazione tra le categorie definite dalla norma UNI 11119 e le classi di resistenza della norma UNI EN 338³² (Tab. 5.6).

Tab. 5.6: Correlazione tra UNI 11119 e UNI EN 338 (Aveta e Monaco, 2007).

Specie legnosa	Categoria UNI 11119:2004	Classe UNI EN 338:2004
Abete Rosso	I	C24
	II	C20
	III	C16
Larice	I	C30
	II	C24
	III	C18

A partire da tale corrispondenza, per ognuna delle due specie legnose delle capriate in esame, si è provveduto a valutare e confrontare i valori dei parametri meccanici in considerazione delle assunzioni generali in letteratura (Bodig e Jayne, 1982) e delle proprietà meccaniche definite dalla norma UNI EN 338³³. I risultati ottenuti hanno fin da subito evidenziato la necessità di eseguire delle specifiche analisi ai fini della calibrazione del modello FEM.

³² Si veda quanto esposto al § 1.2.4 e la relativa Fig. 1.11.

³³ Si vedano le relazioni [3.7], [3.8], [3.9] e la Fig. 3.20.

5.3 Calibrazione del modello

L'analisi di sensitività di un modello matematico è quel processo attraverso il quale viene studiato come varia la sua risposta al variare di alcuni dei suoi dati di *input*. In ambito ingegneristico l'analisi di sensitività comprende tecniche che consentono all'analista di capire come le risposte di una struttura sono influenzate da modifiche alle variabili legate a parametri specifici legati alle proprietà del materiale, alle proprietà geometriche, alle condizioni al contorno.

5.3.1 Analisi Parametriche di Sensitività

La calibrazione del modello agli elementi finiti delle 'Capriate Tipo' è avvenuta tramite analisi parametriche di sensitività (APS), grazie alle quali, al variare di un parametro specifico, è stato possibile analizzare l'andamento di quantità di riferimento per confrontarle con quelle misurate in sito. L'approccio di calibrazione si è basato sulla valutazione degli spostamenti noti in condizioni di carico soggette al peso proprio ed ai carichi permanenti strutturali, in funzione della variazione del parametro meccanico relativo al modulo di elasticità parallelo alla fibratura. A partire dai moduli elastici definiti per il legno nuovo e integro, si è operata una riduzione percentuale in funzione dei valori correlati alle categorie di classificazione fino ad ottenere degli abbassamenti confrontabili con quelli registrati in fase di rilievo.

5.3.1.1 'Capriata Tipo A-C'

Le analisi parametriche di sensitività per la 'Capriata Tipo A-C' si sono basate sulla quantità di riferimento misurata in sito relativa agli abbassamenti dei monaci (d_m). Tale scelta è da considerarsi valida a fronte della concezione strutturale che vede la presenza degli appoggi intermedi, garantiti dalla presenza delle murature degli ambienti del piano ammezzato. In tale posizione non sono possibili quindi abbassamenti per la catena che si rivela un riferimento per la misura degli eventuali abbassamenti degli stessi monaci. (Fig. 5.11).

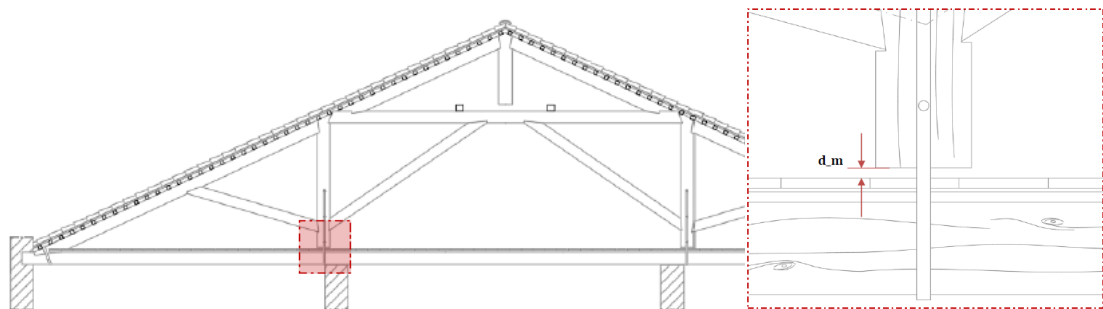


Fig. 5.11: Quantità di riferimento per le APS della 'Capriata Tipo A-C'.

Il rilievo e le specifiche ispezioni hanno permesso di constatare come per alcune capriate si siano registrati abbassamenti nell'ordine del centimetro ($1 \div 3$ cm), valore obiettivo delle stesse analisi parametriche di sensitività. A partire dal valore del modulo di elasticità parallelo alla fibratura (E_0) relativo al legno nuovo di abete rosso, si è registrato un abbassamento congruo ai dati di rilievo per una riduzione percentuale pari al 74%, ottenuto alla sesta analisi (Tab. 5.7).

Tab. 5.7: APS relative alla 'Capriata Tipo A-C' in abete rosso.

#	E_0 [MPa]	d_m [m]	Difetti [-]	ΔE [%]
1	11710	-3,98E-03	-	0%
2	11000	-4,88E-03	cat. I	6%
3	9500	-4,69E-03	cat. II	19%
4	8000	-5,54E-03	cat. III	32%
5	5500	-9,32E-03	> cat. III	53%
6	3000	-1,55E-02	> cat. III	74%

5.3.1.2 'Capriata Tipo B'

Il parametro di riferimento per le analisi parametriche della 'Capriata Tipo B' è stata la distanza (d_c) tra l'intradosso della catena e la staffa metallica di contenimento chiodata ai monaci (Fig. 5.12), rilevata in sito mediamente pari ai 3 centimetri. La concezione strutturale vede la catena secondo lo schema statico di una trave in semplice appoggio caricata dal peso proprio non strutturale del sistema di sospensione a sostegno del controsoffitto affrescato.

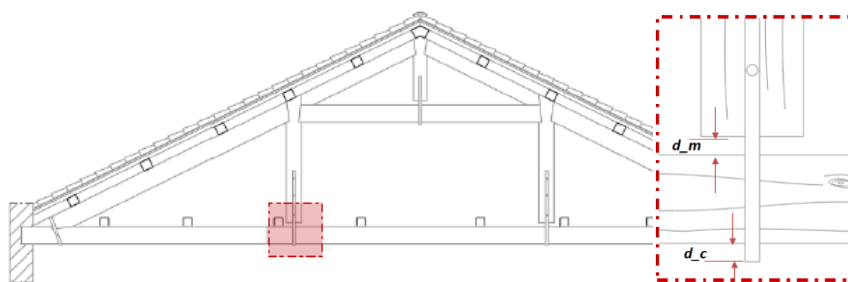


Fig. 5.12: Quantità di riferimento per le APS della 'Capriata Tipo B'.

Fin dalla prima analisi parametrica di sensitività, condotta con il valore del modulo di elasticità parallelo alla fibratura (E_0) relativo al legno nuovo di larice, si è registrato un abbassamento eccessivo che ha richiesto la ridefinizione del modello FEM, integrandolo considerando la presenza delle staffe in ferro nel nodo puntone-catena, modellate per mezzo di elementi *link* come indicato in letteratura³⁴ per la modellazione di capriate lignee con il software Straus7®. Tale

³⁴ Carino C., *Modellazione ed analisi agli elementi finiti di capriate lignee alla lombarda*, Collana rapporti scientifici, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia, A.A. 2016/17.

soluzione ha fornito risultati più attendibili in termini di abbassamenti, consentendo di ottenere il valore di riferimento cercato per una riduzione del 75% del modulo di elasticità del legno nuovo, ottenuta alla sesta riduzione (Tab. 5.8).

Tab. 5.8: APS relative alla 'Capriata Tipo B' in larice.

#	E_0 [MPa]	d_c [m]	Difetti [-]	ΔE [%]
1*	14130	-3,05E-02	-	0%
2*	12000	-3,46E-02	cat. I	15%
3*	11000	-3,75E-02	cat. II	22%
4*	9000	-4,56E-02	cat. III	36%
5*	7000	-6,15E-02	> cat. III	50%
6*	3500	-1,12E-01	> cat. III	75%

* APS eseguita con staffa in ferro su nodo catena-puntone.

5.3.1.3 Modellazione delle staffe di collegamento

A seguito dell'introduzione degli elementi *link* per la modellazione delle staffe in ferro del nodo puntone-catena per la 'Capriata Tipo B', si è ricorso a tale soluzione anche per la 'Capriata Tipo A-C' vista la presenza delle staffe anche per tale nodo, come rilevato in sito. Nello specifico, la modellazione è avvenuta secondo due differenti soluzioni: la prima di tipo rigido, definita *rigid link* nel software Straus7[®], che consente di imporre una connessione infinitamente rigida tra due nodi di un elemento; la seconda di tipo funzionale, definita *master-slave link*, con possibilità di vincolo degli spostamenti e delle rotazioni relative attorno all'asse perpendicolare al piano dell'elemento. Dall'analisi delle risposte dei modelli si è visto come questa seconda soluzione porti ad una deformata rispondente alla struttura reale, simulando la staffa di contenimento e definendo il nodo come semi-rigido³⁵. La soluzione di collegamento rigido si è invece adottata per definire le staffe tra i monaci e la catena o tra il monaco superiore e la controcattena, al fine di evitare anomali spostamenti degli stessi monaci, vincolati alla sola loro estremità superiore.

La modellazione delle staffe ha contribuito alla calibrazione del modello FEM portando a risultati più attendibili in termini di spostamento, in funzione della variazione del modulo di elasticità E_0 . Il confronto dei risultati di calibrazione tra le capriate modellate con la simulazione delle staffe in ferro e l'assenza di queste ultime, mostra come una corretta modellazione e rappresentazione dello stato di fatto, seppure semplificata, incida notevolmente (Figg. 5.13-5.14).

³⁵ Appare evidente l'importanza, per una corretta modellazione della capriata, pur con metodi non eccessivamente sofisticati, di una corretta valutazione del comportamento semi-rigido dei nodi che, essendo collegamenti di carpenteria tradizionali, risultano abbastanza lontani dalle usuali schematizzazioni (Piazza, 2007).

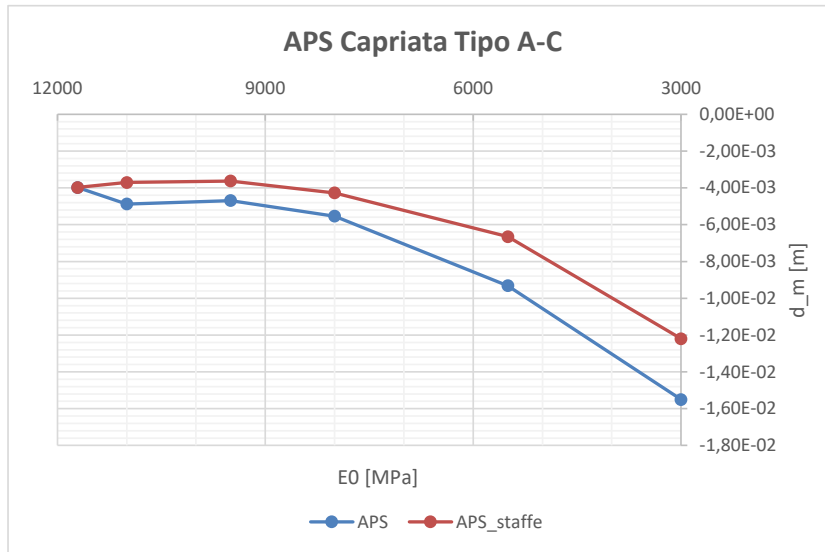


Fig. 5.13: Confronto tra le diverse modellazioni per le 'Capriate Tipo A-C'.

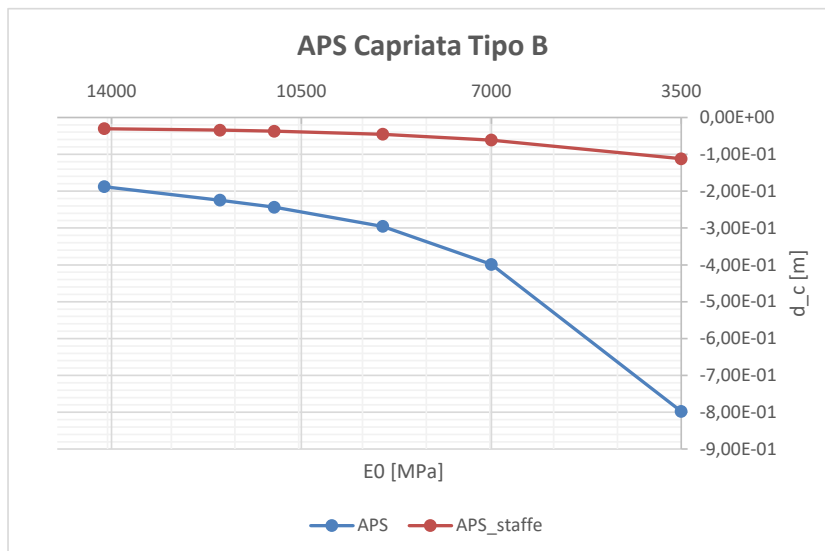


Fig. 5.14: Confronto tra le diverse modellazioni per le 'Capriate Tipo B'.

5.3.1.4 Introduzione dell'ortotropia del materiale

A margine delle analisi di calibrazione del modello si è voluto introdurre una più corretta considerazione del modulo di elasticità. La modellazione con elementi finiti di tipo *beam* consente infatti di considerare il materiale solamente come isotropo ma il legno è caratterizzato dall'ortotropia rispetto alle direzioni parallela ed ortogonale alla fibratura che ha effetto sul modulo E. A partire dalla legge costitutiva del materiale tra tensioni e deformazioni si può definire un modulo di elasticità equivalente (E^*) che tiene conto del minore modulo di elasticità trasversale (E_{90}) rispetto a quello longitudinale (E_0) (Belletti et al., 2005).

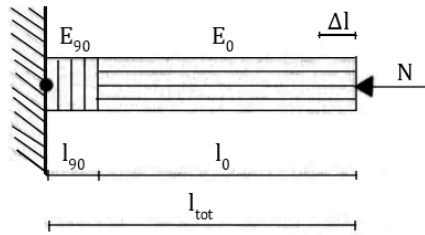


Fig. 5.15: Schema di riduzione del modulo di elasticità E^* in considerazione dell'ortotropia (Belletti et al., 2005).

$$E^* = \frac{E_0 \cdot E_{90} \cdot l_{tot}}{E_{90} \cdot l_0 + E_0 \cdot l_{90}} \quad [5.24]$$

Per mezzo della relazione [5.24] si è proceduto alla determinazione dei vari moduli elastici equivalenti in funzione delle dimensioni di ogni singola asta componente le capriate lignee, al fine di poter associare il rispettivo valore ad ogni elemento modellato in ambiente FEM. Per ognuna delle due 'Capriate Tipo' si sono definiti i parametri meccanici equivalenti (E^* , G^*) sia per il legno nuovo che per le specifiche categorie stabilite dalla norma UNI 11119 (cat. I, II, III), oltre che per le riduzioni percentuali ottenute tramite le analisi parametriche di sensitività, al fine di poter considerare successivamente il degrado ed i difetti rilevati in sito.

Il confronto dei risultati di calibrazione in termini di spostamento (Figg. 5.16-5.17) ha rivelato come l'introduzione del modulo di elasticità equivalente (E^*) per i due modelli agli elementi finiti, unitamente alla simulazione delle staffe di collegamento in ferro, conducano alla definizione di un modello di riferimento per le analisi «definito e giustificato, caso per caso, in relazione al comportamento strutturale atteso» come richiesto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

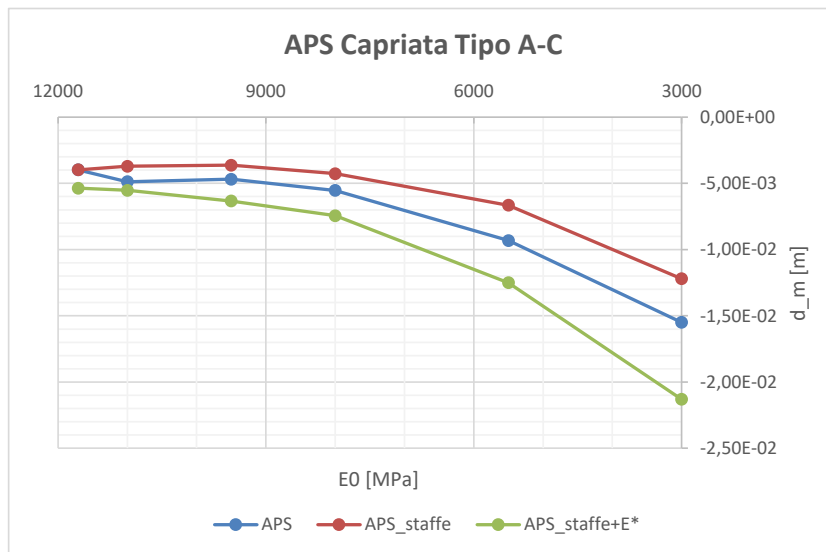


Fig. 5.16: Confronto tra le diverse modellazioni per le 'Capriate Tipo A-C'.

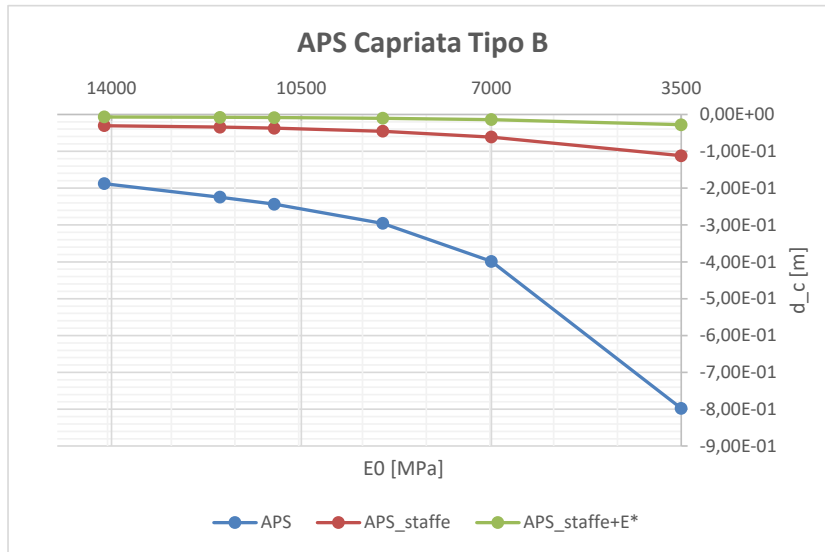


Fig. 5.17: Confronto tra le diverse modellazioni per le 'Capriate Tipo B'.

Tab. 5.9: APS relative alla 'Capriata Tipo A-C' in abete rosso.

#	E ₀ [MPa]	d _m [m]	Difetti [-]	ΔE [%]
1*	11710	-5,37E-03	-	0%
2*	11000	-5,53E-03	cat. I	6%
3*	9500	-6,33E-03	cat. II	19%
4*	8000	-7,44E-03	cat. III	32%
5*	5500	-1,25E-02	> cat. III	53%
6*	3000	-2,13E-02	> cat. III	74%

* APS eseguita con staffa in ferro su nodo catena-puntone.

Tab. 5.10: APS relative alla 'Capriata Tipo B' in larice.

#	E ₀ [MPa]	d _c [m]	Difetti [-]	ΔE [%]
1*	14130	-6,97E-03	-	0%
2*	12000	-7,85E-03	cat. I	15%
3*	11000	-8,45E-03	cat. II	22%
4*	9000	-1,03E-02	cat. III	36%
5*	7000	-1,40E-02	> cat. III	50%
6*	3500	-2,81E-02	> cat. III	75%

* APS eseguita con staffa in ferro su nodo catena-puntone.

Appare evidente come gli abbassamenti registrati in sito per entrambe le 'Capriate Tipo' maggiormente ammalorate siano stati raggiunti per una riduzione di circa il 75% del modulo di elasticità a partire dal valore definito per il legno nuovo. Con una riduzione dello stesso pari a circa il 35% si ricade nella categoria di classificazione peggiore secondo la norma UNI 11119 (cat. III), con relativi spostamenti nell'ordine del centimetro, ritenuti ancora accettabili per l'esercizio della struttura. Per riduzioni dello stesso parametro nell'ordine del 50% è possibile affermare che l'elemento sia soggetto ad un danno legato sia al degrado che alla vetustà (Tab. 5.9-5.10).

5.3.2 Validazione dei modelli agli elementi finiti

Al fine di poter validare i modelli FEM definiti, si è proceduto allo studio della correlazione esistente tra il modulo elastico ed il degrado del materiale, con l'obiettivo di considerare il livello di danno derivante dalle specifiche indagini eseguite in sito. La revisione della letteratura ha permesso di ottenere dei parametri di confronto per le strutture lignee esistenti, in particolare per quelle attinenti al costruito storico, tematica rivelatasi di non banale ed immediato approccio.

Ceraldi et al., (2001) hanno presentato un primo tentativo di correlazione tra le prove resistografiche e la densità degli elementi lignei con un risultato apprezzabile in funzione della doppia relazione densità-parametro resistografico e densità-resistenza meccanica a partire dalla relazione tensione a compressione e densità dell'elemento. Ritenendo tale approccio legato alla disponibilità di dati non in possesso per il presente caso-studio, si è optato per la ricerca di esempi diretti, come quello evidenziato al § 1.3.4 (Mazzolani et al., 2005) dal quale si è desunta la riduzione percentuale da considerare per il modulo di elasticità, individuata come pari al 25%, per definire lo stato di 'legno antico' a partire da quello di 'legno nuovo'. Tale riduzione è stata applicata dagli autori indipendentemente dalla specie legnosa e dal livello di danno o degrado degli elementi lignei.

Un risultato più specifico è stato ricavato da Branco et al., (2011) che hanno presentato una correlazione tra i risultati di indagini di II livello e la norma UNI 11119:2004, fornendo dei parametri di confronto in termini di riduzione percentuale del modulo elastico in funzione della categoria di classificazione (cat. I, II, III) a partire dal valore di 'legno nuovo'. Gli stessi autori hanno evidenziato come la norma italiana abbia indicato valori di riferimento accettabili per le principali proprietà meccaniche delle travi indagate.

Tab. 5.11: Moduli elastici del legno per diversi livelli di classificazione (da Branco et al., 2011).

Trave [-]	E_0 [Mpa]	ΔE_0 [%]	Note	UNI 11119 [cat.]
LN	11380	-	Legno Nuovo (Castagno)	-
B1	10987	-3	-	III
B2	7935	-30	Degrado superficiale	II
B3	7532	-34	Degrado superficiale	I
B4	11493	+1	-	II
B5	5102	-55	Riduzione sezione interna	II
B6	11753	+3	-	II
B7	11072	-3	-	II

L'elaborazione e l'analisi dei dati (Tab. 5.11) ha mostrato come le principali riduzioni percentuali del modulo di elasticità siano associate agli elementi lignei maggiormente degradati (B2, B3, B5)

ma come il valore di categoria secondo la norma UNI 11119 sia per gli stessi piuttosto sommario. La classificazione degli elementi sani (B1, B4, B6, B7) tiene conto degli elementi misurabili definiti dalla stessa norma ma penalizza il valore di resistenza, risultando fin troppo cautelativo.

Un parametro di riferimento più determinante è il valore di umidità relativa U , al cui aumento corrispondono riduzioni percentuali del modulo di elasticità degli elementi lignei. I materiali provati da Scancelli (2017) sono compatibili con quelli della presente tesi per specie legnosa e per epoca storica. Le travi di abete rosso con valori di U prossimi al 18% hanno evidenziato riduzioni del 60% del modulo elastico medio, corretto dall'autore in funzione del valore di umidità registrato, a partire dalle prove eseguite (Tab. 5.12).

Tab. 5.12: Elaborazione ed analisi dei dati tratti dalla fonte revisionata (da Scancelli, 2017).

Trave [#]	Specie [-]	ρ [kg/mc]	B [cm]	H [cm]	L [m]	UNI 11119	E_m [MPa]	U [%]	E_{mc} [MPa]	ΔE_m [%]
2	Abete R.	442	16,00	17,50	3,33	II	7460	13,6	7580	-37
3	Abete R.	406	15,20	22,00	4,50	I	5550	14,1	5670	-53
5	Abete R.	492	22,00	25,00	4,98	I	4070	18,6	4330	-64
12	Abete R.	416	15,80	19,90	4,68	NC	5170	17,4	5450	-58
13	Abete R.	443	12,50	19,40	4,53	I	4350	17,9	4520	-62
17	Abete R.	478	13,50	20,10	4,66	I	7020	15,7	7280	-39
18	Abete R.	323	17,80	22,00	4,51	II	3070	17,7	3180	-74

Ai fini della classificazione del danno da biodegradamento Verbist et al., (2019) hanno individuato dai valori dei moduli di elasticità, in direzione parallela (E_0) ed ortogonale alla fibratura (E_{90}). Sulla base di tale classificazione è stato possibile dedurre come, a partire dalla specie legnosa del castagno e dai relativi valori caratteristici fissati dalla norma UNI EN 338, le soglie del livello di danno indicate vedessero una riduzione percentuale entro un certo *range* di valori. Una riduzione oltre il 55% rispetto al valore di riferimento è quantificabile come di livello grave (Tab. 5.13).

Tab. 5.13: Livelli di danno, moduli elastici e relativi valori percentuali (Verbist et al., 2019).

Livello di danno	E_0 [MPa]	E_{90} [MPa]	E_i [%]	ΔE_i [%]
Sano	9200 ÷ 9500	600 ÷ 630	95 ÷ 100	5
Leggero	6900 ÷ 9200	450 ÷ 600	75 ÷ 95	25
Moderato	4600 ÷ 6900	300 ÷ 450	45 ÷ 75	55
Grave	< 4600	< 300	< 45	> 55

Come indicato in fase di descrizione del modello meccanico del materiale³⁶, le stesse Norme Tecniche per le Costruzioni indicano di considerare il comportamento reologico del legno valutando la deformazione a lungo termine. Questa può essere calcolata utilizzando i valori medi

³⁶ Si veda il § 3.3.1 – Modello meccanico del materiale.

dei moduli elastici ridotti opportunamente mediante il fattore correttivo $1/(1 + k_{def})$ dove il coefficiente k_{def} tiene conto dell'aumento di deformabilità con il tempo causato dall'effetto combinato della viscosità, dell'umidità del materiale e delle sue variazioni. Per il caso-studio in esame il coefficiente k_{def} — da porsi pari a 0,80 in considerazione della classe di servizio — porta alla definizione di un fattore correttivo che riduce del 45% il valore dei parametri meccanici del materiale, a partire da quelli caratteristici del 'legno nuovo'. Tale riduzione è da eseguirsi a prescindere dalla specie legnosa e non considera una correlazione con le categorie di valutazione definite dalla norma UNI 11119:2004.

5.3.3 Osservazioni e definizione della procedura di analisi

Alla luce di quanto evidenziato, appare corretto il metodo di calibrazione eseguito per i modelli agli elementi finiti delle 'Capriate Tipo'. L'aver considerato una riduzione percentuale in funzione della categoria di valutazione si è rivelato un approccio supportato dai casi di letteratura esposti ma sembra, al tempo stesso, non esservi una diretta correlazione tra il parametro meccanico di riferimento (E_0) e le categorie di valutazione secondo la resistenza definite dalla specifica norma tecnica per gli elementi in legno esistenti.

Tab. 5.14: Riduzione percentuale ΔE_0 per la specie legnosa dell'abete rosso.

UNI 11119:2004		UNI EN 338:2016					
Cat. [-]	E [MPa]	E_0 [MPa]	E_{90} [MPa]	G [MPa]	Classe [-]	ρ [kg/mc]	ΔE_0 [%]
LN	-	12000	400	750	C30	450	0
I	12500	11000	370	690	C24	350	8
II	11500	9500	320	590	C20	330	21
III	10500	8000	270	500	C16	310	33

Tab. 5.15: Riduzione percentuale ΔE_0 per la specie legnosa del larice.

UNI 11119:2004		UNI EN 338:2016					
Cat. [-]	E [MPa]	E_0 [MPa]	E_{90} [MPa]	G [MPa]	Classe [-]	ρ [kg/mc]	ΔE_0 [%]
LN	-	14000	470	880	C40	550	0
I	15500	12000	400	750	C30	380	14
II	14500	11000	370	690	C24	350	21
III	13500	9000	300	560	C18	320	36

A partire dalla soluzione proposta in bibliografia per correlare le norme UNI 11119 e UNI EN 338 (Aveta e Monaco, 2007) si sono determinate le riduzioni percentuali del modulo di elasticità per ogni categoria (I, II, III), osservando come il 21% fosse per entrambe le specie legnose del caso-studio, il valore limite per non ricadere nella categoria più penalizzante (Tab. 5.14-5.15). Le stesse analisi parametriche di sensitività hanno mostrato come le deformazioni registrate in sito si siano

raggiunte per riduzioni percentuali del parametro meccanico di riferimento oltre il 50% e fino ad un massimo del 75% confermando come sia necessaria un'analisi puntuale in funzione dei difetti e delle anomalie degli elementi, da eseguirsi specificatamente per ogni singola capriata indagata.

In linea generale, a partire dalla scala di valutazione del danno definita a seguito delle prove con trapano resistografico³⁷, basata sul rapporto tra il profilo totale di penetrazione (P_t) ed il profilo resistente stimato (P_r), si è associato un *range* percentuale entro cui il modulo di elasticità possa ritenersi definibile proporzionalmente, determinando il corrispettivo intervallo di riduzione percentuale (ΔE). Al valore stimato si dovrà applicare la correzione percentuale in funzione del grado di umidità relativa rilevato, secondo la considerazione proposta dal prof. Giordano, al fine di considerare anche l'incidenza legata alle condizioni igrometriche³⁸.

Si riassume a seguire in forma tabellare (Tab. 5.16) la metodologia desunta per la definizione dei parametri meccanici del modello FEM in funzione della valutazione del danno e dell'umidità degli elementi indagati, ribadendo ancora una volta come tale procedura si sia adottata per mezzo di specifiche e puntuali considerazioni, sulla base delle indagini e dei rilievi eseguiti in sito.

Tab. 5.16: Metodologia adottata per la definizione dei parametri meccanici del modello FEM.

Valutazione Danno [-]	P_r/P_t [-]	E_0 [%]	ΔE_0 [%]	$\Delta E'_0$ [%]
assente o lieve	0,9÷1,0	95÷100	0÷5	2 * ΔU
limitato	0,7÷0,9	75÷95	5÷25	2 * ΔU
moderato	0,5÷0,7	45÷75	25÷55	2 * ΔU
grave	< 0,5	< 45	> 55	2 * ΔU

La definizione dei parametri meccanici degli elementi integri allo stato attuale, sarà effettuata a partire dai valori del modulo di elasticità E_0 della norma UNI EN 338:2016, tenendo conto della sola riduzione dovuta all'umidità relativa. Tale considerazione è legata al fatto che la norma considera una condizione di equilibrio igrometrico ideale, valida per il legno di nuova produzione.

5.4 Analisi statica lineare

L'analisi statica lineare viene condotta sulla base delle ipotesi che la struttura abbia un comportamento lineare e che i carichi siano applicati in modo statico, indipendentemente dalla combinazione considerata. Il solutore del software Straus7® parte dal calcolo della matrice di

³⁷ Si veda il § 4.5.1.3 – Analisi prove resistografiche.

³⁸ Si veda il § 4.5.1.2 – Analisi dei valori di umidità relativa del legno.

rigidezza e dei vettori delle forze degli elementi e delle forze applicate ai nodi, per poi inserirle in un sistema lineare di equazioni di equilibrio della forma:

$$\bar{f} = [K] \cdot \bar{u} \quad [5.26]$$

dove le incognite sono fornite dagli spostamenti dei nodi, espressi dal vettore \bar{u} , determinate in funzione dalla matrice di rigidezza $[K]$ e del vettore \bar{f} dei carichi globali applicati ai nodi. Oltre a risolvere le equazioni di equilibrio per gli spostamenti nodali incogniti, il software calcola le deformazioni degli elementi e le relative sollecitazioni, delle quali restituisce anche la forma grafica secondo le convenzioni della Scienza delle Costruzioni.

5.4.1 Analisi delle capriate in condizioni integre

Ai fini delle verifiche agli Stati Limite e della valutazione delle capriate indagate, si è preliminarmente provveduto ad eseguire l'analisi statica lineare di entrambe le tipologie di capriata in condizioni ritenute sane, ovvero prive di anomalie e difetti. Le deformazioni e le tensioni in tali condizioni si sono rivelate dei preziosi parametri di confronto per l'analisi dei risultati delle capriate ammalorate.

5.4.1.1 Definizione della geometria strutturale

La definizione della geometria è avvenuta a partire dai modelli realizzati per le analisi parametriche di sensitività, i cui elementi finiti coincidenti con l'asse di ogni elemento ligneo, hanno definito un modello che ha visto:

- i puntoni e le catene modellati con elementi tipo *beam*;
- la controcatena, i monaci e le saette modellati con elementi tipo *truss*.

Alla definizione degli elementi è seguita, per ogni asta, l'introduzione delle dimensioni delle sezioni con riferimento alle misure del rilievo geometrico, trascurando eventuali smussi e rastremazioni, riferendosi alle misure ricavate dalla documentazione fornita per i dati non direttamente rilevabili.

5.4.1.1 Definizione delle condizioni di vincolo e di carico

A partire dai modelli realizzati per le analisi parametriche di sensitività si è provveduto alla definizione dello schema statico di entrambe le 'Capriate Tipo' ricorrendo alla definizione di opportune condizioni di vincolo interne tra le aste, introducendo degli specifici attributi agli elementi tipo *beam*. Operando attraverso il comando *end-releases* sono stati definiti degli svincoli

parziali alle estremità degli elementi finiti, al fine di considerare la condizione di vincolo di cerniera interna nei nodi tra le varie aste. Gli appoggi delle catene alla muratura hanno invece visto la definizione di opportune condizioni di vincolo esterno secondo la tipologia classica di carrello semplice, unitamente a quella di cerniera in appoggio. L'analisi delle combinazioni di carico ha indicato come determinante ai fini delle verifiche la combinazione C.II di breve durata sia per la 'Capriata Tipo A-C' che per la 'Capriata Tipo B'. La definizione delle condizioni di carico è avvenuta attraverso l'attribuzione di carichi distribuiti sugli elementi finiti tipo *beam* secondo la scomposizione descritta in fase di analisi dei carichi (Fig. 5.18). Il peso proprio strutturale di ogni elemento è stato considerato come un carico gravitazionale in funzione della densità della specie legnosa e del volume degli elementi lignei, dei quali è stata definita la sezione.

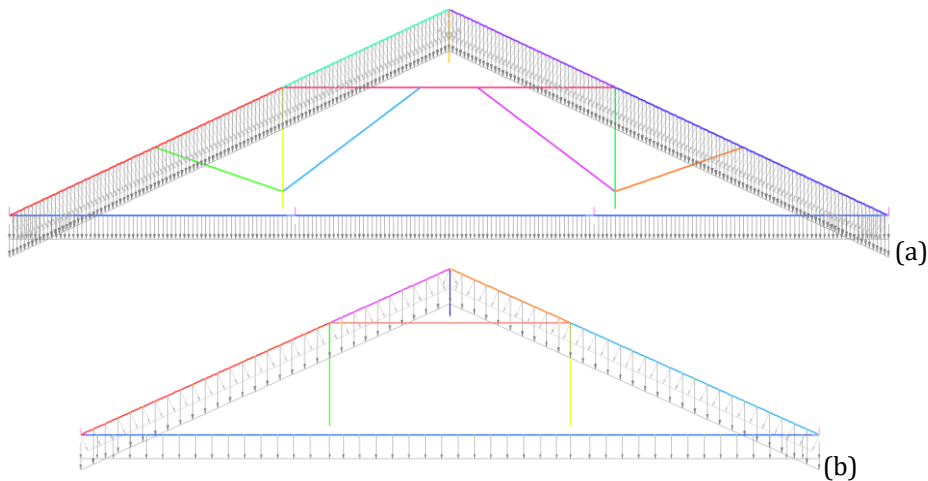


Fig. 5.18: Schema di carico della 'Capriata Tipo A-C' (a) e della 'Capriata Tipo B' (b).

5.4.1.2 Definizione dei parametri meccanici

La definizione è stata condotta a partire dai parametri meccanici della norma UNI EN 338:2016, associando le classi di resistenza C30 e C40 — definite da Aveta e Monaco (2007) — rispettivamente alla specie legnosa dell'abete rosso e del larice per il legno integro (Tab. 5.14-5.15). I valori di riferimento del modulo elastico parallelo alle fibre E_0 sono stati corretti rispetto all'umidità relativa misurata in sito attraverso la relazione [4.3], che ha fornito il parametro E'_0 dal quale si sono definiti, tramite le [3.12] e [3.13], i correlati E'_{90} e G' (Tab. 5.17).

Tab. 5.17: Parametri meccanici adottati per le analisi delle capriate in condizioni integre.

Capriata Tipo	Specie legnosa	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [%]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]
A-C	Abete R.	450	12 000	6,5	11 220	374	701,25
B	Larice	550	14 000	4	13 440	448	840,00

Successivamente è stata considerata l'ortotropia del materiale tramite la relazione [5.24] che conduce alla definizione del modulo di elasticità equivalente E^* per ogni asta di entrambe le capriate (Tab. 5.18-5.19), i cui valori sono stati introdotti nel software per ogni elemento finito tramite l'assegnazione delle rispettive proprietà agli elementi tipo *beam* e *truss* del modello.

Tab. 5.18: Parametri meccanici equivalenti - 'Capriata Tipo A-C' in condizioni integre.

Asta [#]	B [cm]	H [cm]	L [m]	I_0 [m]	I_{90} [m]	I_{tot} [m]	E^* [MPa]
1	22,0	27,0	19,53	21,00	0,27	19,80	7997,39
2	22,0	24,0	6,70	6,70	0,24	6,94	5571,97
3	16,0	21,0	2,86	2,86	0,21	3,07	3740,31
4	22,0	27,0	2,85	2,85	0,27	3,12	3179,84
5	14,0	20,0	3,96	3,96	0,20	4,16	4661,20
6	14,0	20,0	3,96	3,96	0,20	4,16	4661,20
7	22,0	27,0	2,85	2,85	0,27	3,12	3179,84
8	16,0	21,0	2,86	2,86	0,21	3,07	3740,31
9	22,0	24,0	6,70	6,70	0,24	6,94	5571,97
10	17,0	25,0	7,77	7,77	0,25	8,02	5861,38
11	18,0	23,0	3,60	3,60	0,23	3,83	4070,74
12	18,0	26,0	1,57	1,57	0,26	1,83	2179,59
13	18,0	23,0	3,60	3,60	0,23	3,83	4070,74

Tab. 5.19: Parametri meccanici equivalenti - 'Capriata Tipo B' in condizioni integre.

Asta [#]	B [cm]	H [cm]	L [m]	I_0 [m]	I_{90} [m]	I_{tot} [m]	E^* [MPa]
1	26,0	32,0	14,15	14,15	0,32	14,47	8103,18
2	23,0	34,0	4,80	4,80	0,34	5,14	4557,44
3	22,0	30,0	2,30	2,30	0,30	2,60	3060,16
4	22,0	30,0	2,30	2,30	0,30	2,60	3060,16
5	23,0	34,0	4,80	4,80	0,34	5,14	4557,44
6	22,0	27,0	2,35	2,35	0,27	2,62	3334,53
7	23,0	32,0	4,42	4,42	0,32	4,74	4496,55
8	22,0	27,0	2,35	2,35	0,27	2,62	3334,53
9	22,0	25,0	1,20	1,20	0,25	1,45	2216,65

5.4.1.3 Parametri di sollecitazione

La soluzione dei due modelli ha fornito i rispettivi diagrammi dei parametri di sollecitazione (Figg. 5.19-5.20) dai quali sono stati ricavati e tabellati i valori massimi ai fini delle verifiche di resistenza agli Stati Limite per ognuna delle due 'Capriate Tipo' (Tab. 5.20-5.21). I valori dei parametri sono dettati dallo schema statico: la 'Capriata Tipo A-C' vede il massimo momento flettente nei puntoni laterali (aste 2 e 9), mentre la 'Capriata Tipo B' in corrispondenza della mezzeria della catena (asta 1) semplicemente appoggiata alle murature perimetrali, a differenza dello schema su quattro appoggi degli elementi delle Zone A e C. Sulla Zona B grava anche il carico dovuto al sistema di sospensione dell'affresco del salone centrale.

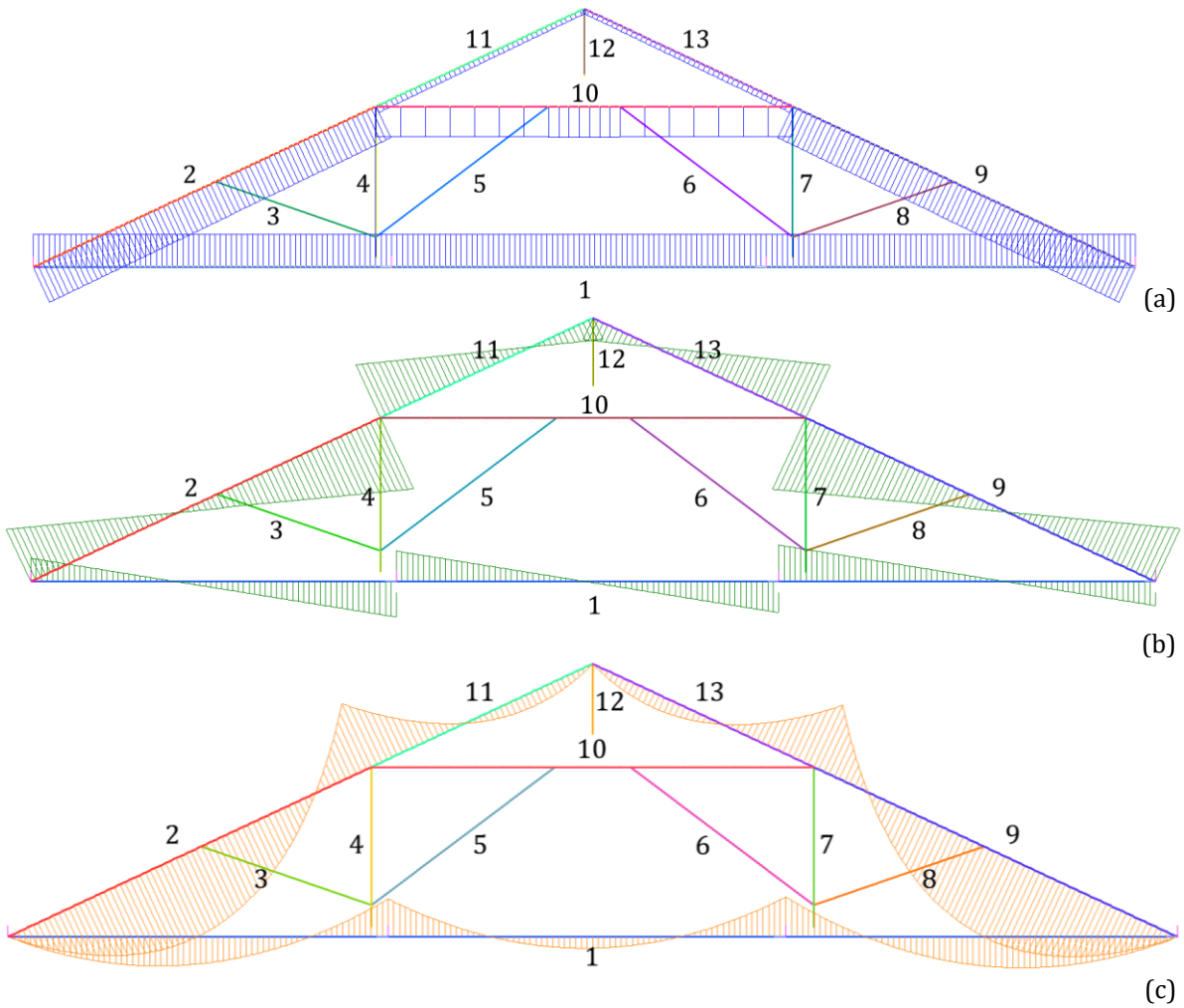


Fig. 5.19: Diagrammi dei parametri di sollecitazione della 'Capriata Tipo A-C': sforzo normale N (a), sforzo tagliante V (b), momento flettente M (c).

Tab. 5.20: Valori dei parametri N, V, M delle aste della 'Capriata Tipo A-C'.

Asta [#]	N_i [kN]	$V_{i,N1}$ [kN]	$V_{i,N2}$ [kN]	$V_{i,N3}$ [kN]	$V_{i,N4}$ [kN]	$V_{i,N5}$ [kN]	$V_{i,N6}$ [kN]	$M_{i,max}$ [kN*m]
1	+70,67	+4,37	-	-	-	-6,63	-	+6,18
2	-83,02	+10,76	-2,71	-14,47	-	-	-	+16,04
3	-0,57	-	-	-	-	-	-	-
4	+1,76	-	-	-	-	-	-	-
5	-0,67	-	-	-	-	-	-	-
6	-0,67	-	-	-	-	-	-	-
7	+1,76	-	-	-	-	-	-	-
8	-0,57	-	-	-	-	-	-	-
9	-83,10	-	-	-	-	-	-	+16,38
10	-65,20	-	-	-	-	-	-	-
11	-14,58	-	-	+10,87	-4,40	-	-	+2,72
12	+0,17	-	-	-	-	-	-	-
13	-14,54	-	-	-	-4,47	-	-	+2,82

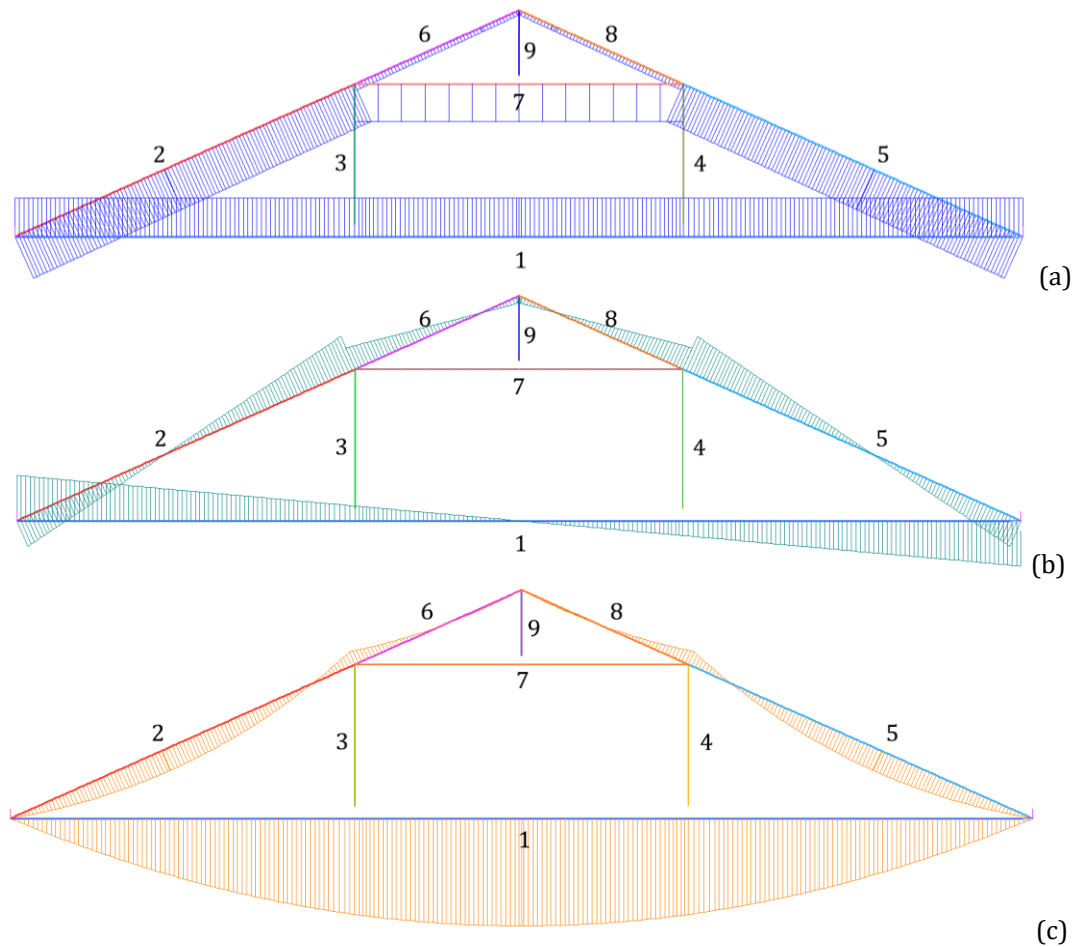


Fig. 5.20: Diagrammi dei parametri di sollecitazione della 'Capriata Tipo B': sforzo normale N (a), sforzo tagliante V (b), momento flettente M (c).

Tab. 5.21: Valori dei parametri N, V, M delle aste della 'Capriata Tipo B'.

Asta [#]	N_i [kN]	$V_{i,N1}$ [kN]	$V_{i,N2}$ [kN]	$V_{i,N3}$ [kN]	$V_{i,N4}$ [kN]	$M_{i,max}$ [kN*m]
1	+101,94	+30,06	-	-	9,79	+108,26
2	-119,92	-18,57	+23,78	-	-	+21,64
3	+0,47	-	-	-	-	-
4	+0,46	-	-	-	-	-
5	-119,93	-	-	-	-	+21,53
6	-16,88	-	+15,47	-4,71	-	-13,85
7	-98,59	-	-	-	-	-
8	-15,12	-	-	-4,66	-	-13,97
9	+0,12	-	-	-	-	-

I puntoni laterali di entrambe le 'Capriate Tipo' sono soggetti al massimo sforzo normale, a conferma del comportamento ad 'arco a tre cerniere', ed al massimo sforzo tagliante in corrispondenza dei nodi tra puntoni e controcatena.

5.4.1.4 Analisi dei risultati in termini di tensioni

L'analisi dei risultati attraverso la visualizzazione a Contour plot (Fig. 5.21) ha consentito di indagare le tensioni interne di ogni singola asta osservando come, per entrambe le capriate, sia riscontrabile un comportamento ad 'arco a tre cerniere' realizzato dalla controcatena e dai puntone laterali. Lo sforzo normale di compressione derivante da questi ultimi si dimostra essere interamente supportato dalla catena inferiore, soggetta al massimo sforzo di trazione, evitando così che le spinte derivanti dalla copertura gravino sulle murature d'ambito. I monaci risultano essere soggetti a sforzi di trazione, in particolare per la 'Capriata Tipo A-C' derivanti dai saettoni. In linea generale appare evidente come entrambe le strutture in condizioni sane mostrino un comportamento di concezione reticolare con sforzi prevalentemente assiali per tutte le aste, ad eccezione dei puntone che presentano sforzi di pressoflessione. In sede di verifica sarà tenuto inoltre conto degli sforzi di flessione a cui sono soggette entrambe le catene, a seguito del carico distribuito derivante dalle stratigrafie dei pacchetti di calpestio e dal sistema di sospensione.

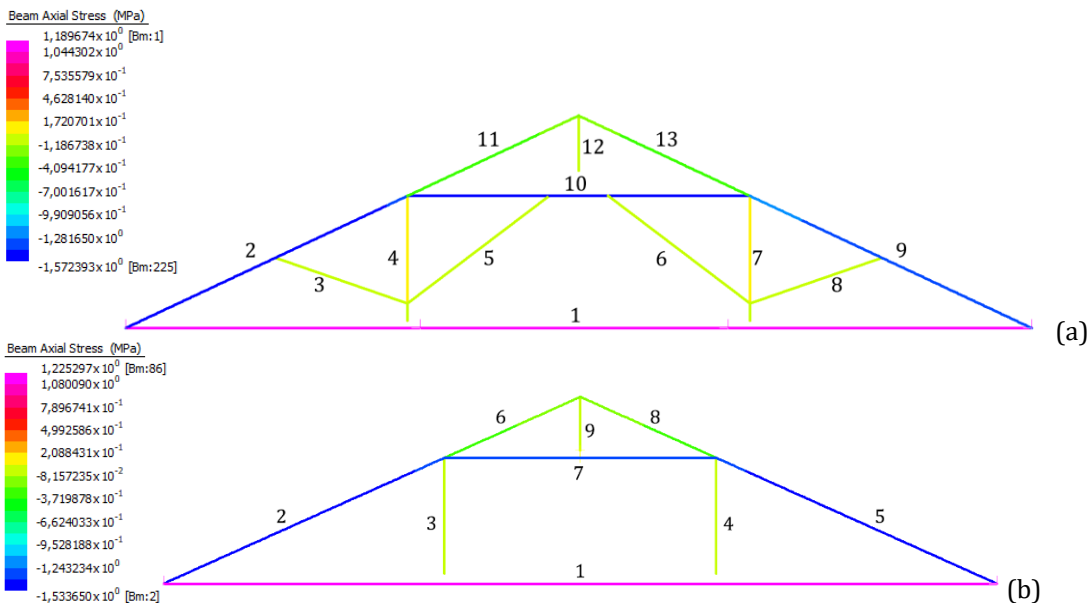


Fig. 5.21: Contour plot delle tensioni interne della 'Capriata Tipo A-C' (a) e della 'Capriata Tipo B' (b).

5.4.1.5 Analisi dei risultati in termini di spostamenti

I risultati sono stati esaminati indagando gli spostamenti in direzione Y al fine di poter confrontare i dati rilevati in sito in fase di rilievo geometrico. Come per i modelli di calibrazione si è provveduto alla modellazione delle staffe in ferro tramite elementi tipo *link* sia per il nodo puntone-catena che per le regge tra monaci e catena e tra monaco superiore e controcatena.

La rappresentazione a *contour* (Fig. 5.22) mostra come gli abbassamenti maggiori si registrino in prossimità della mezzeria dei puntoni laterali per entrambe le capriate, con valori nell'ordine di grandezza del centimetro. La deformata degli spostamenti evidenzia come la mezzeria delle catene veda differenti ordini di grandezza della freccia in funzione della concezione strutturale.

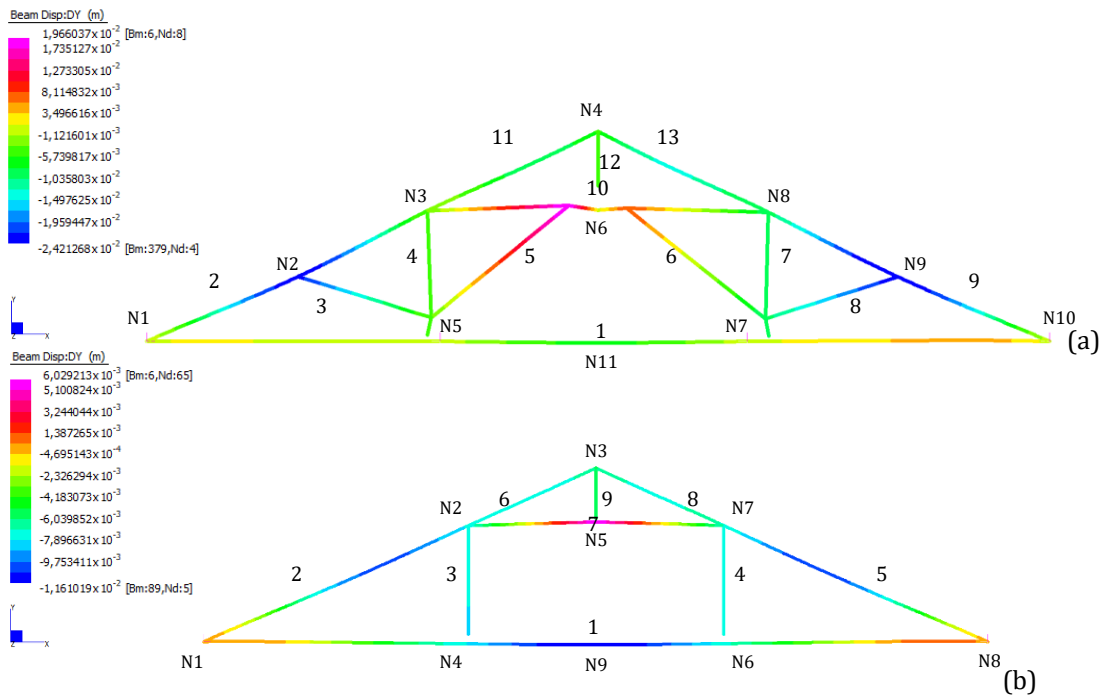


Fig. 5.22: Contour plot degli spostamenti DY della 'Capriata Tipo A-C' (a) e della 'Capriata Tipo B' (b).

Si riportano a seguire (Tab. 5.22) i principali valori degli abbassamenti in corrispondenza dei nodi delle 'Capriate Tipo' in condizioni sane che saranno confrontati con i medesimi abbassamenti registrati nelle modellazioni delle capriate in condizioni degradate.

Tab. 5.22: Abbassamenti nodi 'Capriate Tipo'.

Nodo [#]	d_{Ni_A-C} [m]	d_{Ni_B} [m]
1	-	-
2	$-2,29 \cdot 10^{-2}$	$-7,75 \cdot 10^{-3}$
3	$-3,51 \cdot 10^{-3}$	$-6,04 \cdot 10^{-3}$
4	$-5,35 \cdot 10^{-3}$	$-7,95 \cdot 10^{-3}$
5	$-3,53 \cdot 10^{-3}$	$+6,03 \cdot 10^{-3}$
6	$+1,96 \cdot 10^{-2}$	$-7,34 \cdot 10^{-3}$
7	$-9,63 \cdot 10^{-3}$	$-7,14 \cdot 10^{-3}$
8	$-9,62 \cdot 10^{-3}$	-
9	$-2,41 \cdot 10^{-2}$	$-1,16 \cdot 10^{-2}$
10	-	-
11	$-6,42 \cdot 10^{-3}$	-

5.4.2 Analisi delle capriate in condizioni ammalorate

Difetti quali smussi, nodi, cipollature o inclinazioni della fibratura sono tutte caratteristiche intrinseche del materiale ligneo in funzione delle quali le norme definiscono, per ogni elemento, l'assegnazione di una specifica categoria di classificazione in opera. Le analisi delle capriate condotte in condizioni ammalorate hanno avuto lo scopo di considerare, oltre ai sopracitati difetti, le valutazioni del danno legato al degrado, per il quale subentrano anomalie legate al comportamento meccanico e al biodegradamento. Si è scelto di approfondire e riportare le analisi svolte per le capriate i cui elementi abbiano presentato almeno una valutazione del danno pari alla soglia di livello moderato ($P_r/P_t \leq 0,7$).

5.4.2.1 Descrizione della procedura adottata

La procedura esposta al § 5.3.3 ha reso possibile la definizione dei parametri meccanici di riferimento per ciascuna delle due specie legnose, sulla base della correlazione esistente tra le norme UNI 11119:2004 ed UNI EN 338:2016 (Tab. 5.6). A partire dai moduli elastici associati alle varie categorie di classificazione degli elementi (Tab. 5.14-5.15) — consideranti i soli difetti del materiale — si è provveduto a definire il *range* di valori da assumersi per ciascuna specie legnosa, in relazione alla valutazione del danno derivante dalle indagini eseguite in sito con trapano resistografico (Tab. 5.23). I valori da attribuire ad ogni asta sono stati determinati tramite interpolazione lineare e, successivamente, corretti in funzione del grado di umidità relativa registrato per ogni singolo elemento indagato³⁹. In seguito è stata introdotta l'ortotropia del materiale — tramite la relazione [5.24] — che ha portato alla definizione del modulo di elasticità equivalente E^* per ogni asta di ciascuna capriata, i cui valori sono stati inseriti nel software FEM associandoli alla rispettiva porzione di elemento finito degradato, stimata a partire dallo stato di conservazione ottenuto a seguito dell'ispezione visiva in sito.

Tab. 5.23: Valori di E_0 in funzione del danno per le specie legnose delle capriate del caso-studio.

Valutazione Danno [-]	P_r/P_t [-]	E_0 - Abete Rosso [MPa]	E_0 - Larice [MPa]
assente o lieve	0,9÷1,0	10450 ÷ 11000	11400 ÷ 12000
limitato	0,7÷0,9	8250 ÷ 10450	9000 ÷ 11400
moderato	0,5÷0,7	4950 ÷ 8250	5400 ÷ 9000
grave	< 0,5	< 4950	< 5400

³⁹ Per gli elementi privi di una specifica rilevazione del grado di umidità relativa si è assunto il valore medio della zona del sottotetto in cui è sita la capriata di appartenenza. Si veda il § 4.5.1.2, in particolare la Tab. 4.6.

5.4.2.2 Definizione dei parametri meccanici

Essendo la procedura adottata specifica per ogni elemento ligneo componente le capriate indagate, si ritiene di analizzare in maniera puntuale quella eseguita per la capriata A1, limitandosi per le restanti capriate esaminate a riportarne i risultati finali tabellati, per i quali sono state svolte osservazioni ad hoc.

Determinazione dei parametri meccanici della capriata A1

Le condizioni di degrado e gli interventi di rinforzo eseguiti in passato hanno fin da subito evidenziato come la capriata A1 fosse tra le più ammalorate del sottotetto del corpo centrale di Villa Pisani. L'ispezione visiva per tale struttura lignea, posta a ridosso della parete coincidente con il timpano della facciata nord, ha rilevato anomalie e degrado che la sola classificazione secondo la norma UNI 11119:2004 non consente di tenere in considerazione. L'analisi dei primi risultati derivanti da tale procedura (Tab. 5.24) ha evidenziato come elementi con differente criticità di degrado (i.e. aste 2, 5, 8) siano da considerarsi appartenenti alla stessa categoria di classificazione (cat. I), indipendentemente dal livello e dal tipo di anomalia evidenziata.

Tab. 5.24: Classificazione delle aste della capriata A1, in funzione dei difetti rilevati, secondo la UNI 11119:2004.

ASTA	SEZIONE			LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CLASSIFICAZIONE UNI 11119:2004					CATEGORIA
	n°	B	H		L	LESIONI	NODI	GR.NODI		INC.FIBR.	SMUSSI	LESIONI	NODI	GR. NODI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	21	29	NR	NR	NR	NR	NR	PARZIALMENTE ISPEZIONABILE	1	-	-	-	-	-	1
2	19	27	NR	RITIRO	0,20	-	<10%	TESTA TRAVE MARCIA, LATO NORD NON ISP.	1	1	1	1	1	1	1
3	14	24	2,850	RITIRO	0,10	-	≈10%	-	1	1	1	1	1	2	2
4	23	28	2,875	RITIRO	0,11	-	<10%	-	1	1	1	1	1	1	1
5	16	20	NR	RITIRO	0,15	-	<10%	MARCIA VERSO N5, N6 NON ISP.	1	1	1	1	1	1	1
6	16	20	3,970	RITIRO	0,15	-	<10%	-	1	1	1	1	1	1	1
7	17,5	25	2,870	RITIRO	0,11	-	15%	-	1	1	1	1	1	2	2
8	15	19	2,835	-	0,17	-	<10%	FORTE DEGRADO	1	1	1	1	1	1	1
9	21	25	NR	RITIRO	0,17	-	≈10%	SOSTITUZIONE TESTA TRAVE N10	1	1	1	1	1	1	1
10	16	25	NR	NR	NR	NR	NR	TESTA TRAVE AMMALORATA	-	-	-	-	-	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	-	-	-	-	-	-	1

Le indagini di II livello eseguite con trapano resistografico hanno permesso innanzitutto di accertare la presenza del degrado rilevato e di quantificarlo in funzione della scala di valutazione basata sul rapporto tra il profilo totale di penetrazione (P_t) ed il profilo resistente stimato (P_r), determinato in fase di elaborazione dati e riportato nelle tabelle in Appendice (Tab A.1).

Sulla base del rapporto (P_r/P_t) e del relativo *range* di danno (Tab. 5.23), si è proceduto alla determinazione del modulo di elasticità di riferimento per ognuna delle prove eseguite. Per la prova resistografica RH.007, ad esempio, il danno rilevato è risultato di tipo grave ($P_r/P_t = 0,33$); l'interpolazione lineare ha fornito un valore del parametro meccanico E_0 di 4170 MPa (Fig. 5.23).

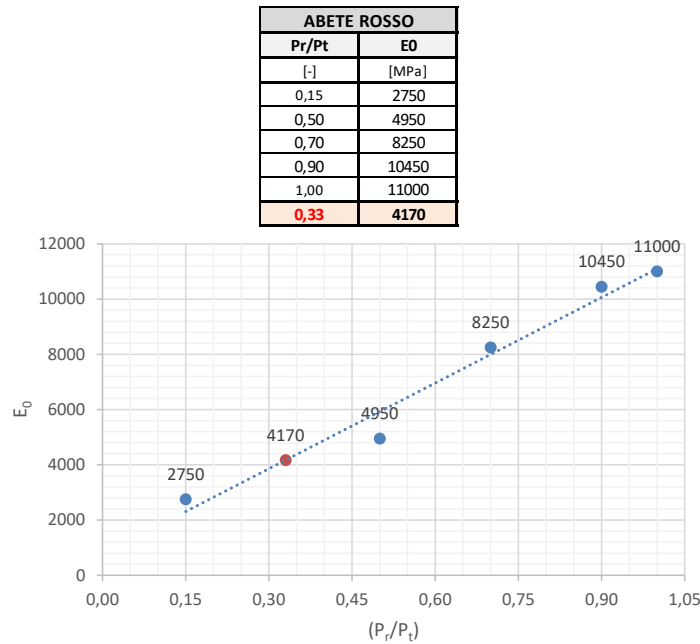


Fig. 5.23: Interpolazione lineare per la definizione di E_0 per la prova RH.007.

Tale dato è stato ridotto di 7 punti percentuali in funzione del fattore correttivo legato al valore di umidità relativa registrato in sito⁴⁰, con la conseguente definizione del modulo elastico E'_0 tramite la [4.3], pari a:

$$E'_0 = E_0 - \Delta E'_0 = 4170 - (0,07 \cdot 4170) = 3878 \text{ MPa}$$

che, tramite le [3.12] e [3.13], ha portato a determinare i valori correlati:

$$E'_{90} = \frac{E'_0}{30} = \frac{3878}{30} = 129 \text{ MPa}$$

$$G' = \frac{E'_0}{16} = \frac{3878}{16} = 242 \text{ MPa}$$

L'analogo procedimento è stato compiuto a partire dai dati delle restanti prove resistografiche eseguite sugli elementi della capriata A1, mentre per gli elementi non indagati si è provveduto a considerare la correzione legata all'umidità relativa definita per la 'Zona A'. Per la catena (asta 1), classificata di categoria I, si è condotta, tramite la relazione [4.3], la correzione seguente:

$$E'_0 = E_0 - \Delta E'_0 = 11000 - (0,07 \cdot 11000) = 10230 \text{ MPa}$$

⁴⁰ L'eccessivo degrado non ha consentito di eseguire la rilevazione direttamente sull'elemento ligneo, in quanto gli elettrodi dell'igrometro, una volta infilzati, non restavano in posizione per registrare la lettura del grado di umidità relativa. La valutazione è stata eseguita basandosi sulla riduzione percentuale media del locale della 'Zona A'.

che, tramite le [3.12] e [3.13], ha portato a determinare i valori correlati:

$$E'_{90} = \frac{E'_0}{30} = \frac{10230}{30} = 341 \text{ MPa}$$

$$G' = \frac{E'_0}{16} = \frac{10230}{16} = 639 \text{ MPa}$$

definendo così i parametri meccanici specifici per ogni asta della capriata A1, in funzione, oltre che del grado di umidità, anche dei difetti e del danno rilevati. Successivamente è stata considerata l'ortotropia del materiale tramite la relazione [5.24] che ha portato alla definizione del modulo di elasticità equivalente E^* per ogni asta (Tab. 5.25), i cui valori sono stati introdotti nel software agli elementi finiti ed associati allo specifico elemento *beam/truss* (Fig. 5.28), in funzione della relativa estensione e posizione (Fig. 5.29).

Tab. 5.25: Determinazione dei parametri meccanici equivalenti per la capriata A1.

Asta [#]	B [cm]	H [cm]	L [m]	l_0 [m]	l_{90} [m]	l_{tot} [m]	E^* [MPa]
1	21,0	29,0	19,53	19,53	0,29	19,82	7182
1	21,0	29,0	19,53	19,53	0,29	19,82	6984
1	21,0	29,0	19,53	19,53	0,29	19,82	6836
1	21,0	29,0	19,53	19,53	0,29	19,82	5222
2	19,0	27,0	6,70	6,70	0,27	6,97	4818
2	19,0	27,0	6,70	6,70	0,27	6,97	4318
3	14,0	24,0	2,85	2,85	0,24	3,09	2716
4	23,0	28,0	2,87	2,87	0,28	3,15	2859
5	16,0	20,0	3,96	3,96	0,20	4,16	4273
6	16,0	20,0	3,97	3,97	0,20	4,17	4276
7	17,5	25,0	2,87	2,87	0,25	3,12	2658
8	15,0	19,0	2,84	2,84	0,19	3,03	3630
8	15,0	19,0	2,84	2,84	0,19	3,03	3309
9	21,0	25,0	6,70	6,70	0,25	6,95	5115
9	21,0	25,0	6,70	6,70	0,25	6,95	5115
10	16,0	25,0	7,77	7,77	0,25	8,02	5373
10	16,0	25,0	7,77	7,77	0,25	8,02	2037
10	16,0	25,0	7,77	7,77	0,25	8,02	4714
11	18,0	23,0	3,60	3,60	0,23	3,83	3732
12	18,0	26,0	1,57	1,57	0,26	1,83	1998
13	18,0	23,0	3,60	3,60	0,23	3,83	3732

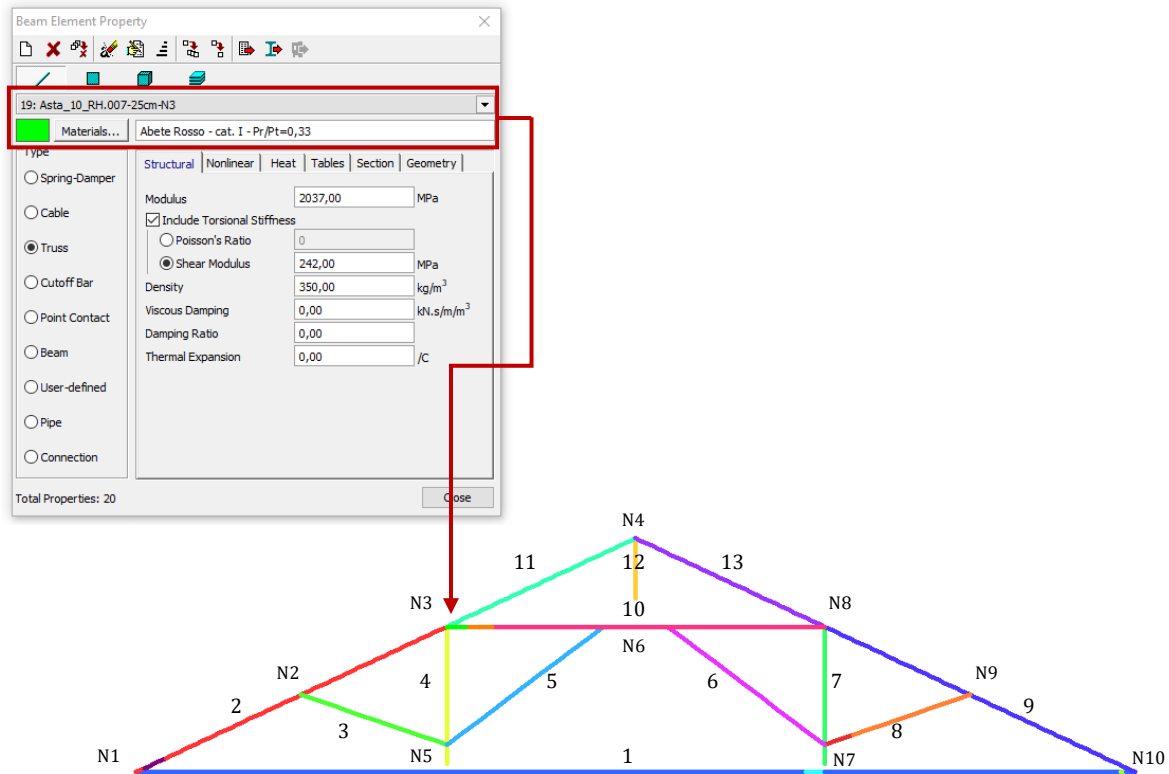


Fig. 5.28: Inserimento dei valori dei parametri meccanici in ambiente FEM: esempio relativo alla controcatena (asta 10) della capriata A1.

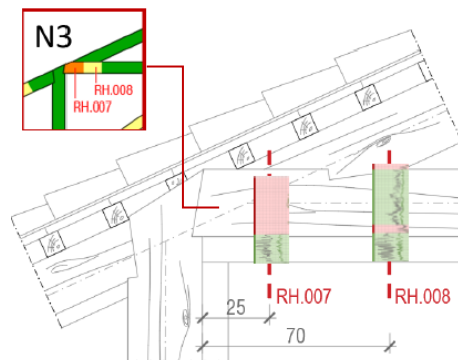


Fig. 5.29: Dettaglio delle prove resistografiche eseguite per il nodo N3 della capriata A1.

Si riportano, a seguire, in forma tabellare i risultati dei parametri meccanici definiti e adottati per le analisi statiche lineari condotte per le capriate maggiormente ammalorate:

Tab. 5.26: Riepilogo delle capriate ammalorate oggetto di analisi statiche lineari.

Zona A	Zona B	Zona C
Capriata A1	Capriata B3	Capriata C2
Capriata A3	Capriata B7	Capriata C6
Capriata A7	Capriata B8	Capriata C9
-	-	Capriata C10

Tab. 5.27: Parametri meccanici adottati per la Capriata A1 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

Capriata A1											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	7182
1	I	0,95	RH.001	N1	350	10583	6	9948	332	622	6984
1	I	0,95	RH.009	N7	350	10583	8	9736	325	609	6836
1	I	0,70	RH.013	N10	350	7997	7	7437	248	465	5222
2	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	4818
2	I	0,88	RH.003	N1	350	9859	7	9169	306	573	4318
3	II	-	-	-	330	9500	7	8835	295	552	2716
4	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	2859
5	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	4273
6	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	4279
7	II	-	-	-	330	9500	7	8835	295	552	2658
8	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	3630
8	I	0,94	RH.040	N7	350	10479	11	9326	311	583	3309
9	I	-	-	-	350	11000	5	10450	348	653	5115
9	I	1,00	RH.041	N10	350	11000	5	10450	348	653	5115
10	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	5373
10	I	0,33	RH.007	N3	350	4170	7	3878	129	242	2037
10	I	0,86	RH.008	N3	350	9652	7	8976	299	561	4714
11	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	3732
12	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	1998
13	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	3732

Tab. 5.28: Parametri meccanici adottati per la Capriata A3 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA A3											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	7110
1	I	0,73	RH.017	N10	350	8307	11	7393	246	462	5139
1	I	1,00	RH.022	N1	350	11000	3	10670	356	667	7416
2	II	-	-	-	330	9500	7	8835	295	552	4411
3	II	-	-	-	330	11000	7	10230	341	639	3436
4	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	2859
5	III	-	-	-	310	8000	7	7440	248	465	3291
6	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	4273
7	II	-	-	-	330	11000	7	10230	341	639	2820
8	III	-	-	-	310	8000	7	7440	248	465	2553
9	III	-	-	-	310	8000	7	7440	248	465	3377
9	III	1,00	RH.018	N10	310	8000	14	6880	229	430	3123
10	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	5373
11	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	3732
12	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	1998
13	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	3732

ANALISI E MODELLAZIONE NUMERICA

Tab. 5.29: Parametri meccanici adottati per la Capriata A7 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA A7											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	7110
1	I	0,54	RH.006	N10	350	6342	6	5961	199	373	4144
1	-	-	-	N1	450	12000	3	11640	388	728	8090
2	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	4773
3	II	-	-	-	330	9500	7	8835	295	552	2729
4	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	2859
5	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	4333
6	III	-	-	-	310	8000	7	7440	248	465	2945
7	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	2786
8	III	-	-	-	310	8000	7	7440	248	465	2634
9	I	-	-	-	330	9500	7	8835	295	552	4047
9	I	0,95	RH.027	N10	330	10583	9	9631	321	602	4411
10	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	5373
11	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	3732
12	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	1998
13	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	3732

Tab. 5.30: Parametri meccanici adottati per la Capriata B3 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA B3											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	5264
1	III	1,00	RH.143	N1	320	9000	3	8730	291	546	5319
1	III	1,00	RH.082	N8	320	9000	1	8910	297	557	5429
2	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	3690
2	II	1,00	RH.144	N1	350	11000	5	10450	348	653	3651
3	I	-	-	-	380	12000	4	11520	384	720	2632
4	I	-	-	-	380	12000	4	11520	384	720	2646
5	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	3011
5	III	1,00	RH.076	N8	320	9000	10	8100	270	506	2823
6	I	-	-	-	380	12000	4	11520	384	720	2787
7	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	3820
7	II	0,97	RH.049	N5	350	10770	1	10662	355	666	3857
8	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	2562
9	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	1303
9	III	1,00	RH.048	N5	320	9000	2	8820	294	551	1330

Tab. 5.31: Parametri meccanici adottati per la Capriata B7 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA B7											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	380	12000	0	12000	400	750	7445
1	I	1,00	RH.171	N1	380	12000	0	12000	400	750	7445
1	I	0,94	RH.110	N8	380	11432	0	11432	381	715	7092
2	III	-	-	-	320	9000	0	9000	300	563	3455
2	III	0,69	RH.176	N1	320	8611	0	8611	287	538	3306
3	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	1935
4	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	2400
4	II	0,95	RH.057	N6	350	11545	5	10968	366	685	2492
4	II	0,80	RH.062	-	350	9852	5	9359	312	585	2127
5	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	4130
5	II	1,00	RH.111	N8	350	11000	2	10780	359	674	4216
6	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	2277
7	I	-	-	-	380	12000	4	11520	384	720	4201
8	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	2645
9	I	-	-	-	380	12000	4	11520	384	720	1654

Tab. 5.32: Parametri meccanici adottati per la Capriata B8 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA B8											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	5393
1	III	0,98	RH.058	DG	320	8883	3	8617	287	539	5378
1	III	0,89	RH.059	DG	320	8432	2	8263	275	516	5158
1	III	0,49	RH.177	N1	320	6355	4	6101	203	381	3808
1	III	1,00	RH.117	N8	320	9000	5	8550	285	534	5337
2	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	3396
2	III	0,97	RH.178	N1	320	8770	6	8244	275	515	3240
3	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	2357
4	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	2405
4	II	1,00	RH.061	N7	350	11000	6	10340	345	646	2355
5	I	-	-	-	380	12000	4	11520	384	720	3917
5	I	1,00	RH.118	N8	380	12000	5	11400	380	713	3876
6	III	-	-	-	320	9000	4	8640	288	540	2071
7	III	-	-	-	320	9000	0	9000	300	563	3193
7	III	0,94	RH.060	N5	320	8733	0	8733	291	546	3099
8	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	2799
9	II	-	-	-	350	11000	4	10560	352	660	1572

ANALISI E MODELLAZIONE NUMERICA

Tab. 5.33: Parametri meccanici adottati per la Capriata C2 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA C2											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	7187
1	I	1,00	RH.192	N5	350	11000	5	10450	348	653	7263
1	I	0,85	RH.183	N10	350	9548	5	9071	302	567	6305
2	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	4963
2	I	1,00	RH.214	-	350	11000	7	10230	341	639	4910
3	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3193
4	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2439
5	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	3445
6	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	3445
7	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2403
8	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2533
9	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	4053
9	II	0,75	RH.224	N9	330	8514	9	7748	258	484	3517
10	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	5431
11	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3235
12	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	2019
13	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	3136

Tab. 5.34: Parametri meccanici adottati per la Capriata C6 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA C6											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	7334
1	I	0,97	RH.201	N7	350	10790	6	10143	338	634	7194
1	I	0,97	RH.226	N10	350	10790	6	10143	338	634	7194
1	I	0,15	RH.186	N1	350	2750	0	2750	92	172	1951
2	I	-	-	-	350	11000	7	10230	341	639	4773
2	I	1,00	RH.216	-	350	11000	7	10230	341	639	4773
3	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3236
4	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2412
5	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3799
6	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3754
7	II	-	-	-	330	11000	6	10340	345	646	2922
8	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2733
9	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	4780
9	I	1,00	RH.220	N9	350	11000	6	10340	345	646	4780
9	I	0,85	RH.221	N9	350	9548	6	8975	299	561	4149
10	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	5431
11	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3772
12	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	2019
13	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3772

ANALISI E MODELLAZIONE NUMERICA

Tab. 5.35: Parametri meccanici adottati per la Capriata C9 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA C9											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	7046
1	I	0,59	RH.185	N1	350	6859	9	6242	208	390	4253
1	I	0,95	RH.230	N10	350	10583	9	9631	321	602	6563
2	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	4780
2	I	0,66	RH.217	-	350	7583	6	7128	238	446	3295
2	I	1,00	RH.242	N2	350	11000	8	10120	337	633	4678
3	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2758
4	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2526
5	III	-	-	-	310	8000	6	7520	251	470	2901
6	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	3402
7	III	-	-	-	310	8000	6	7520	251	470	2099
8	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2663
9	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	4651
9	I	1,00	RH.218	-	350	11000	8	10120	337	633	4635
10	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	5285
11	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3343
12	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	1943
13	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3381

Tab. 5.36: Parametri meccanici adottati per la Capriata C10 determinati in funzione dei difetti e del danno rilevato.

CAPRIATA C10											
Asta [#]	Difetti [cat.]	Danno [Pr/Pt]	Prova [-]	Note [-]	ρ [kg/mc]	E_0 [MPa]	$\Delta E'_0$ [MPa]	E'_0 [MPa]	E'_{90} [MPa]	G' [MPa]	E^* [MPa]
1	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	7187
1	I	0,88	RH.231	N10	350	9859	8	9070	302	567	6304
2	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	4870
2	I	0,69	RH.233	N1	350	7894	17	6552	218	410	3086
2	I	0,90	RH.241	N2	350	10066	4	9663	322	604	4551
3	III	-	-	-	310	8000	6	7520	251	470	2322
4	III	-	-	-	310	8000	6	7520	251	470	2031
5	III	-	-	-	310	8000	6	7520	251	470	2830
6	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	3445
7	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2403
8	II	-	-	-	330	9500	6	8930	298	558	2808
9	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	4610
9	I	1,00	RH.240	N10	350	11000	4	10560	352	660	4708
10	III	-	-	-	310	8000	6	7520	251	470	3950
11	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3381
12	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	1873
13	I	-	-	-	350	11000	6	10340	345	646	3420

5.4.2.3 Analisi dei risultati in termini di tensioni

L'analisi dei risultati attraverso la visualizzazione a *contour* ha consentito di indagare le tensioni interne di ogni capriata oggetto di analisi lineare statica osservando come, attraverso l'integrazione del danno e dei difetti rilevati, sia riscontrabile un comportamento strutturale non più in linea con quello atteso ad 'arco a tre cerniere', riscontrato invece per le analisi relative alle capriate in condizioni sane. Si riportano, a seguire, le specifiche osservazioni derivanti dalle analisi dei risultati delle capriate analizzate.

Capriata A1

Per tale capriata, il danno rilevato sulla controcatena (asta 10) in prossimità del nodo 3, induce uno stato di tensione di trazione per lo stesso elemento che implica il venir meno del comportamento ad 'arco a tre cerniere' per l'intera struttura. La trazione nei monaci risulta notevolmente inferiore a quella registrata per tali elementi in condizioni sane, ciò è dovuto alla variazione di tensione nelle saette (aste 3, 5, 6, 8) che risultano interamente tese, anziché compresse. Il comportamento della catena permane totalmente a trazione con conseguente azione non spingente sulle murature d'ambito (Fig. 5.30).

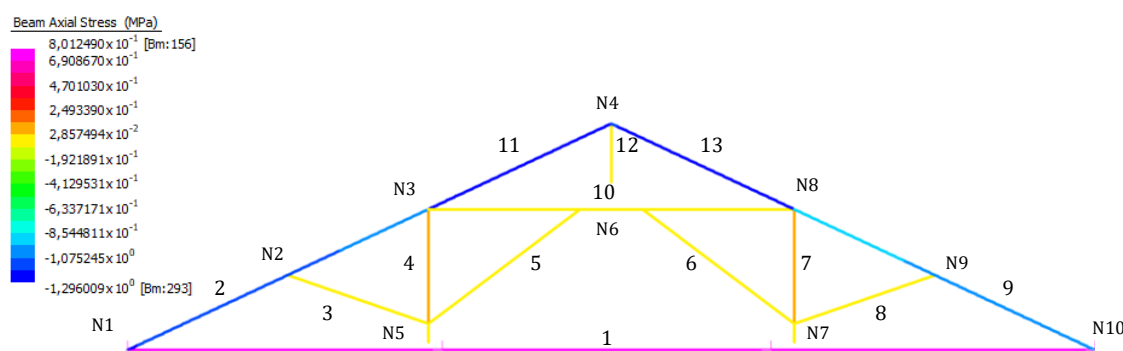


Fig. 5.30: Contour plot delle tensioni interne della Capriata A1.

Capriata A3

La struttura presenta un comportamento ideale secondo la concezione ad 'arco a tre cerniere' nonostante la classificazione in categoria III per ben tre dei suoi elementi (aste 5, 8, 9). In termini di tensioni interne appare notevole però lo sforzo a cui è soggetta la testa della catena in prossimità del nodo 10, per la quale, la prova resistografica eseguita⁴¹, ha registrato un danno prossimo al livello moderato ($P_r/P_t=0,73$), che porta ad una riduzione di sezione interna pari a 6,8 cm, che sarà oggetto di una specifica verifica della connessione (Fig. 5.31).

⁴¹ Si vedano i risultati della prova resistografica RH.017 in Appendice.

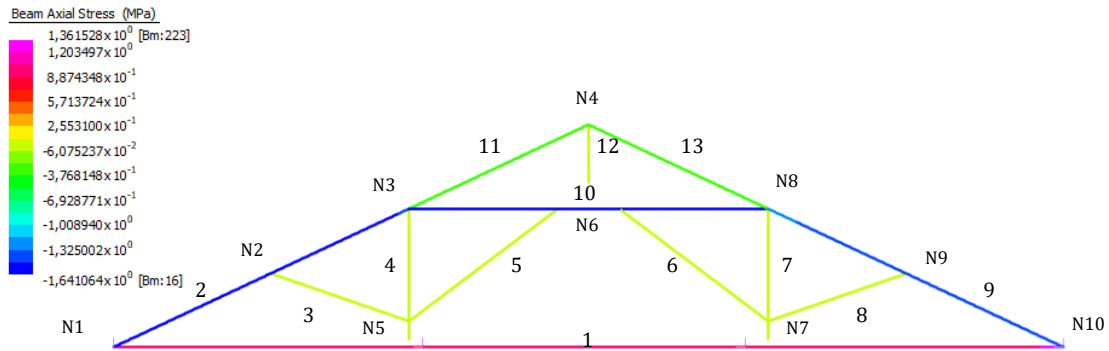


Fig. 5.31: Contour plot delle tensioni interne della Capriata A3.

Capriata A7

Il comportamento ad ‘arco a tre cerniere’ sembra garantito per la capriata nonostante il danno di livello grave registrato nella testa della catena in prossimità del nodo 10, mentre appare incidere dal punto di vista statico vista l’entità della reazione vincolare all’appoggio in corrispondenza del medesimo nodo. Rilevante risulta invece il contributo offerto dall’elemento sostituito in corrispondenza del nodo 1, dove la nuova porzione per la testa della stessa catena vede una reazione vincolare inferiore di quasi 1/5 rispetto all’appoggio d’estremità ad est.

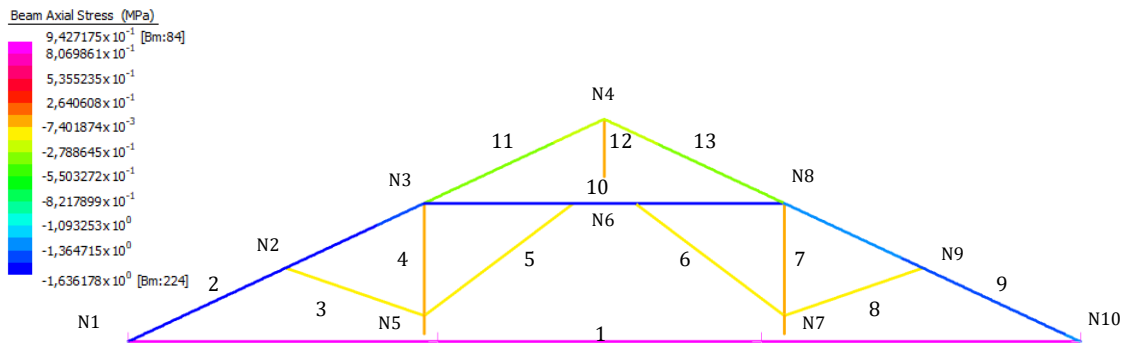


Fig. 5.32: Contour plot delle tensioni interne della Capriata A7.

Capriata B3

La capriata presenta una risposta pressoché ideale; la relativa rappresentazione a Contour plot (Fig. 5.33-a) mostra dei valori di tensioni interne alle aste in linea con il comportamento ad ‘arco a tre cerniere’ tipico delle strutture reticolari lignee a capriata palladiana composta.

Nonostante le indagini in sito abbiano avuto un esito che ha fornito valori del livello di danno estremamente lievi ($P_r/P_t=0,97$), si è voluto condurre l’analisi statica lineare valutando la condizione limite per la quale uno dei due monaci dovesse giungere a contatto con la catena. L’ispezione visiva ha evidenziato come tale situazione potrebbe verificarsi per il nodo 4, per il quale il monaco (asta 3) e la catena (asta 1) presentano, ad oggi, una condizione prossima al contatto, a differenza dei medesimi nodi di tutte le capriate della ‘Zona B’.

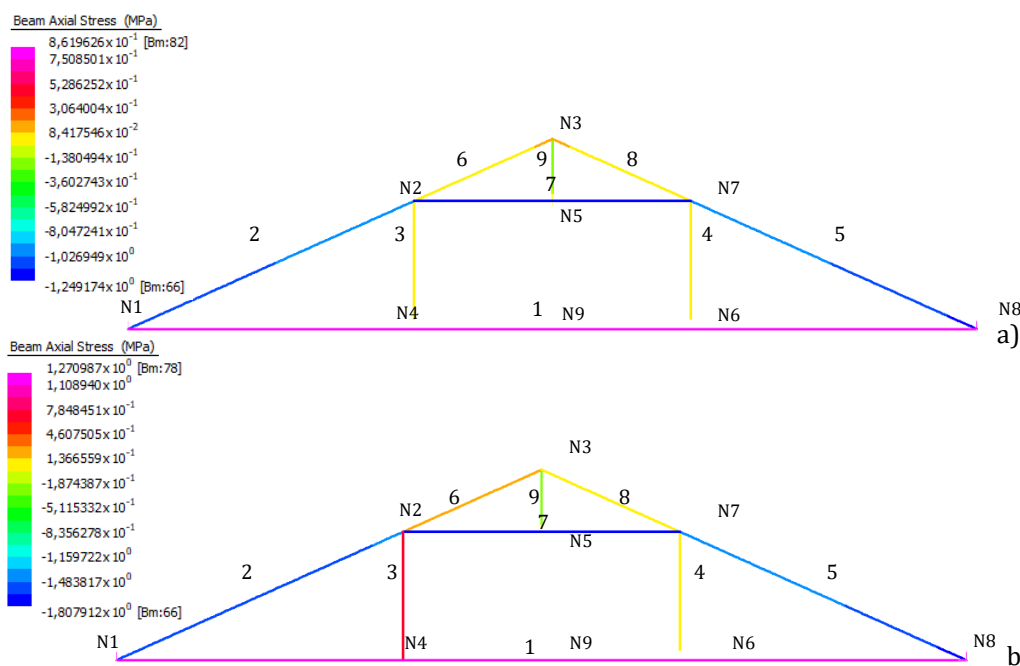


Fig. 5.33: Contour plot delle tensioni interne della Capriata B3: a) allo stato attuale; b) con cedimento N4.

In tale situazione il nodo 4 assumerebbe la condizione di ‘nodo chiuso’ e sulla stessa catena graverebbe gran parte dell’aliquota del peso della porzione di copertura derivante dalla falda ovest. L’analisi limite mostra (Fig. 5.33-b) per il monaco (asta 3) uno stato di tensione di trazione estremamente elevato. Il suo appoggio alla catena genererebbe uno sforzo di compressione ortogonale alla fibratura dell’elemento orizzontale principale in prossimità della giunzione a ‘dardo di Giove’, con conseguente inflessione dell’asta da valutarsi in termini deformativi.

Capriata B7

La struttura palladiana composta mostra un comportamento ad ‘arco a tre cerniere’ ideale nonostante il livello di danno grave registrato per la testa del puntone laterale in prossimità del nodo 1, la cui verifica avverrà in considerazione della sezione resistente effettiva.

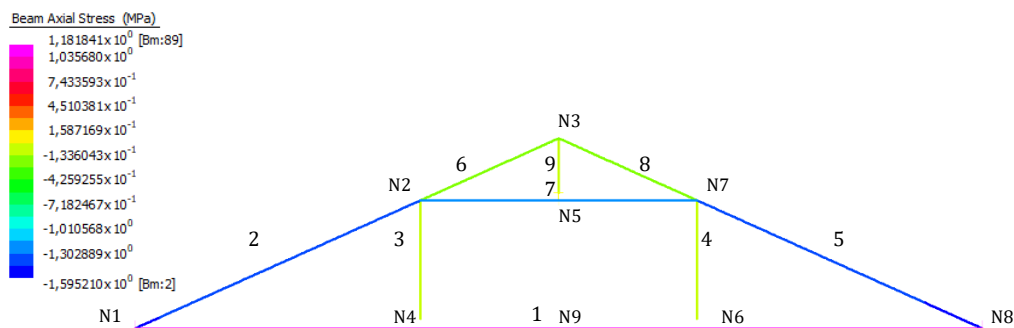


Fig. 5.34: Contour plot delle tensioni interne della Capriata B7.

Capriata B8

Il notevole stato di degrado meccanico pone la capriata in una condizione di particolare vulnerabilità. La classificazione della quasi totalità delle sue aste ricade in categoria III e per la controcatena (asta 7) è da ritenersi non definibile, vista la presenza della fibra ritorta nella sua mezzeria. In termini di tensioni le aste appaiono rispondere secondo la concezione strutturale ad ‘arco a tre cerniere’ anche se la pressoflessione a cui risulta soggetta la stessa controcatena, è anomala rispetto al comportamento rilevato per la ‘Capriata Tipo’ della medesima zona.

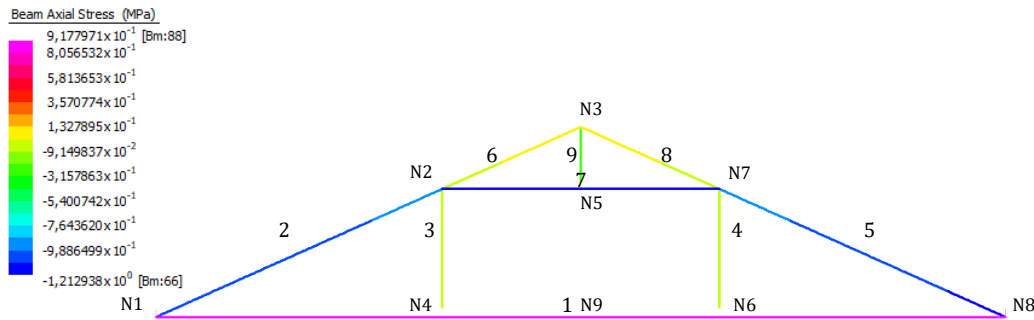


Fig. 5.35: Contour plot delle tensioni interne della Capriata B7.

Capriata C2

Lo svergolamento della saetta (asta 8) — rilevato in fase di ispezione visiva — unitamente al livello di danno moderato per il puntone (asta 9) nel nodo 9, inducono uno stato di tensione che vede gravare sulla porzione ovest della capriata (aste 2 e 10) il massimo sforzo di compressione.

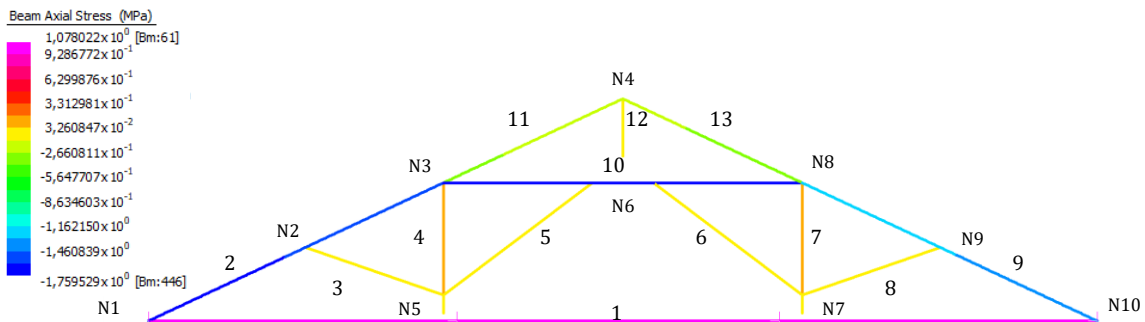


Fig. 5.36: Contour plot delle tensioni interne della Capriata C2.

Capriata C6

Le anomalie rilevate per i puntoni laterali (aste 2 e 9), anche se di livello lieve, portano uno stato di tensione che individua il massimo sforzo di compressione nella controcatena (asta 10), elemento centrale, oltre che della capriata, anche dello schema statico di ‘arco a tre cerniere’. Tale asta tende a scaricare gli sforzi di compressione su entrambi i monaci laterali, il cui stato di tensione risulta pari al doppio del valore evidenziato in condizioni sane per la ‘Capriata Tipo A-C’.

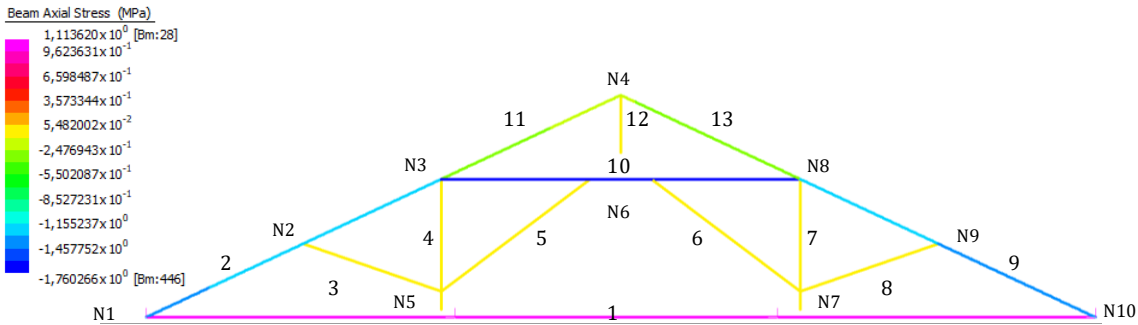


Fig. 5.37: Contour plot delle tensioni interne della Capriata C6.

Capriata C9

La capriata mostra un chiaro comportamento secondo lo schema statico di ‘arco a tre cerniere’ nonostante le anomalie rilevate nei pressi dei nodi 2 e 9. Il livello di danno che dal moderato tende al grave registrato per la testa della catena in prossimità del nodo 1 non sembra influire sullo stato di tensioni interne. Rispetto ad altre strutture, i monaci laterali (aste 4 e 5) mostrano uno stato di tensione di compressione maggiore, a seguito dello sforzo di compressione trasmesso dalle rispettive saette (aste 3 e 8), a sostegno dei puntoni (aste 2 e 9).

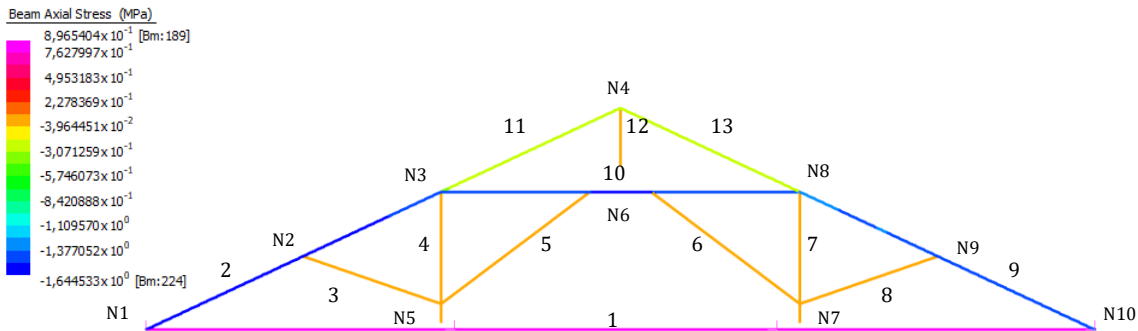


Fig. 5.38: Contour plot delle tensioni interne della Capriata C9.

Capriata C10

La struttura vede un comportamento pressoché ideale dal punto di vista tensionale anche se l’ispezione visiva ha evidenziato la presenza di diversi interventi di supporto, tra i quali la fettonatura eseguita sul nodo 10. Il puntone ad est (asta 9) mostra uno stato di tensione di compressione variabile; la prova resistografica eseguita⁴² ha mostrato una sezione resistente ($P_r/P_t=1,00$). Il corrispettivo elemento ad ovest (asta 2) è risultato ammalorato ed umido in prossimità del nodo 1 ($P_r/P_t=0,69$) e vede la massima tensione di compressione. I monaci laterali (aste 4 e 7) hanno differenti livelli di trazione.

⁴² Si vedano i risultati della prova resistografica RH.240 in Appendice.

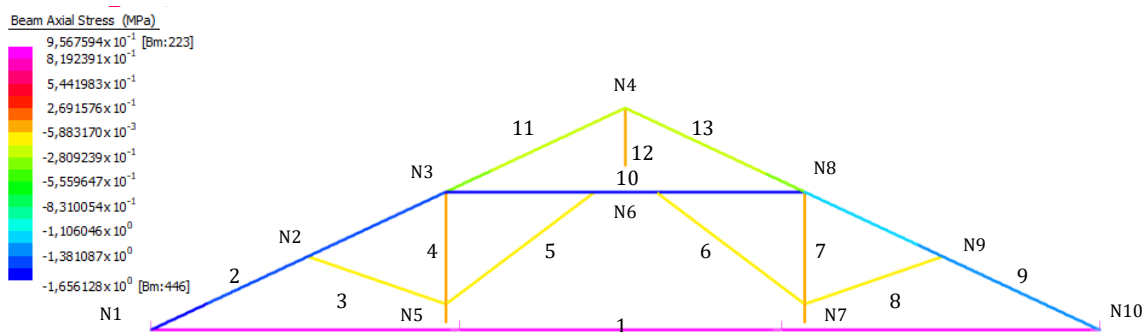


Fig. 5.39: Contour plot delle tensioni interne della Capriata C10.

5.4.2.4 Analisi dei risultati in termini di spostamenti

I risultati sono stati esaminati anche in termini di spostamenti in direzione verticale per confrontare i dati rilevati in sito in fase di rilievo geometrico e prevedere eventuali vulnerabilità e collassi. Come per i modelli in condizioni sane si è provveduto alla modellazione delle staffe in ferro tramite elementi tipo *link* sia per il nodo puntone-catena che per le regge tra monaci e catena e tra monaco superiore e controcatena.

Capriata A1

La rappresentazione a Contour plot (Fig. 5.40-a) mostra chiaramente come la capriata giunga ad una situazione di collasso a seguito del cedimento del nodo 3. Il livello di danno registrato per la testa della controcatena (asta 10) in prossimità di tale nodo porta alla sua sconnessione a seguito dello sforzo indotto dal puntone superiore. Il nodo puntone-controcatena — a dente arretrato — indipendentemente dall'esito della verifica agli stati limite ultimi, è ad oggi in condizioni di precaria stabilità poiché supportato dall'intervento di manutenzione eseguito per mezzo di puntelli lignei chiodati al monaco (asta 4). Nella situazione reale, quest'ultimo elemento subisce un cedimento che lo porta nella condizione finale di appoggio sull'orizzontamento di calpestio, gravando di conseguenza sulla catena sottostante. La modellazione dello schema statico di tale condizione, è stata eseguita introducendo nel software FEM una condizione di vincolo per il nodo al piede del monaco e ricavandone le relative tensioni e deformazioni al fine di avere una risposta dell'analisi statica lineare più verosimile allo stato attuale in opera. Secondo tale soluzione, il cedimento del monaco è limitato alla distanza rilevata in sito (d_m) tra l'estradosso dello stesso monaco e le tavole a pavimento (Fig. 5.40-b). La vulnerabilità della capriata appare però permanere visto l'elevato sforzo di compressione trasmesso dalla saetta (asta 3) al monaco (asta 4), con il probabile cedimento del nodo 5 e il conseguente collasso della struttura.

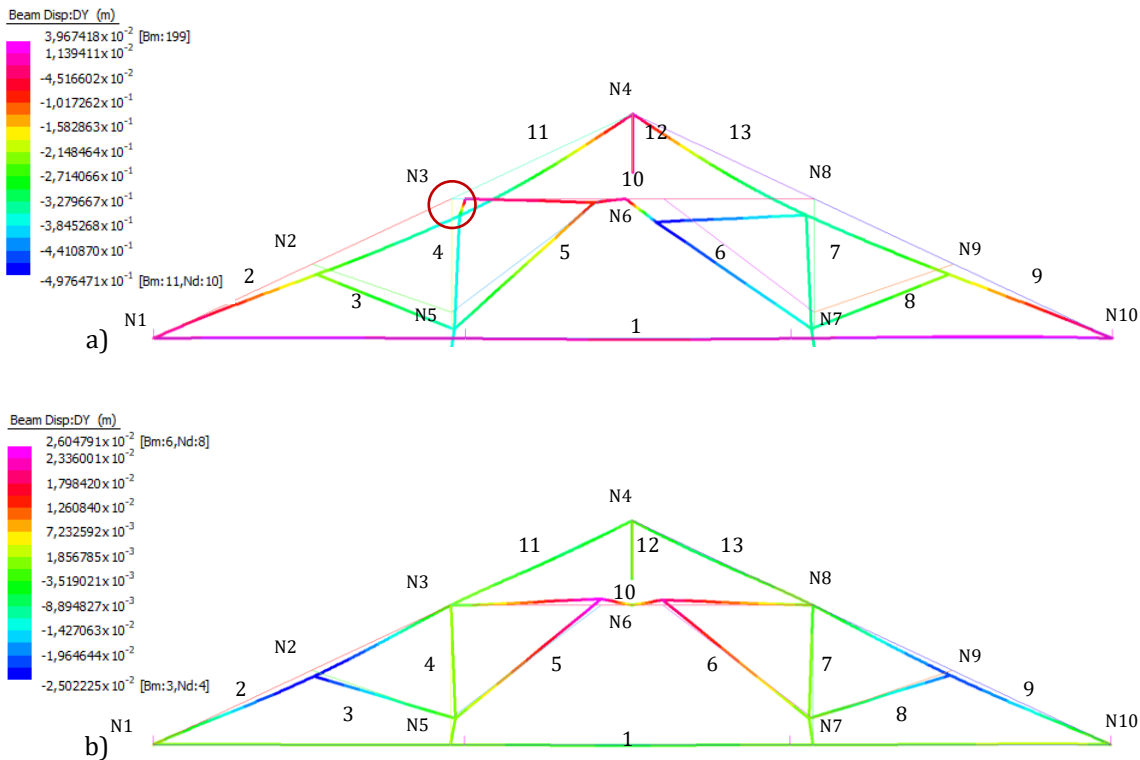


Fig. 5.40: Contour plot delle deformazioni della Capriata A1: a) con supporto al nodo 3, b) priva di supporto.

Capriata A3

La capriata presenta il suo massimo abbassamento in corrispondenza del nodo 9, a conferma del fatto di come la saetta e il puntone (aste 8 e 9) siano da considerarsi di categoria III. L'esito di tale deformazione è legato anche allo stato di tensione del nodo 10 tra la catena e il puntone (aste 1 e 9), il cui comportamento risulta essere alla base di quello dell'intera struttura.

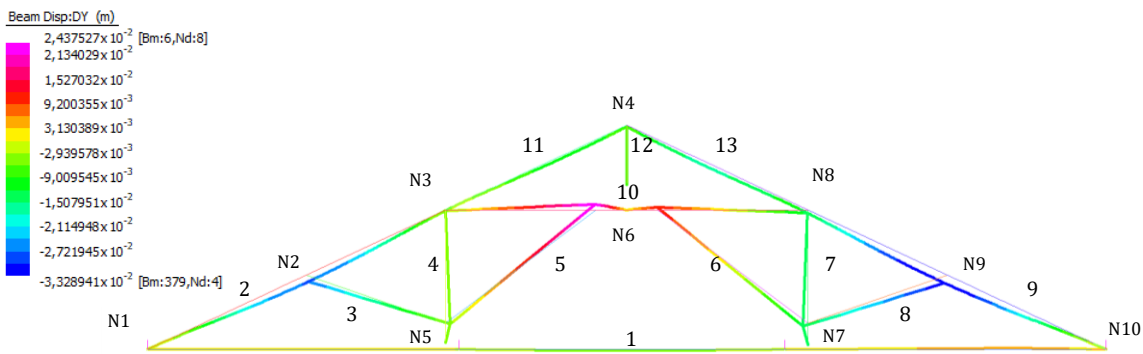


Fig. 5.41: Contour plot delle deformazioni della Capriata A3.

Capriata A7

Anche per tale capriata il massimo abbassamento si è registrato in prossimità del nodo 9, a seguito della classificazione in categoria III della saetta (asta 8) il cui livello di degrado e di lesioni incide sull'appoggio (nodo 9) in mezzeria del puntone (asta 9). Il livello di danno lieve riscontrato per la testa della catena in corrispondenza del nodo 10 ha una ricaduta in soli termini di tensione.

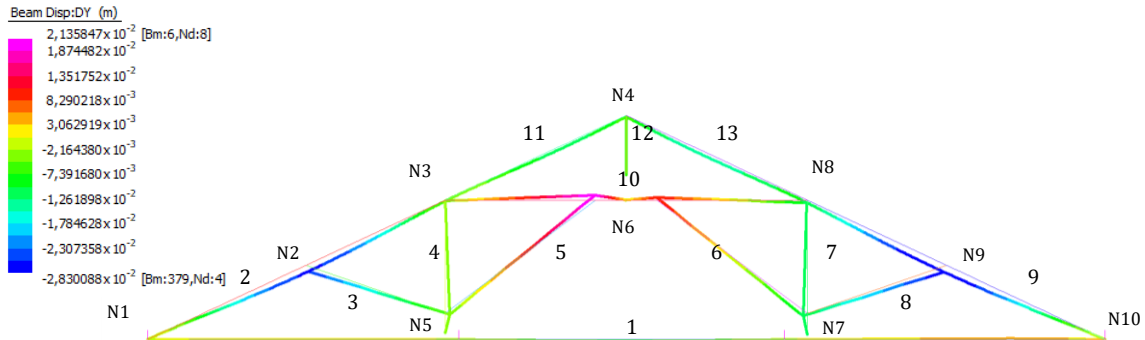


Fig. 5.42: Contour plot delle deformazioni della Capriata A7.

Capriata B3

Lo schema statico con il monaco (asta 3) distaccato dalla catena (Fig. 5.43-a) registra gli abbassamenti maggiori in prossimità della mezzeria dei puntone laterali e della stessa catena, con un incremento di 0,5 centimetri rispetto alla condizione di legno sano. I difetti ed il danno, seppur lieve, incidono sulla risposta in termini deformativi per la capriata. L'analisi della condizione limite che vede il monaco in appoggio alla catena (Fig. 5.43-b) presenta invece una risposta che tende a provocare il cedimento della porzione destra dell'elemento con conseguenti ricadute sulla vulnerabilità della struttura e sul sistema di sospensione a supporto del controsoffitto affrescato della sala da ballo sottostante. Tale analisi vuole evidenziare come, anche in assenza di uno stato di degrado evidente, i difetti e le lesioni meccaniche possano portare ad una classificazione secondo la resistenza che reputi la struttura al limite di esercizio. Lo stesso prof. Giordano afferma che «guasti, difetti, alterazioni e smussi superanti i limiti della categoria III caratterizzano elementi da non potersi ammettere per costruzioni permanenti» (Giordano, 1993).

Per la Capriata B3 l'ispezione visiva ha rilevato notevoli principi di fibra ritorta per diversi elementi lignei (aste 1, 7 e 9) oltre ad un'inclinazione della fibratura pari a circa il 35% per il puntone ad est (asta 5). Tali elementi non risulterebbero classificabili secondo la norma UNI 11119, essendo per la stessa da considerarsi un'inclinazione massima di circa il 33% per la categoria III. Appare evidente come la struttura risulti da attenzionare anche se l'esito della valutazione del danno l'abbia inquadrata in un livello estremamente lieve ($P_r/P_t=0,97$).

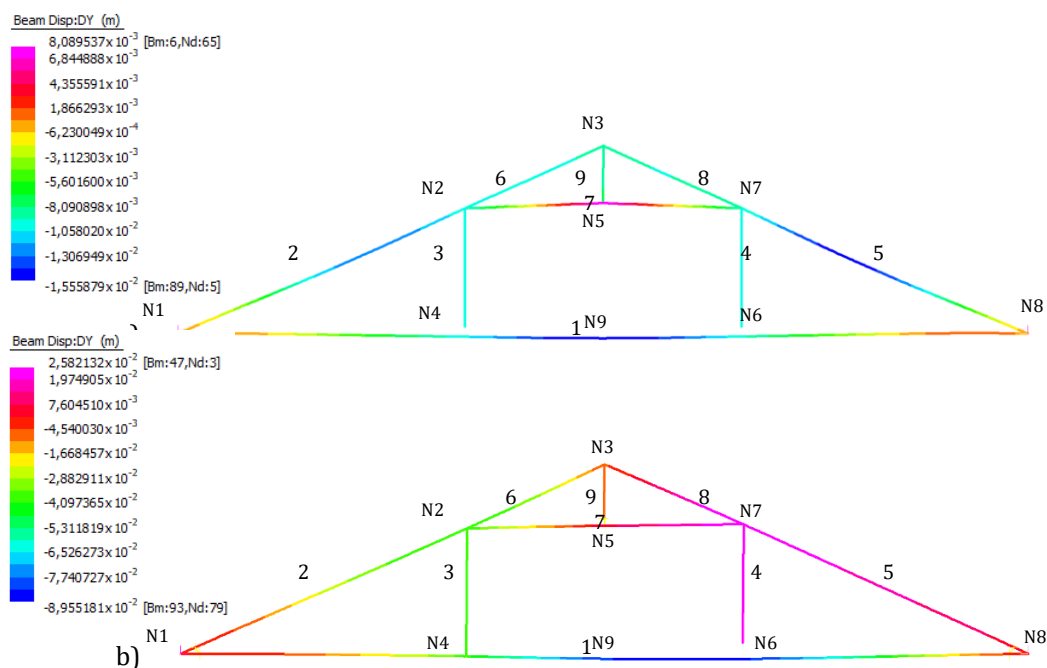


Fig. 5.43: Contour plot delle deformazioni della Capriata B3: a) allo stato attuale; b) con cedimento del N4.

Capriata B7

La capriata registra il suo massimo abbassamento in corrispondenza della mezzeria di tutti i puntoni e della catena. In particolare i puntoni superiori (aste 6 e 8) hanno evidenziato un notevole degrado meccanico con principi di fibra ritorta che classificano entrambe le aste ai limiti della categoria III in termini di resistenza. Entrambi i monaci vedono un abbassamento nell'ordine del centimetro come rilevato per la maggior parte dei nodi 4 e 6 delle capriate della 'Zona B'. In linea generale sulle capriate di tale zona grava un carico maggiore per via dell'orditura composta e del maggiore interasse tra le stesse strutture lignee con abbassamenti limitati dalla scelta di una specie legnosa più robusta e duratura al fine di preservare l'affresco di pregio della sala da ballo sottostante. In termini di deformazioni sarà effettuata la verifica agli stati limite di esercizio per la freccia registrata in mezzeria della catena (asta 1), su cui grava il sistema di sospensione.

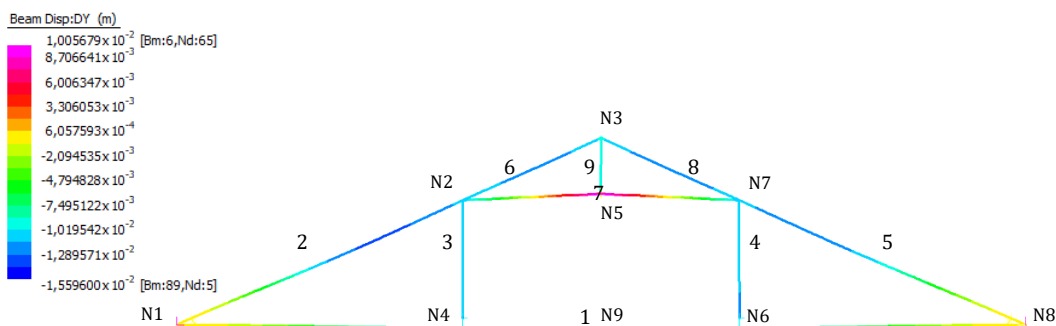


Fig. 5.44: Contour plot delle deformazioni della Capriata B7.

Capriata B8

In mezzeria della catena (asta 1) si registra la massima deformazione della capriata che, in generale, risente della classificazione in categoria III della quasi totalità delle sue aste componenti. La controcatena, a seguito del degrado generale — sia biotico che meccanico — mostra un comportamento flettente come evidenziato in fase di ispezione visiva. La fibra ritorta in mezzeria, è per la stessa asta un’anomalia che la rende non classificabile.

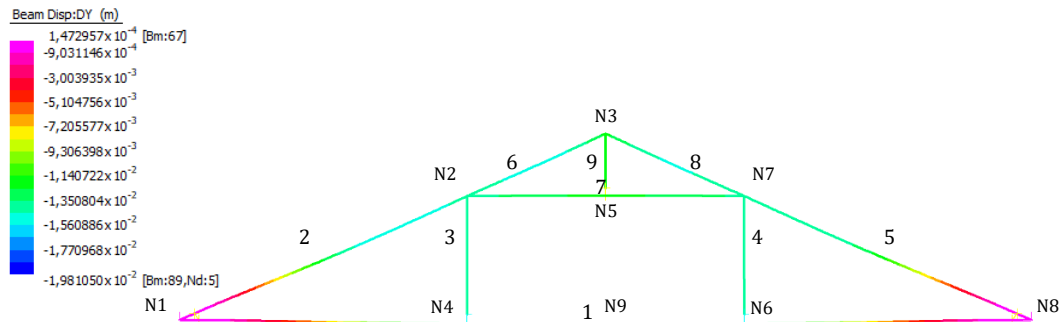


Fig. 5.45: Contour plot delle deformazioni della Capriata B8.

Capriata C2

La classificazione nella categoria II per la totalità degli elementi della porzione est (aste 6, 7, 8, 9, 13) porta a registrare la massima deformazione in prossimità del nodo 9. Tale connessione risente inoltre del cedimento vincolare dovuto allo svergolamento della saetta (asta 8).

In linea generale il danno, anche se di livello prossimo al moderato ($P_r/P_t=0,75$), non induce un’instabilità globale sulla capriata anche se dovrà comunque essere verificata la stabilità locale dell’elemento ammalorato (asta 9).

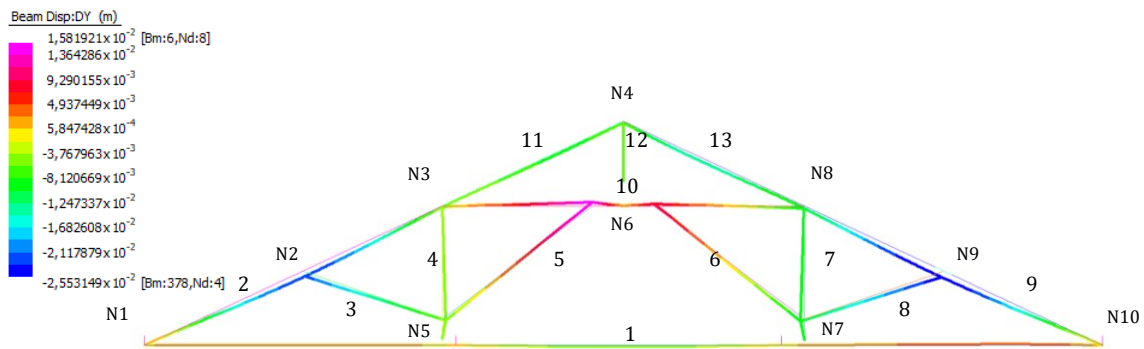


Fig. 5.46: Contour plot delle deformazioni della Capriata C2.

Capriata C6

La rappresentazione a Contour plot (Fig. 5.47) evidenzia come il massimo abbassamento si verifichi in corrispondenza dei nodi 2 e 9, come confermato dallo svergolamento registrato in fase di ispezione visiva per entrambe le saette (aste 3 e 8). Nonostante un livello di danno lieve per entrambi i puntoni laterali, il notevole grado di umidità derivante dalle infiltrazioni, appare incidere in maniera determinante sulla densità degli elementi e sulle proprietà meccaniche.

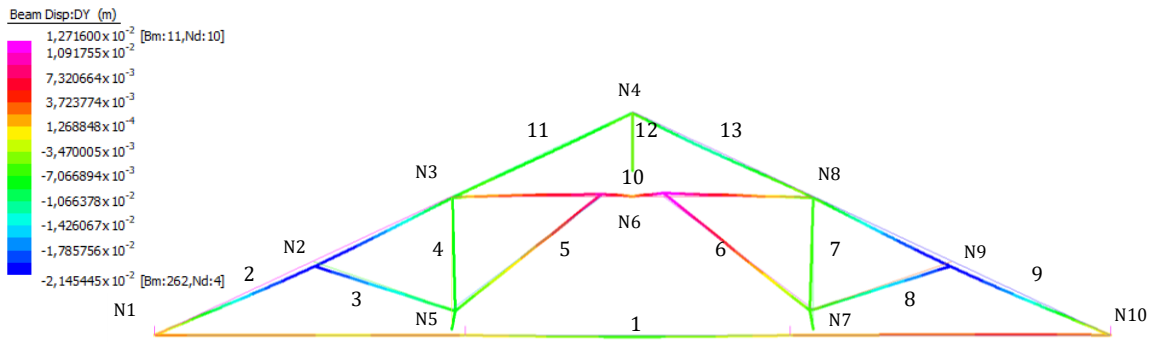


Fig. 5.47: Contour plot delle deformazioni della Capriata C6.

Il livello di danno estremamente grave ($P_r/P_t=0,15$) rilevato per la testa della catena (asta 1) in prossimità del nodo 1, sembra apparentemente non avere effetti sulla stabilità della capriata. L'analisi condotta in assenza degli elementi *link* che simulano le regge in ferro, rivela però come tali rinforzi siano determinanti per limitare le deformazioni che si avrebbero a seguito del cedimento del nodo puntone-catena, con il conseguente abbassamento pari ad un valore oltre il doppio per il nodo 2 (Fig. 5.48).

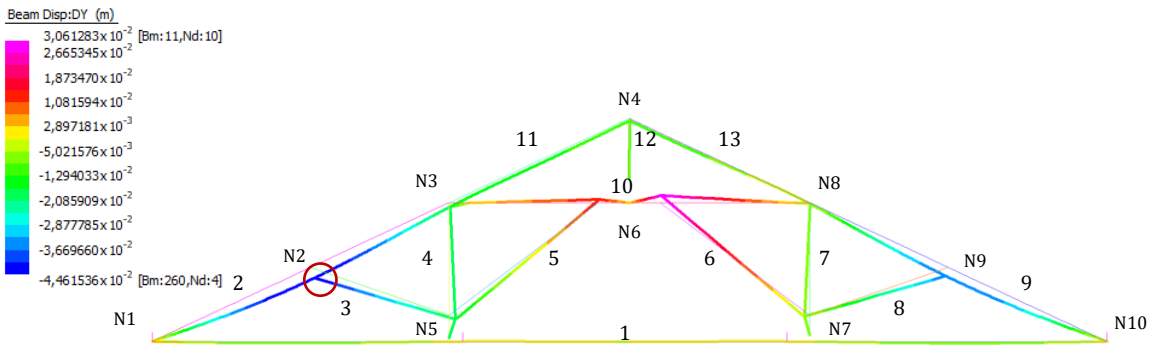


Fig. 5.48: Contour plot delle deformazioni della Capriata C6 priva delle regge in ferro.

Capriata C9

Come per altre strutture, anche tale capriata vede il suo massimo abbassamento in corrispondenza dei nodi 2 e 9. Il livello di danno che dal moderato tende al grave ($P_r/P_t=0,59$) registrato per la testa della catena (asta 1) in prossimità del nodo 1, non sembra incidere sulla stabilità globale. Tale risultato è validato da un'attenta analisi della relativa prova resistografica⁴³, grazie alla quale è possibile affermare come le porzioni di sezione ammalorata siano concentrate nelle porzioni esterne dell'elemento ligneo, presentando integra la parte interna della stessa catena. Il risultato sarà verificato in termini di 'sezione effettiva' per il nodo puntone-catena, secondo quanto stabilito dalle Norme Tecniche e dal CNR-DT 206 R1/2018.

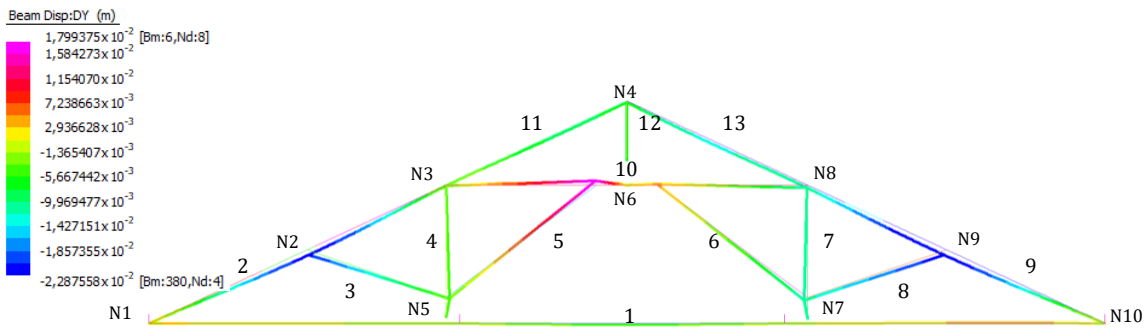


Fig. 5.49: Contour plot delle deformazioni della Capriata C9.

Capriata C10

Il puntone ad ovest (asta 2) — risultato fortemente ammalorato ed umido in prossimità del nodo 1 ($P_r/P_t=0,69$) — registra il massimo abbassamento della capriata in prossimità del nodo 2. Le profonde lesioni riscontrate in fase di ispezione visiva per il monaco e la saetta adiacenti (aste 4 e 5) comportano lo svergolamento della controcattena (asta 10), la cui ammissione in opera è al limite di tolleranza a causa della fibra ritorta rilevata, che classifica l'elemento in categoria III.

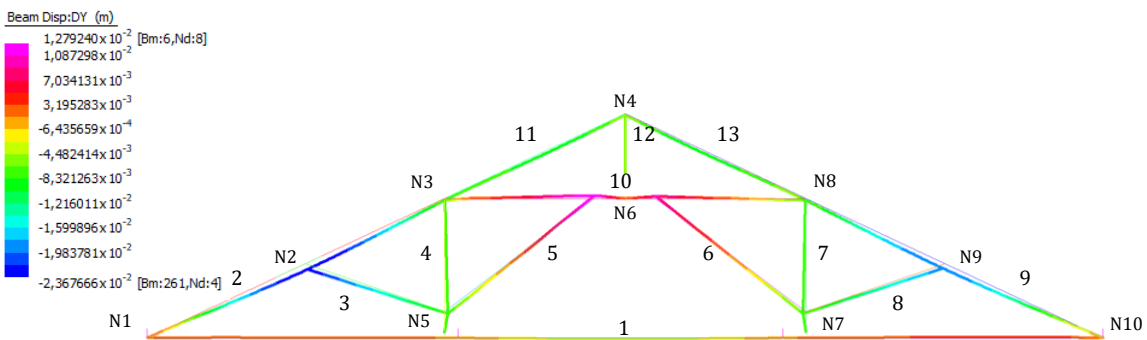


Fig. 5.50: Contour plot delle deformazioni della Capriata C10.

⁴³ Si vedano i risultati della prova resistografica RH.185 in Appendice.

5.4.3 Osservazioni e confronto dei risultati

Si riportano, a seguire, i risultati ottenuti relativamente agli abbassamenti delle capriate analizzate, confrontati in funzione della zona di appartenenza del sottotetto. Il confronto dei valori delle capriate ammalorate è stato svolto con quelli ottenuti per le analisi delle 'Capriate Tipo' in condizioni sane⁴⁴ (Tabb. 5.37-5.38-5.39).

Tab. 5.37: Confronto tra gli abbassamenti dei nodi delle Capriate A1, A3, A7.

Nodo [#]	DY_Ni_Tipo-A [m]	DY_Ni_A1 [m]	DY_Ni_A3 [m]	DY_Ni_A7 [m]
1	-	-	-	-
2	-2,29*10 ⁻²	-2,14*10 ⁻¹	-2,73*10 ⁻²	-2,60*10 ⁻²
3	-3,51*10 ⁻³	-3,64*10 ⁻¹	-3,62*10 ⁻³	-4,33*10 ⁻³
4	-5,35*10 ⁻³	-6,72*10 ⁻³	-7,01*10 ⁻³	-6,26*10 ⁻³
5	-3,53*10 ⁻³	-3,65*10 ⁻¹	-3,65*10 ⁻³	-4,36*10 ⁻³
6	+1,96*10 ⁻²	-4,97*10 ⁻¹	+2,43*10 ⁻²	+2,13*10 ⁻²
7	-9,63*10 ⁻³	-3,52*10 ⁻¹	-1,29*10 ⁻²	-1,07*10 ⁻²
8	-9,62*10 ⁻³	-3,52*10 ⁻¹	-1,29*10 ⁻²	-1,07*10 ⁻²
9	-2,41*10 ⁻²	-2,16*10 ⁻¹	-3,31*10 ⁻²	-2,82*10 ⁻²
10	-	-	-	-

Tab. 5.38: Confronto tra gli abbassamenti dei nodi delle Capriate B3, B7, B8.

Nodo [#]	DY_Ni_Tipo-B [m]	DY_Ni_B3 [m]	DY_Ni_B7 [m]	DY_Ni_B8 [m]
1	-	-	-	-
2	-7,75*10 ⁻³	-1,01*10 ⁻²	-1,12*10 ⁻²	-1,41*10 ⁻²
3	-6,04*10 ⁻³	-8,10*10 ⁻³	-1,01*10 ⁻²	-1,19*10 ⁻²
4	-7,95*10 ⁻³	-1,03*10 ⁻²	-1,15*10 ⁻²	-1,43*10 ⁻²
5	+6,03*10 ⁻³	+8,09*10 ⁻³	+1,01*10 ⁻²	-1,25*10 ⁻²
6	-7,34*10 ⁻³	-9,67*10 ⁻³	-1,16*10 ⁻²	-1,40*10 ⁻²
7	-7,14*10 ⁻³	-9,46*10 ⁻³	-1,13*10 ⁻²	-1,37*10 ⁻²
8	-	-	-	-
9	-1,16*10 ⁻²	-1,55*10 ⁻²	-1,56*10 ⁻²	-1,98*10 ⁻²

Tab. 5.39: Confronto tra gli abbassamenti dei nodi delle Capriate C2, C6, C9, C10.

Nodo [#]	DY_Ni_Tipo-C [m]	DY_Ni_C2 [m]	DY_Ni_C6 [m]	DY_Ni_C9 [m]	DY_Ni_C10 [m]
1	-	-	-	-	-
2	-2,29*10 ⁻²	-2,24*10 ⁻²	-2,14*10 ⁻²	-2,13*10 ⁻²	-2,37*10 ⁻²
3	-3,51*10 ⁻³	-5,19*10 ⁻³	-7,61*10 ⁻³	-3,73*10 ⁻³	-7,40*10 ⁻³
4	-5,35*10 ⁻³	-6,18*10 ⁻³	-5,30*10 ⁻³	-6,28*10 ⁻³	-5,64*10 ⁻³
5	-3,53*10 ⁻³	-5,22*10 ⁻³	-7,64*10 ⁻³	-3,77*10 ⁻³	-7,44*10 ⁻³
6	+1,96*10 ⁻²	+1,58*10 ⁻²	+4,27*10 ⁻²	+1,79*10 ⁻²	+1,28*10 ⁻²
7	-9,63*10 ⁻³	-9,94*10 ⁻³	-5,96*10 ⁻³	-1,12*10 ⁻²	-8,23*10 ⁻³
8	-9,62*10 ⁻³	-9,90*10 ⁻³	-5,94*10 ⁻³	-1,09*10 ⁻²	-8,19*10 ⁻³
9	-2,41*10 ⁻²	-2,55*10 ⁻²	-2,11*10 ⁻²	-2,28*10 ⁻²	-2,02*10 ⁻²
10	-	-	-	-	-

⁴⁴ Per 'condizioni sane' ci si riferisce ad elementi lignei privi di danni e anomalie in regime igroscopico.

Gli abbassamenti delle capriate ammalorate, espressi in notazione percentuale, evidenziano come il degrado vada ad inficiare sui nodi di carpenteria e, di conseguenza, sul comportamento globale delle strutture lignee di copertura. Le valutazioni eseguite sembrano ben descrivere il comportamento delle capriate ed i risultati in termini di tensioni e abbassamenti forniscono chiaramente i dati e le indicazioni da approfondirsi e verificarsi secondo quanto richiesto dalle Norme Tecniche relative alle strutture lignee esistenti. L'analisi degli spostamenti per la capriata A1 è stata effettuata considerando la struttura priva degli interventi di sostegno a supporto del nodo 3, al fine di valutare la gravità del danno rilevato in fase di indagini (Tab. 5.40).

Tab. 5.40: Confronto tra gli abbassamenti DY dei nodi delle capriate ammalorate espressi in termini percentuali.

Nodo [#]	N_{i,A1} [%]	N_{i,A3} [%]	N_{i,A7} [%]	N_{i,B3} [%]	N_{i,B7} [%]	N_{i,B8} [%]	N_{i,C2} [%]	N_{i,C6} [%]	N_{i,C9} [%]	N_{i,C10} [%]
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	834%	19%	14%	30%	45%	82%	-2%	-7%	-7%	3%
3	10270%	3%	23%	34%	67%	97%	48%	117%	6%	111%
4	26%	31%	17%	30%	45%	80%	16%	-1%	17%	5%
5	10240%	3%	24%	34%	67%	307%	48%	116%	7%	111%
6	2636%	24%	9%	32%	58%	91%	-19%	118%	-9%	-35%
7	3555%	34%	11%	32%	58%	92%	3%	-38%	16%	-15%
8	3559%	34%	11%	-	-	-	3%	-38%	13%	-15%
9	796%	37%	17%	34%	34%	71%	6%	-12%	-5%	-16%
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

La letteratura è concorde nell'affermare che la valutazione degli elementi di legno storico è condizionata dalla difficile determinazione dei valori effettivi dei principali parametri, quali ad esempio il modulo di elasticità, poiché dipendenti dalla variabilità delle caratteristiche del materiale. L'eterogeneità comporta notevoli differenze non solo da specie a specie ma anche da elemento ad elemento della medesima specie legnosa, da sezione a sezione della stessa membratura. Occorre dunque operare con medie dei valori determinati tenendo però specifico conto, com'è di consueto nell'ingegneria, delle situazioni più compromesse e dei valori più discosti da quelli medi e quindi più preoccupanti. Il confronto con tabelle di valori medi permette di compiere considerazioni su cause ed effetti, valutazioni di efficienza, prospezioni di rischio (Tampone, 2005).

È proprio a partire da tali considerazioni ed osservazioni che è possibile affermare come le difficoltà di approccio alle strutture lignee risultino essere maggiori per l'esistente e come, nello specifico, sia difficile determinare i valori effettivi delle variabili, dei parametri e dei vari coefficienti da considerarsi. Tra le varie metodologie proposte in bibliografia si è approcciata quella specifica basata dapprima sull'ispezione visiva e successivamente sulla validazione dei

rilievi in sito tramite prove debolmente distruttive sulle zone degradate da ispezionarsi. Le fasi del processo adottato per l'analisi delle strutture lignee sono proseguite con la diagnosi dettagliata dei principali elementi ammalorati per i quali è stata eseguita l'analisi strutturale (Fig. 5.51).

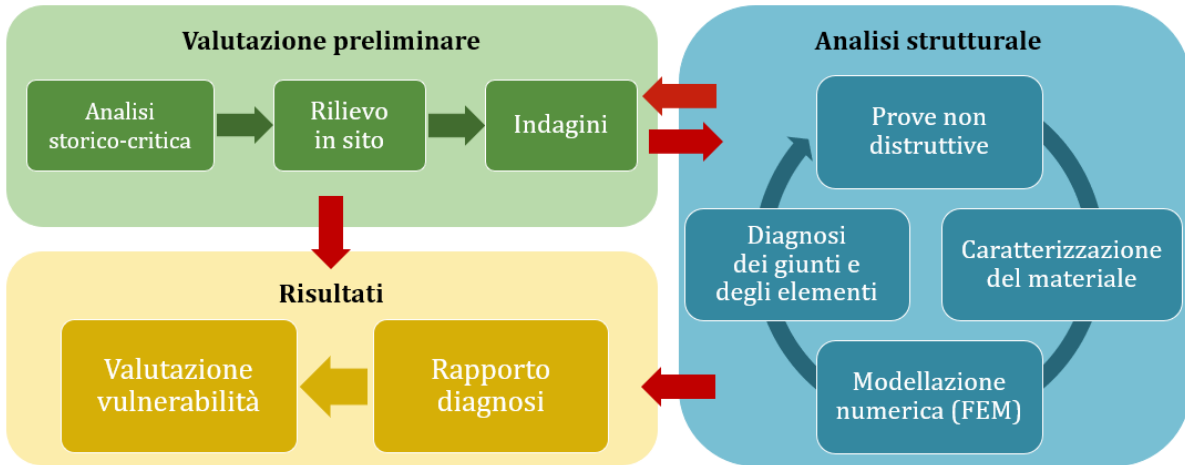


Fig. 5.51: Fasi del processo adottato per l'analisi delle strutture lignee di copertura di Villa Pisani a Stra.

6. VERIFICHE AGLI STATI LIMITE

Il capitolo tratta le verifiche agli Stati Limite delle capriate del caso-studio. Oltre all'applicazione delle formulazioni riportate nelle Norme Tecniche, esso ha l'obiettivo di fornire un quadro di valutazione generale della copertura del corpo centrale e di verificare l'efficienza degli elementi e dei collegamenti che hanno manifestato criticità in fase di indagini e di analisi. Sono trattate le principali verifiche agli Stati Limite di Esercizio (SLE) e agli Stati Limite Ultimi (SLU), in considerazione dei difetti e del livello di danno rilevato. Per i collegamenti, in particolare, le verifiche sono state condotte riferendosi alla sezione resistente efficace.

6.1 La valutazione delle strutture lignee

La valutazione dell'efficienza di una struttura lignea costituisce uno dei nodi centrali della conservazione architettonica ed al tempo stesso uno dei problemi più ardui e complessi. Fino a prima della norma UNI EN 17121:2019 non era definita nel panorama tecnico e professionale una metodologia di studio per una struttura lignea, per la quale sono notevoli le difficoltà di approccio legate alle alterazioni e alle complicanze dovute ad interventi pregressi, oltre che dettate dal grado di iperstaticità della struttura stessa.

Più in generale, la valutazione della sicurezza delle strutture è condotta secondo il metodo degli Stati Limite, utilizzando i principi fondamentali e i coefficienti di sicurezza riportati nelle Norme Tecniche. I requisiti di resistenza, funzionalità e robustezza sono garantiti verificando gli Stati Limite di Esercizio e gli Stati Limite Ultimi della struttura, dei singoli componenti strutturali e dei collegamenti. Le strutture di legno sono di tipo leggero, questo aspetto è un vantaggio perché porta a forze inerziali ridotte, ma il coefficiente di sicurezza globale viene penalizzato. Soprattutto per le grandi coperture è abbastanza frequente che il sovraccarico dovuto alla neve possa raggiungere valori elevati nell'eventualità di forti precipitazioni nevose con salti termici che provochino il progressivo congelamento del manto nevoso. In tali casi le coperture pesanti presentano un maggior margine di sicurezza potendo assorbire senza crolli incrementi di carico variabile più ampi (Zan, 2018).

VERIFICHE AGLI STATI LIMITE

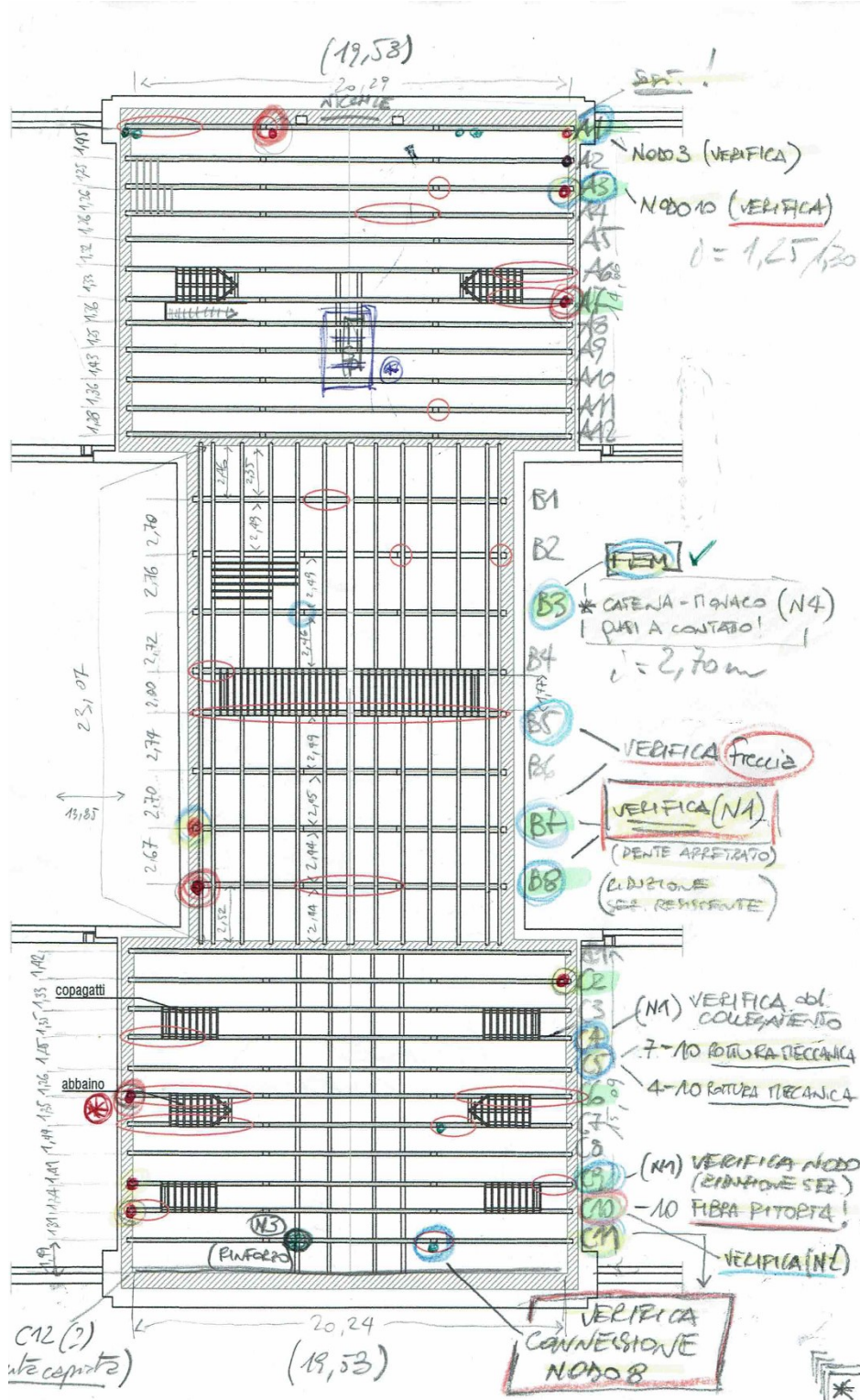


Fig. 6.1: Annotazioni riepilogative a seguito delle analisi e delle valutazioni condotte per le capriate lignee di copertura del corpo centrale di Villa Pisani a Stra.

Le strutture di legno, caratterizzate da diverso comportamento reologico, devono essere verificate per gli SLE e gli SLU, con riferimento alle condizioni iniziali e finali. Come descritto nei capitoli precedenti, il comportamento del legno è fortemente influenzato dal tempo di applicazione del carico e dall'umidità dell'ambiente, pertanto, a ciascuna azione di calcolo è assegnata una classe di durata del carico, mentre alla struttura è assegnata una classe di servizio che definisce l'umidità dell'ambiente in cui essa opera. I valori di calcolo per le proprietà del materiale si assegnano a loro volta, quindi, a partire dai valori caratteristici, con riferimento alle classi di servizio e alle classi di durata del carico.

Nell'ambito del caso-studio in esame, si è proceduto ad eseguire le principali verifiche agli Stati Limite per le capriate indagate. In particolare sono state verificate le sezioni per le quali sono state rilevate anomalie o particolari condizioni ai limiti della stabilità, in funzione delle considerazioni esposte e delle relative annotazioni a valle delle analisi effettuate (Fig. 6.1). L'attribuzione dei valori caratteristici delle resistenze e dei moduli elastici è stata eseguita in funzione della categoria di appartenenza di ogni elemento da verificare, in relazione alla rispettiva classe di resistenza definita dalla norma UNI EN 338:2016 (Tab. 5.6).

Si riportano, a seguire, i risultati delle verifiche condotte precisando che i rispettivi calcoli sono stati eseguiti tramite l'ausilio di fogli di calcolo predefiniti reperiti da Zan (2018).

6.2 Verifiche agli Stati Limite di Esercizio

Le Norme Tecniche definiscono dei valori limite di freccia per le travi lignee in esercizio — in particolare per travi su due appoggi di legno massiccio — entro i quali la deformazione deve sottostarvi. Tali limiti sono tesi ad evitare danneggiamenti ai materiali di rivestimento e per necessità funzionali o estetiche. Le norme CNR DT 206-R1 precisano che «i limiti indicati per la freccia costituiscono solo dei requisiti indicativi» e lasciano al progettista la valutazione in funzione dei particolari casi da verificarsi, ad esempio in relazione ad elementi portati non facenti parte della struttura principale.

Nell'ambito delle verifiche agli SLE per le capriate lignee di copertura del corpo centrale di Villa Pisani si è scelto di effettuare le verifiche delle deformazioni delle catene e dei puntoni, essendo gli unici elementi lignei caricati sia da azioni permanenti che variabili e, soprattutto, essendo gli unici ad avere un comportamento flessionale. Trattandosi di elementi appartenenti al costruito

storico esistente di un edificio adibito a polo museale, i valori limite della freccia indicati in normativa sono da considerarsi come meri riferimenti, poiché riferiti a strutture con destinazioni d'uso differenti con condizioni di carico e valori dimensionali non direttamente confrontabili con gli elementi lignei del sottotetto in esame.

6.2.1 Verifiche delle deformazioni

Le deformazioni di una struttura, dovute agli effetti delle azioni applicate, degli stati di coazione, delle variazioni di umidità e degli scorrimenti delle unioni, devono essere contenute entro limiti accettabili sia in relazione ai danni che possono essere indotti ai materiali di rivestimento, sia in relazione ai requisiti estetici e alla funzionalità dell'opera in condizioni di esercizio. Per gli elementi in legno, i modesti valori di modulo elastico a taglio G , in rapporto a quelli del modulo elastico longitudinale E_0 , rendono necessario considerare nel calcolo della freccia elastica anche la deformabilità a taglio. La deformazione globale di un elemento in legno, a causa delle sue caratteristiche reologiche, è caratterizzata da un andamento inizialmente elastico che subito diventa di tipo visco-elastico — dovuto al fenomeno del *fluage* — causando sotto carico costante un progredire della deformazione nel tempo (Zan, 2018).

6.2.1.1 'Capriata Tipo A-C'

La concezione strutturale di tale tipologia di capriata palladiana composta comporta la verifica delle deformazioni dei suoi elementi inflessi. La catena (asta 1) presenta uno schema statico di trave continua su 4 appoggi, identificabili nelle murature degli ambienti del piano ammezzato e in quelle perimetrali, mentre per i puntoni laterali (aste 2 e 9) è da considerarsi anche l'appoggio in mezzzeria dovuto alla presenza delle saette e quindi uno schema statico di trave continua su 3 appoggi (Fig. 6.2).

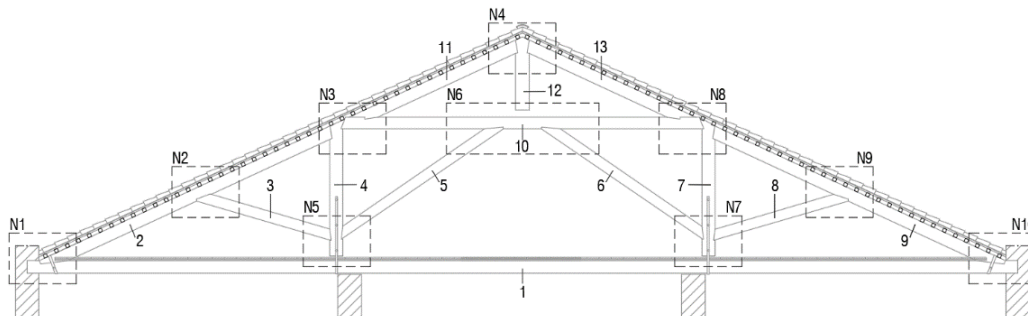


Fig. 6.2: Individuazione di aste e nodi nella 'Capriata Tipo A-C'.

Catena (asta 1)

Ai fini della sicurezza, anche se la maggior parte delle catene delle capriate A e C è stata classificata di categoria I, essendo le stesse in gran parte non ispezionabili a causa del pacchetto relativo all'orizzontamento di calpestio soprastante, si considera cautelativamente una categoria II di classificazione secondo la norma UNI 11119, pari ad una classe di resistenza C20 della norma UNI EN 338. La luce netta tra gli appoggi intermedi è stimata in circa 7 metri lineari.

Si precisa che la verifica rigorosa considera la valutazione della freccia per una trave in semplice appoggio, pertanto è lecito riconoscere una certa tolleranza nel risultato relativo ai carichi permanenti, la cui configurazione statica è più simile ad una trave semi-incastrata non potendo l'elemento inflettersi liberamente negli appoggi intermedi considerati. Il risultato negativo ottenuto ($u_{\text{net,fin}} = 42,15 \text{ mm} > L/250 = 28,00 \text{ mm}$) per la freccia finale appare quindi tollerabile, soprattutto in considerazione del fatto che non si ha un riscontro diretto delle massime deformazioni allo stato attuale, non essendo stata eseguita nessuna ispezione in prossimità della mezzeria con rilievo della misura in essere. Risultano invece soddisfatte le verifiche relative al carico variabile da manutenzione (q_H) secondo le combinazioni rara e permanente.

Puntoni (aste 2 e 9)

La verifica è stata condotta riferendosi ad una categoria III di classificazione secondo la resistenza — pari ad una classe C16 per la norma UNI EN 338 — essendo stata riscontrata per l'elemento 9 della capriata A11 e della capriata A12. Durante l'ispezione in sito, tali strutture hanno presentato un'inflexione della copertura in corrispondenza del nodo 9, con ricadute gravanti sull'appoggio intermedio ad est. Conducendo la verifica includendo la presenza della saetta (asta 8), l'esito in termini di freccia finale dovuta ai carichi permanenti ha soddisfatto il requisito minimo, in considerazione dell'appoggio intermedio fornito dalla saetta, l'esito è positivo e la verifica soddisfatta ($u_{\text{net,fin}} = 5,87 \text{ mm} < L/250 = 13,40 \text{ mm}$). La verifica a deformazione per il carico variabile è soddisfatta sia per la combinazione rara che per la combinazione quasi permanente.

6.2.1.2 'Capriata Tipo B'

Anche per le verifiche a deformazione delle capriate della 'Zona B' è necessaria una considerazione preliminare relativamente alla concezione strutturale. Mentre per i puntoni (aste 2 e 5) possono essere condotte rigorosamente, per la catena (asta 1) si è resa necessaria la valutazione dal punto di vista statico del complesso sistema di sospensione a sostegno del

controsoffitto del salone centrale, gravante sull'elemento ligneo principale, semplicemente appoggiato sulle murature d'ambito (Fig. 6.3).

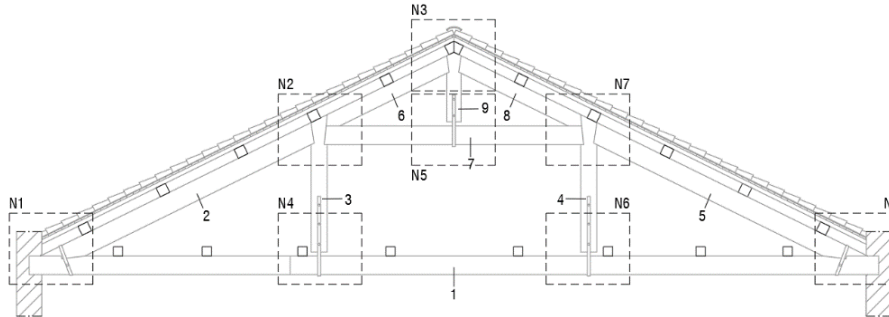


Fig. 6.3: Individuazione di aste e nodi nella 'Capriata Tipo B'.

Catena (asta 1)

La notevole luce netta di quasi 15 metri ha comportato la realizzazione della catena necessariamente costituita da più elementi lignei collegati tramite la particolare unione a 'dardo di Giove'. La sola catena però, già ai tempi di realizzazione della Villa, doveva apparire non idonea a sopportare efficacemente le sollecitazioni a flessione derivanti dal controsoffitto affrescato applicato alla stessa. Il risultato fu la realizzazione di un articolato sistema di sospensione in grado di contenere al massimo la deformabilità di ciascuna capriata al fine di non produrre deformazioni nel piano verticale con la conseguenza di danni alla stabilità ed alla geometria del controsoffitto. Le staffe metalliche e gli elementi lignei di collegamento servono a sospendere il controsoffitto alla catena di ciascuna unità strutturale. La soluzione adottata richiama quella del controsoffitto del Salone dei Cinquecento a Palazzo Vecchio a Firenze realizzata dal Vasari e dettagliatamente descritta da Tampone (2005): «oltre alle staffe di estremità del nodo sono visibili ponticelli di piatto metallico per migliorare, con l'ausilio di traverse, il sostegno del soffitto sospeso». Anche per il sistema di sospensione di Villa Pisani, il complesso controsoffitto, decorato dal Tiepolo, è sostenuto da una serie di tiranti di sospensione — lignei e metallici — e da staffe ritorte che sostengono a loro volta gli elementi lignei ai quali sono chiodate le centine. Il rinforzo delle catene avviene mediante l'apposizione estradossale di travi di ripartizione rompitratta da cui dipartono staffe verticali ritorte dotate di organi regolatori a vite e di piastre di diffusione delle tensioni alle testate. Il peso del controsoffitto risulta quindi dosato come per l'opera del Vasari a Firenze, in modo tale da essere minore al centro del salone per gravare meno sulla mezzeria delle stesse catene delle capriate palladiane della 'Zona B' (Fig. 6.4).



Fig. 6.4: Sistema di sospensione della 'Zona B' (sx) e particolare della staffa ritorta (dx).

La verifica della freccia netta finale non è soddisfatta ($u_{\text{net,fin}} = 123,25 \text{ mm} > L/250 = 56,60 \text{ mm}$). Il valore non è direttamente misurabile in sito vista la presenza della passerella soprastante, ma è confrontabile con altre soluzioni reperite in letteratura, quali ad esempio le capriate del Teatro Comunale di Modena ($u_{\text{net,fin}} = 130 \text{ mm}$) o dello stesso Palazzo Vecchio a Firenze ($u_{\text{net,fin}} = 110 \text{ mm}$). Le verifiche per il carico variabile da manutenzione (q_H) secondo le combinazioni rara e permanente non risultano anch'esse essere soddisfatte ($u_{2,\text{fin}} = 131,79 \text{ mm} > L/200 = 70,75 \text{ mm}$) a testimonianza di come la valutazione sia da approfondirsi vista la presenza degli organi di regolazione e degli elementi in ferro in prossimità degli appoggi, il cui contributo è ipotizzabile sia da considerarsi in termini di contrefreccia (u_0).

Puntoni (aste 2 e 5)

La verifica della deformazione è stata effettuata considerando dapprima la categoria II, per la quale la maggior parte degli elementi è risultata esser definita a seguito dell'ispezione visiva. Per una classe pari alla C24 tutte le verifiche agli SLE risultano essere soddisfatte: sia per i carichi permanenti ($u_{\text{net,fin}} = 16,13 \text{ mm} < L/250 = 19,20 \text{ mm}$) che per quelli variabili, per la cui combinazione il contributo del carico da manutenzione (q_H) non è combinabile con il carico dovuto all'azione della neve (q_s). L'ispezione visiva ha rilevato una classificazione di categoria III per i puntoni delle capriate B7 e B8, la cui verifica per una classe pari alla C18 risulta essere negativa relativamente ai carichi permanenti ($u_{\text{net,fin}} = 19,73 \text{ mm} > L/250 = 19,20 \text{ mm}$) con un abbassamento massimo nell'ordine della misura ottenuta per mezzo delle analisi statiche lineari.

6.3 Verifiche agli Stati Limite Ultimi

Le verifiche agli SLU sono state condotte verificando la resistenza dei principali elementi strutturali componenti le capriate, in base alle sollecitazioni cui sono risultati sottoposti, riferendosi alle sezioni con la massima sollecitazione. Le formulazioni adottate sono quelle riportate nelle principali Norme Tecniche, delle quali ne è stata data la descrizione nel § 3.3.2.2.

Si riportano, a seguire, le principali verifiche eseguite, suddivise in funzione della tipologia di capriata analizzata, per le quali sono indicati, oltre alla sollecitazione, i riferimenti all'elemento verificato ed i valori caratteristici assunti, individuanti il profilo resistente del legno massiccio secondo la norma UNI EN 338:2016. Tutte le verifiche sono state condotte considerando una 'Classe di servizio 2', come definito a seguito della valutazione delle condizioni igrometriche.

6.3.1 Verifiche per la 'Capriata Tipo A-C'

Per tale tipologia di capriata le verifiche eseguite hanno interessato gli elementi lignei principali in termini di sforzi di trazione o compressione ma anche di flessione e stabilità, sulla base dei valori di sollecitazione ricavati in fase di analisi statica lineare nella condizione di carico più rilevante. In funzione dei difetti e delle anomalie rilevate, la verifica assume rilevanza grazie alla correlazione tra la classificazione secondo la resistenza dettata dalla norma UNI 11119:2004 ed i valori caratteristici del legno adottati.

6.3.1.1 Verifiche a trazione

La sollecitazione di trazione interessa principalmente la catena (asta 1), per la quale si manifesta nella forma di trazione parallela alla fibratura in prossimità degli appoggi e di tensoflessione nella porzione centrale, a seguito del gravare sulla stessa del pacchetto di calpestio.

Trazione parallela alle fibre (asta 1)

La verifica a trazione parallela alle fibre in prossimità degli appoggi è da eseguirsi tenendo conto della riduzione di sezione dovuta all'intaglio della stessa catena per la realizzazione del collegamento a dente semplice con il puntone (aste 2 e 9), pari a circa 5 cm. Considerando un elemento ligneo con una classe di resistenza C16 (cat. III) si ottiene, tramite la [3.28]:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_{netta}} = \frac{70,67 \cdot 10^3}{4,84 \cdot 10^4} = 1,46 \text{MPa} < 5,10 \text{MPa} = \frac{0,9 \cdot 8,5}{1,5} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} = f_{t,0,d}$$

dove: $A_{netta} = (270 - 50) \cdot 220 = 4,84 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$.

Tenso-flessione parallela alle fibre (asta 1)

Nella condizione di tenso-flessione è necessario considerare, oltre allo sforzo di trazione, anche la sollecitazione di flessione dovuta al momento flettente ($M_d = 6,18 \text{ kN} \cdot \text{m}$) e verificare che siano soddisfatte entrambe le condizioni imposte dalle seguenti relazioni:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [6.1]$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [6.2]$$

rispettivamente pari a ($0,65 < 1$) e ($0,54 < 1$) e quindi soddisfacenti la verifica.

6.3.1.2 Verifiche a compressione

Le verifiche a compressione eseguite considerano sia la condizione di compressione parallela che inclinata rispetto alla fibratura. A causa della possibile instabilità si è eseguita anche la specifica verifica legata al carico critico di punta oltre che la verifica a presso-flessione per gli elementi soggetti anche alla sollecitazione flettente, come nel caso dei puntoni (aste 2, 9, 11, 13).

Compressione parallela alle fibre (asta 10)

La sollecitazione di compressione pura parallela alla fibratura interessa la controcatena (asta 10) che è risultata soggetta ad uno sforzo pari a $N_d = -65,20 \text{ kN}$. Considerando un elemento di classe C16 (cat. III) come quello definito per la capriata C10, la verifica secondo la [3.31] risulta:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{\text{lorda}}} = \frac{65,20 \cdot 10^3}{4,25 \cdot 10^4} = 1,53 \text{ MPa} < 10,20 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 17}{1,5} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = f_{c,0,d}$$

dove $A_{\text{lorda}} = 170 \cdot 250 = 4,25 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$ senza tenere conto delle riduzioni della sezione, in quanto gli intagli hanno un effetto molto meno sfavorevole rispetto al caso della trazione.

Nel caso di aste compresse, occorre per contro verificarne la stabilità, in quanto sottoposte al fenomeno dell'instabilità dell'equilibrio che può provocarne uno sbandamento laterale. La verifica è soddisfatta in funzione della condizione data dalla relazione [3.32]. Per la determinazione del coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità ($k_{\text{crit},c}$) si è definita una snellezza relativa di colonna $\lambda_{\text{rel},c}$, fornita dalla [3.33] e pari a:

$$\lambda_{\text{rel},c} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{107,66}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{17}{5400}} = 1,92$$

che, tramite la [3.34] ha portato alla definizione:

$$k_{crit,c} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} = \frac{1}{2,51 + \sqrt{2,51^2 - 1,92^2}} = 0,24$$

dove k è stato definito tramite le [3.35] e il coefficiente di imperfezione β_c è stato assunto pari a 0,2. La verifica di stabilità agli SLU per lo sforzo di compressione risulta:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{lorda}} = \frac{65,20 \cdot 10^3}{4,25 \cdot 10^4} = 1,53 \text{MPa} < 2,45 \text{MPa} = \frac{0,9 \cdot 17}{1,5} \cdot 0,24 = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \cdot k_{crit,c} = f_{c,0,d} \cdot k_{crit,c}$$

che porta a considerare la verifica come soddisfatta.

Presso-flessione parallela alle fibre (asta 9)

La verifica a presso-flessione è stata condotta per il puntone laterale est, riferendosi alle capriate A11 e A12, i cui elementi sono stati classificati di categoria III ed hanno mostrato essere soggetti agli sforzi di compressione e flessione maggiori ($N_d = -83,10 \text{ kN}$; $M_d = 16,38 \text{ kN} \cdot \text{m}$). Riferendosi ad una classe di resistenza C16 la verifica è positiva se risultano soddisfatte entrambe le seguenti relazioni:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [6.3]$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad [6.4]$$

rispettivamente pari a ($0,83 < 1$) e ($0,59 < 1$) e quindi soddisfacenti la verifica.

Compressione inclinata rispetto alle fibre (asta 1)

La verifica degli sforzi di compressione in direzione inclinata rispetto alla fibratura si manifesta in prossimità dei nodi dove vi è il collegamento tra elementi incidenti. Nel caso della catena (asta 1) è da valutarsi lo sforzo di compressione inclinato indotto dal puntone (asta 2) in corrispondenza del collegamento tra i due elementi (nodo 1). Ricorrendo alla formulazione [3.39] proposta da Hankinson (1921) è determinabile la resistenza caratteristica $f_{c,\alpha,k}$ per la compressione con un angolo α rispetto alla fibratura. Considerando un elemento di categoria III (classe C16) ed un angolo di inclinazione $\alpha = 25^\circ$, ricorrendo alla [3.38] la verifica è pari:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_\alpha}{A} = \frac{83,02 \cdot 10^3}{5,94 \cdot 10^4} = 1,39 < 4,63 = \frac{0,9 \cdot 7,72}{1,5} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,\alpha,k}}{\gamma_M} = f_{c,\alpha,d}$$

dove N_α è lo sforzo normale derivante dal puntone ed A la sezione dove insiste la tensione di compressione, che conducono ad un esito positivo della verifica. Il collegamento a dente semplice sarà verificato nello specifico paragrafo dedicato (§ 6.4 Verifiche dei collegamenti).

6.3.1.3 Verifiche a taglio

La verifica della sollecitazione tagliante avviene nella sezione della trave in cui il suo valore è massimo. Per le 'Capriate Tipo A-C' i valori massimi si sono riscontrati essere agenti in corrispondenza degli appoggi intermedi per la catena (nodi 5 e 7) e del collegamento tra il puntone ed il monaco (nodi 3 e 8). Per quest'ultima connessione la verifica assume particolare rilievo anche in conseguenza del fatto che il puntone presenta un intaglio come rilevato in fase di rilievo geometrico.

Taglio su sezione intermedia (asta 1)

Le ispezioni eseguite per le catene in prossimità degli appoggi intermedi hanno rilevato un livello di danno lieve ($P_r/P_t=0,95$). Non essendo possibile una classificazione completa dell'elemento, la verifica viene condotta considerando, cautelativamente, una categoria II pari ad una classe di resistenza C20. La presenza di eventuali fessurazioni da ritiro obbliga a considerare una riduzione della larghezza trasversale secondo la relazione [3.45]:

$$b_{ef} = k_{ef} \cdot b = 0,556 \cdot 220 = 122,32 \text{ mm}$$

dove b è la larghezza reale della sezione e k_{ef} un coefficiente di fessurazione da porsi pari a $2/f_{v,k}$.

Sul nodo 5 agisce una sollecitazione tagliante pari a $V_d = 6,63 \text{ kN}$ per la quale la tensione tangenziale, determinata tramite la legge di variabilità di Jourawski, risulta essere pari a:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} = 1,5 \cdot \frac{6,63 \cdot 10^3}{122,32 \cdot 270} = 0,30 \text{ MPa}$$

Per la verifica a taglio deve essere soddisfatta la condizione definita dalla relazione [3.44]:

$$\tau_d = 0,30 \text{ MPa} < 2,16 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 3,6}{1,5} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = f_{v,d}$$

che risulta essere verificata per la catena in considerazione dei soli difetti di categoria.

Taglio su sezione con intaglio (asta 2)

Si conduce la verifica con riferimento ad un elemento di categoria III (classe C16) che presenti lesioni da ritiro non trascurabili. Il dente di collegamento con il monaco (asta 4), impone che l'altezza effettiva del puntone da considerarsi per la verifica sia quella decurtata della dimensione dell'intaglio (Fig. 6.5). La presenza di fessurazioni da ritiro obbliga a considerare invece una riduzione della larghezza trasversale secondo la relazione [3.45]:

$$b_{ef} = k_{ef} \cdot b = 0,625 \cdot 220 = 137,5 \text{ mm}$$

dove b è la larghezza reale della sezione e k_{ef} un coefficiente di fessurazione da porsi pari a $2/f_{v,k}$.

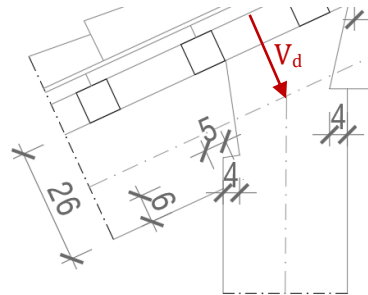


Fig. 6.5: Rilievo geometrico del nodo 3 della 'Capriata Tipo A-C'.

Sul nodo 3 agisce una sollecitazione tagliante pari a $V_d = 14,47$ kN per la quale la tensione tangenziale, determinata tramite la legge di variabilità di Jourawski, risulta essere pari a:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} = 1,5 \cdot \frac{14,47 \cdot 10^3}{137,5 \cdot (260 - 60)} = 0,79 \text{ MPa}$$

Per la verifica a taglio deve essere soddisfatta la condizione definita dalla relazione [3.44] che, in presenza di sezioni con intagli, diviene pari alla relazione [3.56] che porta ad ottenere:

$$\tau_d = 0,79 \text{ MPa} < 0,96 \text{ MPa} = \frac{0,8 \cdot 3,2}{1,5} \cdot 0,563 = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} \cdot k_v = f_{v,d} \cdot k_v$$

che risulta essere verificata per il puntone in considerazione dei soli difetti di categoria.

Taglio su sezione ammalorata (asta 2 – capriata C10)

Le Norme Tecniche impongono che la verifica degli elementi lignei esistenti sia effettuata in relazione alla 'sezione effettiva' resistente, ovvero alla sezione che, a seguito di indagini strumentali, si sia rilevata come sana, decurtata dell'aliquota soggetta a degrado. A titolo esemplificativo, si conduce la verifica a taglio per il puntone (asta 2) della capriata C10, classificato secondo la resistenza in categoria I (classe C24) ma per il quale l'ispezione visiva ha rilevato una forte umidità ($U=20,4\%$) in prossimità del collegamento con la catena (nodo 1) e la cui testa è apparsa carinata (Fig. 6.6).



Fig. 6.6: Rilievo fotografico della testa del puntone della Capriata C10.

L'indagine con trapano resistografico eseguita (RH.233) ha confermato il degrado biologico e rilevato un livello di danno moderato ($P_r/P_t=0,69$) con conseguente riduzione della sezione effettiva trasversale pari a $P_r=149$ mm. La presenza di fessurazioni da ritiro obbliga a considerare un'ulteriore riduzione della larghezza trasversale secondo la relazione [3.45]:

$$b_{ef} = k_{ef} \cdot b = 0,500 \cdot 149 = 74,5 \text{ mm}$$

dove b è la larghezza della sezione definita dalla prova RH.233 e k_{ef} un coefficiente di fessurazione da porsi pari a $2/f_{v,k}$. Sul nodo 1 agisce una sollecitazione tagliante pari a $V_d = 10,76$ kN per la quale la tensione tangenziale, determinata tramite la legge di variabilità di Jourawski, risulta essere pari a:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} = 1,5 \cdot \frac{10,76 \cdot 10^3}{74,5 \cdot 280} = 0,77 \text{ MPa}$$

Per la verifica a taglio deve essere soddisfatta la condizione definita dalla relazione [3.44]:

$$\tau_d = 0,77 \text{ MPa} < 2,13 \text{ MPa} = \frac{0,8 \cdot 4}{1,5} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = f_{v,d}$$

che risulta essere verificata per il puntone in considerazione dei difetti e del degrado rilevati.

6.3.2 Verifiche per la 'Capriata Tipo B'

Per tale tipologia di capriata le verifiche eseguite hanno interessato gli elementi lignei principali in termini di sforzi di trazione o compressione ma anche di flessione e stabilità, sulla base dei valori di sollecitazione ricavati in fase di analisi statica lineare nella condizione di carico più rilevante. In funzione dei difetti e delle anomalie rilevate, la verifica assume rilevanza grazie alla correlazione tra la classificazione secondo la resistenza dettata dalla norma UNI 11119:2004 ed i valori caratteristici del legno adottati.

6.3.2.1 Verifiche a trazione

La sollecitazione di trazione interessa principalmente la catena (asta 1), per la quale si manifesta nella forma di trazione parallela alla fibratura in prossimità degli appoggi e di tensoflessione nella porzione centrale, a seguito del gravare sulla stessa del sistema di sospensione del controsoffitto affrescato del salone da ballo sottostante la 'Zona B'. L'assenza delle saette induce per i monaci uno sforzo di trazione oltre tre volte minore di quello registrato per i medesimi elementi delle 'Capriate Tipo A-C'.

Trazione parallela alle fibre (asta 1)

La verifica a trazione parallela alle fibre in prossimità degli appoggi è da eseguirsi tenendo conto della riduzione di sezione dovuta all'intaglio della stessa catena per la realizzazione del collegamento a dente arretrato con il puntone (aste 2 e 5), pari a circa 5 cm. Considerando un elemento ligneo con una classe di resistenza C18 (cat. III) si ottiene, tramite la [3.28]:

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_d}{A_{netta}} = \frac{101,94 \cdot 10^3}{5,98 \cdot 10^4} = 1,70 \text{MPa} < 6,00 \text{MPa} = \frac{0,9 \cdot 10,0}{1,5} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} = f_{t,0,d}$$

dove: $A_{netta} = (280 - 50) \cdot 260 = 5,98 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$.

Tenso-flessione parallela alle fibre (asta 1)

Nella condizione di tenso-flessione è necessario considerare, oltre allo sforzo di trazione, anche la sollecitazione di flessione dovuta al momento flettente ($M_d = 108,26 \text{ kN} \cdot \text{m}$) e verificare che siano soddisfatte entrambe le condizioni imposte dalle relazioni [6.1] e [6.2], rispettivamente pari a ($2,77 > 1$) e ($1,99 > 1$) e quindi non soddisfacenti la verifica.

6.3.2.2 Verifiche a compressione

Le verifiche a compressione eseguite considerano sia la condizione di compressione parallela che inclinata rispetto alla fibratura. A causa della possibile instabilità si è eseguita anche la specifica verifica legata al carico critico di punta oltre che la verifica a presso-flessione per gli elementi soggetti anche alla sollecitazione flettente, come nel caso dei puntoni (aste 2, 5, 6, 8). Per la catena (asta 1) si è eseguita anche la verifica a compressione ortogonale alle fibre visto il gravare delle travi di ripartizione a sostegno del sistema di sospensione dell'affresco sottostante.

Compressione parallela alle fibre (asta 7)

La sollecitazione di compressione pura parallela alla fibratura interessa la controcattena (asta 7) che è risultata soggetta ad uno sforzo pari a $N_d = -98,59 \text{ kN}$. Considerando un elemento di classe C18 (cat. III) come riscontrato per alcune capriate, la verifica secondo la [3.31] risulta:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{lorda}} = \frac{98,59 \cdot 10^3}{6,52 \cdot 10^4} = 1,51 \text{MPa} < 10,80 \text{MPa} = \frac{0,9 \cdot 18}{1,5} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} = f_{c,0,d}$$

dove $A_{lorda} = 225 \cdot 290 = 6,52 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$ senza tenere conto delle riduzioni della sezione, in quanto gli intagli hanno un effetto molto meno sfavorevole rispetto al caso della trazione.

Nel caso di aste compresse, occorre per contro verificarne la stabilità, in quanto sottoposte al fenomeno dell'instabilità dell'equilibrio che può provocarne uno sbandamento laterale.

La verifica è soddisfatta in funzione della condizione data dalla relazione [3.32]. Per la determinazione del coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità ($k_{crit,c}$) si è definita una snellezza relativa di colonna $\lambda_{rel,c}$, fornita dalla [3.33] e pari a:

$$\lambda_{rel,c} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{65,70}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{18}{6000}} = 1,15$$

che, tramite la [3.34] ha portato alla definizione:

$$k_{crit,c} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} = \frac{1}{1,24 + \sqrt{1,24^2 - 1,15^2}} = 0,58$$

dove k è stato definito tramite le [3.35] e il coefficiente di imperfezione β_c è stato assunto pari a 0,2. La verifica di stabilità agli SLU per lo sforzo di compressione risulta:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{lorda}} = \frac{98,59 \cdot 10^3}{6,53 \cdot 10^4} = 1,51 \text{ MPa} < 6,26 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 18}{1,5} \cdot 0,58 = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \cdot k_{crit,c} = f_{c,0,d} \cdot k_{crit,c}$$

che porta a considerare la verifica come positiva.

Presso-flessione parallela alle fibre (asta 2)

La verifica a presso-flessione è stata condotta per il puntone laterale est, riferendosi alle capriate B7 e B8, i cui elementi sono stati classificati di categoria III ed hanno mostrato essere soggetti agli sforzi di compressione e flessione maggiori ($N_d = -119,92 \text{ kN}$; $M_d = 21,64 \text{ kN} \cdot \text{m}$). Riferendosi ad una classe di resistenza C18 la verifica è positiva se risultano soddisfatte entrambe le relazioni [6.3] e [6.4] rispettivamente pari a ($0,75 < 1$) e ($0,53 < 1$) e quindi soddisfacenti la verifica.

Nel caso di aste compresse, occorre per contro verificarne la stabilità, in quanto sottoposte al fenomeno dell'instabilità dell'equilibrio che può provocarne uno sbandamento laterale. Il momento flettente sul puntone subisce un'inversione in corrispondenza del collegamento con il monaco (nodo 2), pertanto la lunghezza libera di inflessione da considerare è fra due punti di nullo del momento; a favore di sicurezza si è considerata l'intera lunghezza dell'asta, nella condizione di trave doppiamente appoggiata, per la quale la lunghezza libera di inflessione l_0 è pari ad l .

La verifica è soddisfatta in funzione della condizione data dalla relazione [3.32]. Per la determinazione del coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità ($k_{crit,c}$) si è definita una snellezza relativa di colonna $\lambda_{rel,c}$, fornita dalla [3.33] e pari a:

$$\lambda_{rel,c} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{61,58}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{18}{6000}} = 1,07$$

che, tramite la [3.34] ha portato alla definizione:

$$k_{crit,c} = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel,c}^2}} = \frac{1}{1,15 + \sqrt{1,15^2 - 1,07^2}} = 0,63$$

dove k è stato definito tramite le [3.35] e il coefficiente di imperfezione β_c è stato assunto pari a 0,2. La verifica di stabilità agli SLU per lo sforzo di compressione risulta:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{lorda}} = \frac{119,92 \cdot 10^3}{6,21 \cdot 10^4} = 1,93 \text{ MPa} < 6,80 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 18}{1,5} \cdot 0,63 = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,0,k}}{\gamma_M} \cdot k_{crit,c} = f_{c,0,d} \cdot k_{crit,c}$$

che porta a considerare la verifica come positiva.

Compressione inclinata rispetto alle fibre (asta 1)

La verifica degli sforzi di compressione in direzione inclinata rispetto alla fibratura si manifesta in prossimità dei nodi dove vi è il collegamento tra elementi incidenti. Nel caso della catena (asta 1) è da valutarsi lo sforzo di compressione inclinato indotto dal puntone (asta 2) in corrispondenza del collegamento tra i due elementi (nodo 1). Ricorrendo alla formulazione [3.39] proposta da Hankinson (1921) è determinabile la resistenza caratteristica $f_{c,\alpha,k}$ per la compressione con un angolo α rispetto alla fibratura. Considerando un elemento di categoria III (classe C18) ed un angolo di inclinazione $\alpha = 26^\circ$, ricorrendo alla [3.38] la verifica è pari:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_\alpha}{A} = \frac{119,92,02 \cdot 10^3}{7,28 \cdot 10^4} = 1,65 < 4,54 = \frac{0,9 \cdot 7,56}{1,5} = \frac{k_{mod} \cdot f_{c,\alpha,k}}{\gamma_M} = f_{c,\alpha,d}$$

dove N_α è lo sforzo normale derivante dal puntone ed A la sezione dove insiste la tensione di compressione, che conducono ad un esito positivo della verifica. Il collegamento a dente arretrato sarà verificato nello specifico paragrafo dedicato (§ 6.4 Verifiche dei collegamenti).

Compressione perpendicolare rispetto alle fibre (asta 1)

Tale sollecitazione è agente sulla catena ed è dovuta alla presenza delle travi di ripartizione a supporto del carico del controsoffitto ligneo affrescato del salone da ballo sottostante la 'Zona B'. Dall'analisi dei carichi, il carico gravante sulle catene è risultato essere pari a $G'_{2,B \perp} = 3,59 \text{ kN/m}$ che, associato alle 8 travi di ripartizione distribuite lungo la lunghezza dell'asta principale, porta ad ottenere una forza di compressione esterna $F_{90,d} = 6,35 \text{ kN}$ agente ortogonalmente alla fibratura per una lunghezza l_{eff} pari alla larghezza della trave di ripartizione.

La verifica della catena si basa sulla resistenza a compressione ortogonale che per un elemento di categoria III (classe C16) è pari a $f_{c,90,k} = 2,2$ MPa. Applicando la relazione [3.36]:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{b \cdot l_{\text{eff}}} = \frac{6,35 \cdot 10^3}{260 \cdot 150} = 0,16 \text{ MPa} < 1,35 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 2,2}{1,5} \cdot 1 = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \cdot k_{c,90} = f_{c,90,d} \cdot k_{c,90}$$

dove $k_{c,90}$ è un coefficiente che tiene conto della configurazione del carico, della possibilità di rottura per spacco, nonché di un certo grado di deformazione di compressione, assunto pari ad 1.

La resistenza a compressione ortogonale alla fibra è dunque verificata.

Compressione perpendicolare rispetto alle fibre (asta7)

Tale sollecitazione è agente sulla controcatena (asta 7) ed è dovuta alla particolare connessione con il puntone superiore (nodo 2) il cui sforzo normale di compressione incide sulla controcatena tramite le forze di contatto dovute alla sua componente ortogonale (Fig. 6.7).

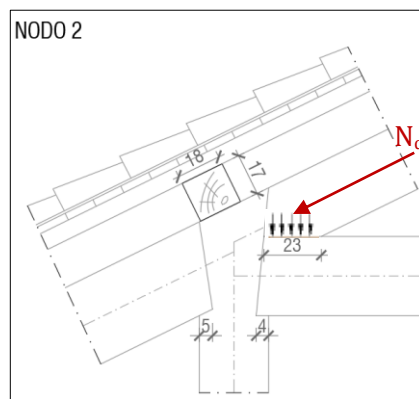


Fig. 6.7: Rilievo geometrico del nodo 2 della 'Capriata Tipo B'.

Dall'analisi dei parametri della sollecitazione, lo sforzo normale sul puntone superiore è risultato essere pari a $N_d = -16,88$ kN; dal quale la forza di contatto complessiva risulta:

$$F_{c,90,d} = N_d \cdot \sin \alpha = 16,88 \cdot \sin 26^\circ = 7,40 \text{ kN}$$

La verifica della controcatena si basa sulla resistenza a compressione ortogonale che per un elemento di categoria III (classe C16) è pari a $f_{c,90,k} = 2,2$ MPa. Applicando la relazione [3.36]:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{90,d}}{b \cdot l_{\text{eff}}} = \frac{7,40 \cdot 10^3}{220 \cdot 230} = 0,14 \text{ MPa} < 1,35 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 2,2}{1,5} \cdot 1 = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} \cdot k_{c,90} = f_{c,90,d} \cdot k_{c,90}$$

dove $k_{c,90}$ è un coefficiente che tiene conto della configurazione del carico, della possibilità di rottura per spacco, nonché di un certo grado di deformazione di compressione, assunto pari ad 1.

La resistenza a compressione ortogonale alla fibra è dunque verificata.

6.3.2.3 Verifiche a taglio

La verifica della sollecitazione tagliante avviene nella sezione della trave in cui il suo valore è massimo. Per le 'Capriate Tipo B' i valori massimi si sono riscontrati essere agenti in corrispondenza degli appoggi sulle murature d'ambito per la catena (nodi 1 e 8) e del collegamento tra il puntone ed il monaco (nodi 2 e 7).

Taglio su sezione ammalorata all'appoggio sulla muratura (asta 1)

Le indagini eseguite per le catene in prossimità degli appoggi hanno rilevato un livello di danno grave ($P_r/P_t=0,49$) per la catena della capriata B8, come confermato dalla specifica prova resistografica (RH.177). La conseguente riduzione della sezione effettiva trasversale è risultata pari a $P_r=141$ mm. Inoltre, la classificazione dell'elemento a seguito dell'ispezione visiva ha definito una categoria III — pari ad una classe di resistenza C18 — vista la presenza di fessurazioni da ritiro profonde che obbligano a considerare un'ulteriore riduzione della larghezza trasversale secondo la relazione [3.45]:

$$b_{ef} = k_{ef} \cdot b = 0,588 \cdot 141 = 82,91 \text{ mm}$$

dove b è la larghezza della sezione definita dalla prova RH.177 e k_{ef} un coefficiente di fessurazione da porsi pari a $2/f_{v,k}$. Il dente di collegamento con il puntone (asta 2), impone che l'altezza effettiva della catena da considerarsi per la verifica sia quella decurtata della dimensione dell'intaglio, pari a circa 50 mm:

$$h_{ef} = h - i = 300 - 50 = 250 \text{ mm}$$

Sul nodo 1 agisce una sollecitazione tagliante pari a $V_d = 30,06$ kN per la quale la tensione tangenziale, determinata tramite la legge di variabilità di Jourawski, risulta essere pari a:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} = 1,5 \cdot \frac{30,06 \cdot 10^3}{82,91 \cdot 250} = 2,17 \text{ MPa}$$

Per la verifica a taglio deve essere soddisfatta la condizione definita dalla relazione [3.44]:

$$\tau_d = 2,17 \text{ MPa} > 2,04 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 3,4}{1,5} = \frac{k_{mod} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = f_{v,d}$$

che risulta non essere verificata per la catena della capriata B8 in considerazione dei difetti e del degrado rilevati in sito, a conferma di come sia necessario affiancare prove di indagine di II livello all'ispezione visiva, la quale aveva sottostimato la gravità del degrado biologico. La verifica del collegamento del medesimo nodo sarà eseguita al paragrafo dedicato (§ 6.4).

Taglio su sezione intermedia (asta 2)

Si conduce la verifica con riferimento al puntone (asta 2) della capriata B7, la cui ispezione visiva ha classificato l'elemento come di categoria III (classe C18) vista la presenza di lesioni da ritiro profonde fino a 10 cm che obbligano a considerare una riduzione della larghezza trasversale secondo la relazione [3.45]:

$$b_{ef} = k_{ef} \cdot b = 0,588 \cdot 230 = 135,24 \text{ mm}$$

dove b è la larghezza reale della sezione e k_{ef} un coefficiente di fessurazione da porsi pari a $2/f_{v,k}$.

Sul nodo 2 agisce una sollecitazione tagliante pari a $V_d = 23,78 \text{ kN}$ per la quale la tensione tangenziale, determinata tramite la legge di variabilità di Jourawski, risulta essere pari a:

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} = 1,5 \cdot \frac{23,78 \cdot 10^3}{135,4 \cdot 280} = 0,94 \text{ MPa}$$

Per la verifica a taglio deve essere soddisfatta la relazione [3.44] che porta ad ottenere:

$$\tau_d = 0,94 \text{ MPa} < 2,04 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 3,4}{1,5} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = f_{v,d}$$

che risulta essere verificata per il puntone in considerazione dei difetti di categoria.

6.4 Verifiche dei collegamenti

Le connessioni di carpenteria (§ 2.3) rivestono un ruolo molto importante nella definizione dell'insieme strutturale poiché hanno il compito di trasferire le sollecitazioni da un elemento all'altro. Le unioni tradizionali appartenenti al costruito storico esistente — definite anche come nodi di carpenteria — sono caratterizzate dalla trasmissione degli sforzi per contatto delle superfici di legno, garantito dalle lavorazioni manuali ad ascia delle maestranze.

Per le capriate appartenenti alla copertura del corpo centrale di Villa Pisani si è provveduto ad eseguire le verifiche sia in termini dimensionali che di tensione, riferendosi per queste ultime in particolare ai nodi che abbiano riscontrato delle riduzioni di sezione efficace a seguito delle indagini strumentali eseguite.

6.4.1 Verifiche dimensionali

A seguito del rilievo geometrico si è provveduto ad eseguire l'analisi della geometria dei principali nodi di carpenteria rilevati, verificando le dimensioni di intagli e dentature secondo i limiti imposti dalle istruzioni redatte dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, riferendosi al documento normativo CNR DT 206-R1/2018.

6.4.1.1 'Capriate Tipo A-C'

La verifica ha interessato i nodi delle unioni a dente semplice, in particolare il controllo dimensionale della profondità di intaglio t_v secondo la relazione [3.46]. Per il collegamento catena-puntone (nodi 1 e 10) il rilievo geometrico è stato effettuato a campione nelle porzioni ispezionate per le quali è avvenuta la rimozione del rivestimento di calpestio (Fig. 6.8-a).

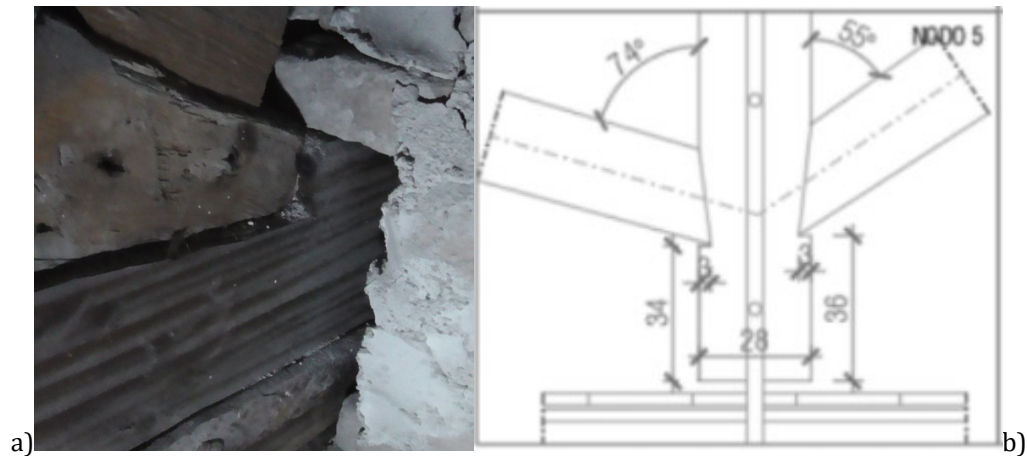


Fig. 6.8: Rilievo fotografico del nodo 1 (a) e rilievo geometrico del nodo 5 (b) delle 'Capriate Tipo A-C'.

L'intaglio è risultato pari a circa 50 mm. In funzione dell'angolo di inclinazione della copertura, pari ad $\alpha = 25^\circ$, la verifica dimensionale è risultata soddisfatta in considerazione dell'altezza media della catena (asta 1) delle 'Capriate Tipo A-C'. Applicando la [3.46] si ottiene:

$$t_v = 50 \text{ mm} < 75 \text{ mm} = \frac{300}{4} = \frac{h}{4}$$

La medesima verifica è stata condotta anche per il nodo a dente arretrato relativo al collegamento controcatena-puntone (nodi 3 e 8), il cui intaglio è risultato essere pari in media a 40 mm. In considerazione dell'altezza media della controcatena (asta 10) delle 'Capriate Tipo A-C':

$$t_v = 40 \text{ mm} < 62,5 \text{ mm} = \frac{250}{4} = \frac{h}{4}$$

da cui si evince come la verifica dimensionale sia ancora soddisfatta.

Per il collegamento a dente semplice tra monaco e saette (nodi 5 e 7), di tipo non simmetrico (Fig. 6.8-b), vista l'inclinazione $\alpha=55^\circ$ dell'angolo tra il monaco (asta 4 o 7) e la saetta sostenente il puntone (asta 3 o 8) compresa nell'intervallo di verifica dettato dalla norma, si è provveduto alla definizione dello specifico coefficiente di riduzione dell'altezza intagliata tramite interpolazione, come specificato nello stesso documento normativo (CNR DT 206-R1/2018).

Tab. 6.2: Verifica dimensionale del collegamento monaco-saette (nodo 5) delle 'Capriate Tipo A-C'.

Capriata	Nodo 5 (Aste 3-4)					Nodo 5 (Aste 4-5)				
	$\alpha = 74^\circ$			CNR DT 206:2018		$\alpha = 55^\circ$			CNR DT 206:2018	
Tipo	t_v	h	t_c	$h/6$	$t_v < h/6$	t_v	h	t_c	$h/5$	$t_v < h/5$
[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[-]	[cm]	[cm]	[cm]	[-]	[-]
A1	3,00	28,00	25,50	4,67	OK	2,00	28,00	26,00	5,60	OK
A2	5,50	30,00	34,00	5,00	NO	4,00	30,00	36,00	6,00	OK
A3	3,00	28,00	27,00	4,67	OK	4,00	28,00	28,50	5,60	OK
A4	5,00	28,00	25,00	4,67	NO	4,50	28,00	27,00	5,60	OK
A5	3,50	27,00	27,50	4,50	OK	4,00	27,00	27,50	5,40	OK
A6	4,00	27,50	28,00	4,58	OK	3,50	27,50	28,00	5,50	OK
A7	5,00	28,00	27,00	4,67	NO	4,00	28,00	33,00	5,60	OK
A8	4,00	25,50	26,50	4,25	OK	3,00	25,50	27,00	5,10	OK
A9	3,00	25,00	25,75	4,17	OK	3,00	25,00	26,50	5,00	OK
A10	4,50	28,00	27,00	4,67	OK	4,00	28,00	27,00	5,60	OK
A11	4,00	27,00	29,00	4,50	OK	3,50	27,00	26,50	5,40	OK
A12	2,50	27,00	27,00	4,50	OK	3,50	27,00	28,50	5,40	OK
C1	6,00	30,00	25,50	5,00	NO	4,00	30,00	28,5	6,00	OK
C2	5,00	29,00	31,00	4,83	NO	4,00	29,00	30,00	5,80	OK
C3	4,00	27,50	27,00	4,58	OK	4,00	27,50	28,50	5,50	OK
C4	4,00	28,00	25,00	4,67	OK	3,50	28,00	27,00	5,60	OK
C5	4,00	26,00	27,50	4,33	OK	4,00	26,00	27,50	5,20	OK
C6	5,00	29,50	28,00	4,92	NO	4,00	29,50	28,50	5,90	OK
C7	3,50	26,50	27,00	4,42	OK	1,50	26,50	25,75	5,30	OK
C8	4,00	26,00	26,50	4,33	OK	2,50	26,00	27,00	5,20	OK
C9	5,00	27,50	25,75	4,58	NO	2,50	27,50	26,50	5,50	OK
C10	4,50	29,50	28,75	4,92	OK	4,00	29,50	28,00	5,90	OK
C11	5,00	26,00	25,50	4,33	NO	4,00	26,00	27,00	5,20	OK

La verifica è stata condotta per tutte le 23 capriate riferendosi al nodo 5, avendo avuto modo di rilevare sistematicamente per ogni capriata le dimensioni del collegamento. Il successivo confronto tabellare (Tab. 6.2) ha consentito di osservare come la verifica dimensionale sia risultata soddisfatta per tutte le connessioni a dente semplice relative al monaco con la saetta sostenente la controcattena (aste 4-5) a differenza delle connessioni tra lo stesso monaco e la saetta sostenente i puntoni laterali (aste 3-4), per le quali la profondità di intaglio è risultata maggiore di $h/6$. Per la valutazione di tale risultato va comunque tenuto in considerazione che le connessioni analizzate sono risalenti all'epoca del XVIII secolo e sono state realizzate con lavorazioni ad ascia. La modalità di esecuzione del collegamento monaco-saette appare più simile allo schema definito dalla recente norma del CNR che alle rappresentazioni rinvenibili nella trattatistica, ad esempio nel Mazzocchi (1871).

6.4.1.2 'Capriate Tipo B'

Si è dapprima eseguita la verifica delle connessioni a dente arretrato del collegamento catena-puntone, per il quale il rilievo in sito ha fornito una misura di intaglio di 50 mm (Fig. 6.9).



Fig. 6.9: Rilievo geometrico e fotografico del nodo 1 della Capriata B7.

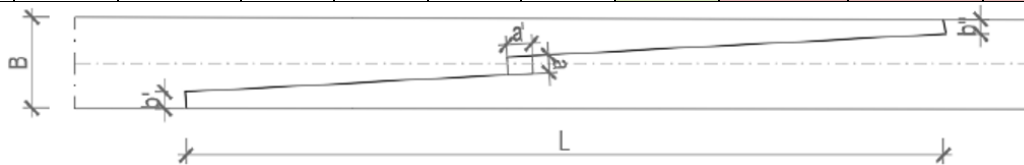
In funzione dell'angolo di inclinazione della copertura, pari ad $\alpha=26^\circ$, la verifica dimensionale è risultata soddisfatta in considerazione dell'altezza media della catena (asta 1) delle capriate:

$$t_v = 50 \text{ mm} < 75 \text{ mm} = \frac{300}{4} = \frac{h}{4}$$

Successiva è stata la verifica dimensionale del giunto a 'dardo di Giove' rilevato per le connessioni intermedie della catena (asta 1), il cui confronto tabellare (Tab. 6.3) ha mostrato come l'unica dimensione accettabile dalla norma odierna sia la lunghezza L e come invece la bietta appaia sottodimensionata, seppur di pochi centimetri.

Tab. 6.3: Verifica dimensionale del collegamento a 'dardo di Giove' delle catene delle 'Capriate Tipo B'.

UNIONE A DARDO DI GIOVE (Asta 1)											
Elementi rilevati							Verifica (CNR-DT206:2018)				
Cap. [#]	B [cm]	L [cm]	b' [cm]	b'' [cm]	a [cm]	a' [cm]	L>3B [-]	b'>B/5 [-]	b''>B/5 [-]	a'>1,5a [-]	
B1	24,00	221,00	5,00	4,00	5,20	6,90	72,00	4,80	4,80	7,80	
B2	24,00	222,00	4,70	3,50	4,50	7,10	72,00	4,80	4,80	6,75	
B3	26,50	219,00	5,30	4,10	5,00	7,50	79,50	5,30	5,30	7,50	
B4	27,50	220,00	4,50	3,90	4,80	7,20	82,50	5,50	5,50	7,20	
B5	27,50	225,00	5,20	4,20	5,10	6,80	82,50	5,50	5,50	7,65	
B6	26,50	218,50	5,10	4,00	5,00	6,70	79,50	5,30	5,30	7,50	
B7	25,50	220,75	4,90	3,80	5,20	6,80	76,50	5,10	5,10	7,80	
B8	26,00	221,50	5,00	4,20	4,90	7,10	78,00	5,20	5,20	7,35	



6.4.2 Verifiche tensionali

Le verifiche dei collegamenti dal punto di vista tensionale si sono eseguite per i nodi di carpenteria che abbiano mostrato particolari criticità e un danno di livello moderato o grave a seguito delle indagini strumentali con trapano resistografico. Per gli stessi si è resa possibile la considerazione di una sezione resistente effettiva in funzione della stima dedotta dall'interpretazione delle prove resistografiche e dei relativi diagrammi densimetrici riportati in appendice. A titolo esemplificativo è stata condotta anche la verifica delle tensioni agenti sull'unione a 'dardo di Giove' che interessa le capriate della 'Zona B'.

Si riportano, a seguire, le principali verifiche condotte per le capriate indagate, suddivise in funzione della tipologia di connessione e riassunte in forma tabellare con le indicazioni riepilogative.

6.4.2.1 Unioni a dente semplice

Tale tipologia di connessione è stata rilevata per il collegamento catena-puntone delle 'Capriate Tipo A-C' il cui rilievo geometrico — eseguito a campione sui nodi ispezionati — ha consentito la definizione delle misure e la restituzione del dettaglio in formato CAD (Fig. 6.11).

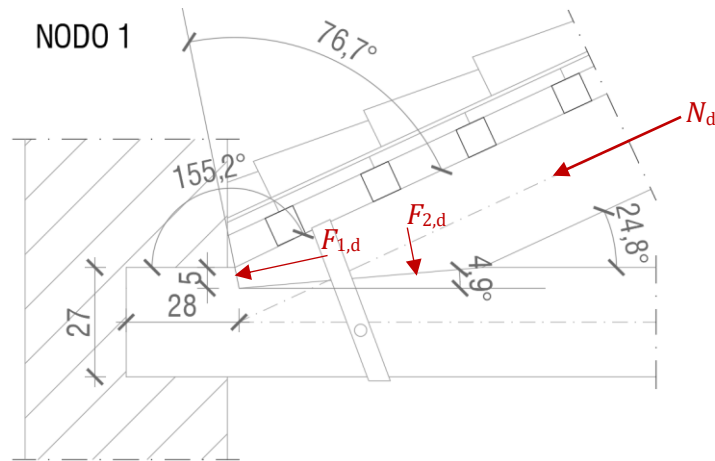


Fig. 6.11: Restituzione CAD dell'unione a dente semplice della 'Capriata Tipo A-C'.

In generale, lo sforzo di compressione N_d derivante dal puntone è scomponibile nelle componenti $F_{1,d}$ e $F_{2,d}$ indicate nelle istruzioni normative, risultanti pari a:

$$F_{1,d} = N_d \cdot \left[\cos \frac{\alpha}{2} - \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2} \cdot \left(\tan \frac{\alpha}{2} - \beta \right) \right] < N_d \cdot \cos \frac{\alpha}{2} \quad [6.5]$$

$$F_{2,d} = N_d \cdot \frac{\operatorname{sen}(\alpha/2)}{\cos(\alpha/2 - \beta)} \quad [6.6]$$

che per il caso in esame, in considerazione di uno sforzo normale pari a $N_d = -83,02$ kN, risultano rispettivamente pari a $F_{1,d} = 75$ kN e $F_{2,d} = 18$ kN.

Le specifiche verifiche nelle zone di crisi dell'unione sono da condursi secondo le relazioni [3.47], [3.48] e [3.49] dove per la connessione in esame la lunghezza del tallone è stimata in $t_c = 280$ mm, supponendo la catena in appoggio fino alla mezzeria della muratura d'ambito. La profondità di intaglio si è assunta in media pari a $t_p = 50$ mm e la lunghezza della zona compressa pari a $d = 153$ mm come da indicazione normativa data dalla relazione [3.50]. La larghezza della sezione trasversale b è stata invece definita in funzione della sezione resistente efficace stimata tramite le singole prove strumentali eseguite nei nodi delle capriate ammalorate. Vista l'impossibilità di eseguire delle indagini con la punta del trapano resistografico sempre perpendicolare all'elemento indagato, il valore della penetrazione resistente fornita dallo strumento (P_r) è stato scomposto lungo la direzione ortogonale, in funzione degli angoli di esecuzione della prova (Fig. 6.12), imposti dal limitato spazio dell'ambiente del sottotetto.

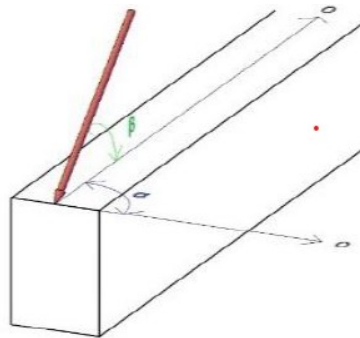


Fig. 6.12: Schema esplicativo degli angoli di esecuzione della prova resistografica (Fonte: Expin Srl).

Le verifiche eseguite per le unioni a dente semplice delle capriate indagate sono riportate in forma tabellare (Tab. 6.4) e mostrano come il danno incida notevolmente sull'esito finale se confrontate con un'unione tipo, non ammalorata, supposta cautelativamente con elementi di categoria III.

Tab. 6.4: Riepilogo delle verifiche tensionali eseguite per le unioni a dente semplice delle capriate indagate.

Dati Capriata				Dati Prova						Verifica Unione			
Tipo [-]	Nodo [#]	B _c [mm]	H _p [mm]	RIF. [RH.#]	α [°]	β [°]	P _t [mm]	P _r [mm]	P _r /P _t [-]	b [mm]	V _{t_c} [-]	C _{t_v} [-]	C _d [-]
A-C	1	210	240	-	-	-	-	210	-	210	0,96<1	0,94<1	0,45<1
A1	10	210	250	013	45°	0°	236	165	0,70	117	1,91>1	1,68>1	0,78<1
A3	1	220	240	017	45°	0°	251	184	0,73	130	1,72>1	1,52>1	0,73<1
A7	10	220	285	006	45°	45°	195	105	0,54	74	3,03>1	2,66>1	1,09>1
C6	1	240	275	186	45°	0°	153	23,0	0,15	16	14,01>1	12,32>1	5,24>1
C9	1	230	280	185	45°	0°	245	145	0,59	103	2,17>1	1,91>1	0,79<1
C10	1	215	270	233	90°	0°	215	149	0,69	105	2,13>1	1,87>1	0,81<1

6.4.2.2 Unioni a dente arretrato

Per le capriate del caso-studio, tale tipologia di unione è stata rilevata per il collegamento catena-puntone della ‘Zona B’ e per quello controcatena-puntone delle zone ‘A’ e ‘C’. È evidente come fin dal XVIII secolo fosse noto che la connessione a dente arretrato aumenta la superficie del tallone, migliorando la resistenza al taglio. La scelta di tale tipologia di unione è sicuramente volta ad ottenere una maggiore resistenza tagliante per le ‘Capriate Tipo B’ al fine di preservare il pregiato affresco del salone da ballo. Per le ‘Capriate Tipo A-C’ l’unione a dente arretrato si può supporre sia stata adottata per gravare in forma minore sui nodi e, di conseguenza, sui monaci. Il rilievo geometrico — eseguito a campione sui nodi ispezionati — ha consentito la definizione delle misure e la restituzione del dettaglio in formato CAD di entrambi i collegamenti (Figg. 6.13-6.14).

NODO 3

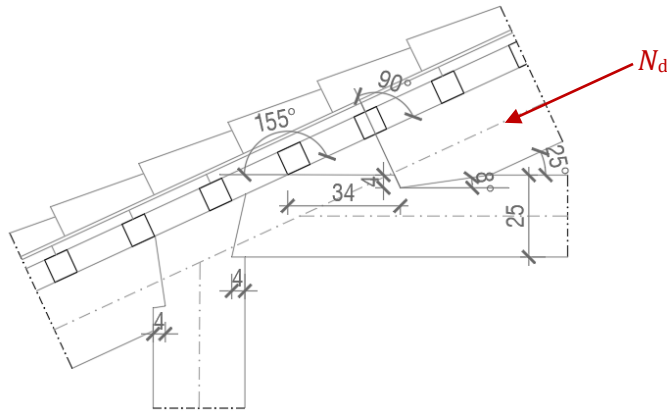


Fig. 6.13: Restituzione CAD dell’unione a dente arretrato della ‘Capriata Tipo A-C’.

Per le ‘Capriate Tipo A-C’, lo sforzo di compressione derivante dai puntone (aste 11 e 13) è risultato essere pari a $N_d = -14,58$ kN. Assumendo l’intaglio del dente ortogonale all’asse del puntone, le verifiche da effettuarsi sono relative alle sole resistenze per taglio del tallone e per compressione del dente. Per la connessione in esame la lunghezza del tallone è stata rilevata in media paria a $t_c = 340$ mm, mentre la profondità di intaglio in media pari a $t_v = 40$ mm.

Tab. 6.5: Verifiche delle unioni a dente arretrato condotte per le ‘Capriate Tipo A-C’.

Dati Capriata				Dati Prova						Verifica Unione		
Tipo [-]	Nodo [#]	B_c [mm]	H_p [mm]	RIF. [RH.#]	α [°]	β [°]	P_t [mm]	P_r [mm]	P_r/P_t [-]	b [mm]	V_{t_c} [-]	C_{t_v} [-]
A1	3	160	180	7	0°	-90°	299	99	0,33	99	0,32<1	0,34<1
C11	8	160	190	187	0°	-90°	234	200	0,85	150	0,34<1	0,28<1

Le verifiche sono state condotte con la larghezza della sezione trasversale b definita in funzione della sezione resistente efficace stimata tramite le singole prove strumentali eseguite nei nodi delle capriate ammalorate, adottando le medesime considerazioni espone per la verifica delle

unioni a dente semplice. I risultati (Tab. 6.5) mostrano come per tale tipologia di connessione il degrado non vada ad incidere negativamente a seguito del debole sforzo normale derivante dai puntoni superiori. La verifica condotta simulando una connessione a dente semplice ha però rivelato come invece entrambi i nodi indagati subirebbero il cedimento in seguito alla rottura per taglio del tallone, la cui resistenza è invece garantita nella soluzione adottata.

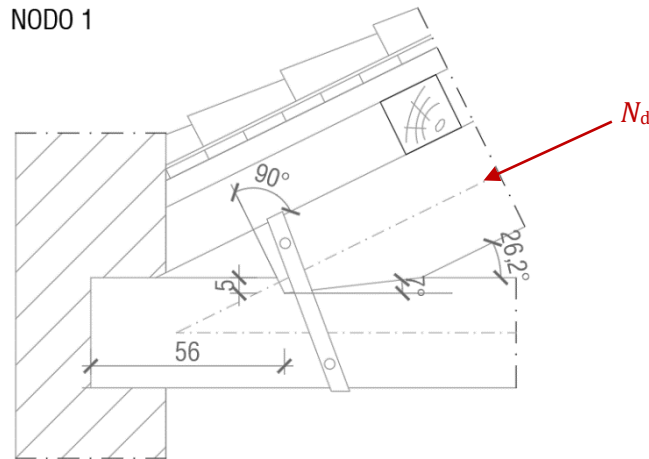


Fig. 6.14: Restituzione CAD dell'unione a dente arretrato della 'Capriata Tipo B'.

Per le 'Capriate Tipo B', lo sforzo di compressione derivante dai puntoni (aste 2 e 5) è risultato essere pari a $N_d = -119,92$ kN. Assumendo l'intaglio del dente ortogonale all'asse del puntone, le verifiche da effettuarsi sono relative alle sole resistenze per taglio del tallone e per compressione del dente. Per la connessione in esame la lunghezza del tallone è stata stimata paria a $t_c = 560$ mm, supponendo la catena in appoggio fino alla mezzeria della muratura d'ambito, mentre la profondità di intaglio è stata rilevata in media pari a $t_v = 50$ mm.

Tab. 6.6: Verifiche delle unioni a dente arretrato condotte per le 'Capriate Tipo B'.

Dati Capriata				Dati Prova						Verifica Unione		
Tipo [-]	Nodo [#]	B_c [mm]	H_p [mm]	RIF. [RH.#]	α [°]	β [°]	P_t [mm]	P_r [mm]	P_r/P_t [-]	b [mm]	V_{t_c} [-]	C_{t_v} [-]
B	1	230	230	-	-	-	-	230	-	-	0,97<1	1,27>1
B7	1	230	230	176	0°	0°	228	158	0,69	158	1,41>1	1,85>1
B8	1	250	230	177	0°	45°	394	194	0,49	137	1,63>1	2,13>1

Le verifiche sono state condotte con la larghezza della sezione trasversale b definita in funzione della sezione resistente efficace stimata tramite le singole prove strumentali, adottando le medesime considerazioni espone per la verifica delle unioni a dente semplice. I risultati (Tab. 6.6) mostrano come per tale tipologia di connessione il degrado vada ad incidere negativamente in conseguenza del notevole sforzo normale derivante dai puntoni superiori se confrontate con un'unione tipo, non ammalorata, supposta cautelativamente con elementi di categoria III.

6.4.2.3 Unioni a ‘dardo di Giove’

Tra le unioni di carpenteria rilevate, il giunto a ‘dardo di Giove’ è stato realizzato per collegare le porzioni di travi a realizzazione della catena delle capriate della ‘Zona B’. Tale topologia di unione era nota fin dal XVIII secolo come evidenziato dalla trattatistica storica, adoperata per coprire ampie luci e capace di resistere a sforzi di trazione. Il rilievo in sito ha consentito di determinare le principali dimensioni geometriche del giunto (Fig. 6.15), la cui verifica si è resa necessaria a seguito della constatazione del sollevamento di alcuni cunei.

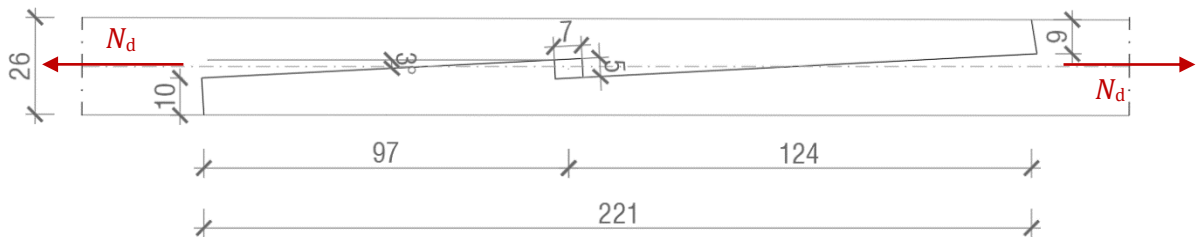


Fig. 6.15: Restituzione CAD del rilievo geometrico del giunto a ‘dardo di Giove’.

Oltre alla verifica dei rapporti dimensionali minimi, per tale giunzione sono opportune la verifica di resistenza a taglio del dente, la verifica di resistenza a compressione inclinata rispetto alla fibratura del dente a contatto con il cuneo e la verifica a compressione ortogonale alla fibratura del cuneo stesso. L’analisi dei parametri di sollecitazione ha restituito uno sforzo normale di trazione agente sulla catena delle ‘Capriate Tipo B’ pari a $N_d = +101,94$ kN, la cui scomposizione nella direzione parallela ed ortogonale al cuneo porta ad ottenere:

$$N_{1d} = N_d \cdot \sin \alpha = 101,94 \cdot \sin 3^\circ = 5,33 \text{ kN}$$

$$N_{2d} = N_d \cdot \cos \alpha = 101,94 \cdot \cos 3^\circ = 101,80 \text{ kN}$$

Le verifiche sono state condotte riferendosi alla catena (asta 1) della capriata B8, il cui giunto è apparso nella condizione più gravosa e la cui classificazione secondo la resistenza ha definito una categoria III — pari ad una classe C18 — vista la presenza di lesioni profonde lungo l’elemento.

La verifica di resistenza al taglio del dente esterno, tramite la [3.51] risulta:

$$\tau_d = \frac{N_d}{b \cdot l_e} = \frac{101,94 \cdot 10^3}{300 \cdot 970} = 0,35 \text{ MPa} < 2,04 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 3,4}{1,5} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{v,k}}{\gamma_M} = f_{v,d}$$

dove b è la larghezza della sezione trasversale, pari all’altezza della catena, ed l_e la lunghezza effettiva della superficie del dente, assunta pari alla minore tra le due dimensioni rilevate. La verifica è soddisfatta, si nota come sia stata assunta un’inclinazione minima al fine di garantire una maggiore superficie di resistenza al taglio del dente.

La verifica di resistenza a compressione inclinata rispetto alla fibratura del dente a contatto con il cuneo, tramite la [3.52] risulta:

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_{2,d}}{b \cdot a} = \frac{101,80 \cdot 10^3}{300 \cdot 50} = 6,79 \text{ MPa} < 10,59 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 17,65}{1,5} = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,\alpha,k}}{\gamma_M} = f_{c,\alpha,d}$$

dove b è la larghezza della sezione trasversale, pari all'altezza della catena, ed a l'altezza della sezione da verificare, pari alla dimensione minore del cuneo. Ricorrendo alla formulazione [3.39] proposta da Hankinson (1921) si è determinata la resistenza caratteristica $f_{c,\alpha,k}$ per la compressione con un angolo α rispetto alla fibratura.

La verifica a compressione ortogonale alla fibratura del cuneo, tramite la [3.53] risulta:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{N_{2,d}}{b \cdot a} = \frac{101,80 \cdot 10^3}{300 \cdot 50} = 6,79 \text{ MPa} > 5,28 \text{ MPa} = \frac{0,9 \cdot 2,2}{1,5} \cdot 4,0 = \frac{k_{\text{mod}} \cdot f_{c,90,k}}{\gamma_M} = f_{c,90,d} \cdot k_{c,90}$$

dove $k_{c,90}$ è un coefficiente che tiene conto della configurazione del carico, della possibilità di rottura per spacco, nonché di un certo grado di deformazione di compressione. La resistenza a compressione ortogonale alla fibra del cuneo non è dunque verificata a conferma del sollevamento dello stesso elemento ligneo, rilevato in fase di ispezione visiva in sito.

6.4.2.4 Unioni chiodate

I giunti di carpenteria verificati sono stati considerati come semplici giunti monolateri 'a gravità', cioè in grado di trasmettere sforzi in un solo verso che è quello delle caratteristiche di sollecitazione provocate dalle forze di gravità. In caso di azioni eccezionali come ad esempio una forte raffica di vento o un sisma violento, alla minima inversione degli sforzi i soli giunti 'a gravità' non sarebbero in grado di resistere e porterebbero al crollo della struttura. Come rilevato in sito, gran parte delle connessioni prevedono supporti in ferro di contenimento e fissaggio tra gli elementi lignei, come nel caso delle staffe per i nodi puntone-catena o dei chiodi per il collegamento saetta-puntone. Per il costruito storico esistente ci si limita a verificare visivamente se i principali meccanismi di attivazione di rottura delle unioni chiodate siano avvenuti o ne sia evitabile l'attivazione. Per le capriate, l'Euro-Codice 5 richiede la verifica di una resistenza aggiuntiva su tutti i giunti, prevedendo che gli stessi siano in grado di resistere in ogni direzione nel piano a uno sforzo aggiuntivo di breve durata e in classe di servizio 2 pari a:

$$F_{r,d} = 1,0 + 0,1 \cdot L \text{ [kN]} \quad [6.7]$$

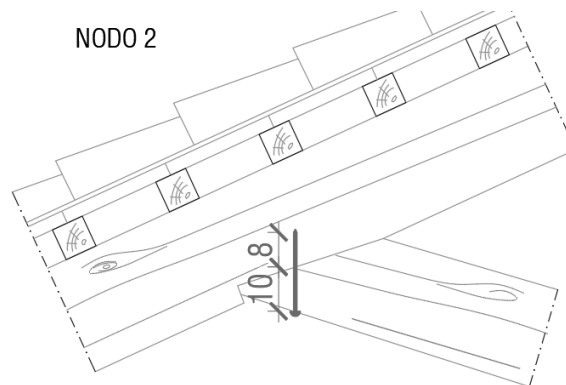


Fig. 6.16: Unione chiodata saetta-puntone rilevata per le 'Capriate Tipo A-C'.

Si procede alla verifica dell'unione chiodata legno-legno rilevata per il collegamento tra il puntone e la saetta delle 'Capriate Tipo A-C' (Fig. 6.14), considerando gli elementi lignei di categoria I (classe C24) e assumendo per il chiodo un diametro ϕ pari a 8 mm ed una lunghezza pari a 180 mm, con le lunghezze di penetrazione nella saetta e nel puntone rispettivamente pari a $t_1=100$ mm e $t_2=80$ mm. Considerando un chiodo in ferro con resistenza caratteristica a trazione pari a $f_{u,k}=600$ N/mm², il momento di snervamento del gambo può calcolarsi come:

$$M_{y,k} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6} = 0,3 \cdot 600 \cdot 8^{2,6} = 40,115 \text{ kN} \cdot \text{mm}$$

Nel caso di unioni chiodate legno-legno, come il collegamento in esame, il valore caratteristico della capacità portante, per ciascun piano di taglio e ciascun mezzo di unione, è da assumersi pari al minimo tra i valori ottenibili dalle formule di Johansen. Dalla [3.54] si ottiene:

$$F_{v,Rk} = 4734 \text{ N.}$$

A partire dal contributo alla resistenza dovuto all'eventuale effetto tirante, che nel caso di chiodo a gambo liscio può essere messo in conto nel rispetto del limite del 15%, è possibile determinare la resistenza all'estrazione del chiodo, che risulta essere pari a:

$$F_{ax,Rk} = 5444 \text{ N.}$$

I rispettivi valori di progetto sono determinabili considerando una classe di servizio 2 in condizioni di breve durata ($k_{mod}=0,9$):

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 4734}{1,5} = 2840 \text{ N}$$

$$F_{ax,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{ax,Rk}}{\gamma_M} = \frac{0,9 \cdot 5444}{1,5} = 3266 \text{ N}$$

La resistenza aggiuntiva richiesta dall'Euro-Codice 5, applicando la [6.7] risulta pari a:

$$F_{r,d} = 1,0 + 0,1 \cdot 19,53 = 2953 \text{ N}$$

Nel caso di collegamenti soggetti ad una sollecitazione combinata di carico assiale ($F_{ax,d}$) e carico tagliante ($F_{v,d}$), se l'unione è sollecitata con un angolo di 45° rispetto al chiodo si ottiene:

$$F_{ax,d} = F_{v,d} = F_{r,d} \cdot \cos 45^\circ = 2953 \cdot \cos 45^\circ = 2088 \text{ N}$$

Per la verifica deve essere soddisfatta la condizione imposta dalla [3.55] che risulta:

$$\frac{F_{ax,d}}{F_{ax,Rd}} + \frac{F_{v,d}}{F_{v,Rd}} = \frac{2088}{3266} + \frac{2088}{2040} = 0,63 + 1,02 > 1$$

Appare evidente come anche solo per una sollecitazione di carico tagliante l'unione chiodata non rispetti la prescrizione normativa e si potrebbe giungere alla rottura del chiodo, con conseguente inversione degli sforzi nella saetta e possibile caduta dello stesso elemento. La verifica sarebbe soddisfatta disponendo due chiodi, ottenendo così dei valori doppi in termini di resistenza al taglio e all'estrazione, come prescritto dalle stesse normative tecniche (Fig. 6.15).

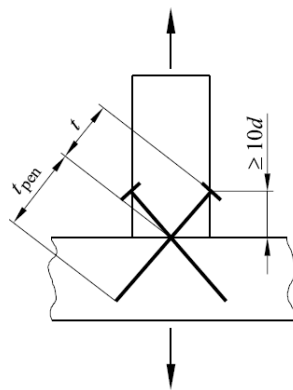


Fig. 6.17: Prescrizione dell'Euro-Codice 5 in materia di unione chiodata (EN1995-1-1:2004).

6.5 Osservazioni e analisi dei risultati

Le verifiche agli Stati Limite eseguite, seppure riferite a dei regimi di carico differenti da quelli assunti al tempo di realizzazione delle strutture di copertura, hanno mostrato come dal punto di vista dimensionale gli elementi lignei soddisfino le relative prescrizioni normative, mentre dal punto di vista tensionale alcuni risultati ottenuti non sono risultati entro i limiti imposti. Per i collegamenti, in particolare, il nodo puntone-catena è risultato suscettibile di rotture a taglio del dente, dovute all'insufficiente lunghezza del tallone ma soprattutto per l'innesto dello stesso nella muratura, con conseguente degrado da carie. L'incidenza del biodegradamento nelle verifiche dei collegamenti in termini di sezione resistente efficace è risultata infatti determinante a non garantirne il buon esito. Gli elementi con livelli di danno grave hanno presentato riduzioni di sezione di oltre il 50% che hanno portato a risultati negativi per le verifiche delle unioni. Ad oggi, l'efficienza dei collegamenti ammalorati sembra essere garantita più dalla presenza dei rinforzi in ferro che dall'effettiva connessione tra gli elementi lignei con ricadute sulla staticità delle capriate e sulle orditure secondarie di copertura, come confermato dalle deformazioni rilevate in sito ed ottenute tramite le analisi statiche lineari.

A seguito delle indagini strutturali eseguite, per le unità strutturali del sottotetto del corpo centrale è stato possibile redigere la diagnosi delle capriate analizzate (Fig. 6.16), in funzione delle loro attuali condizioni, sulla base del confronto del degrado con gli stati tensionali ottenuti ed in considerazione delle analisi e delle verifiche dei rispettivi nodi. Il parametro di riferimento indicato è quello legato alla 'sezione efficace', considerato in funzione del rapporto tra il profilo totale di penetrazione (P_t) ed il profilo resistente stimato (P_r) dedotto dalle prove strumentali, eseguite nelle aste e nei nodi delle capriate ammalorate, apparse già in forte stato di criticità a fronte dell'ispezione visiva e delle indagini di I livello (Tab. 6.7).

Tab. 6.7: Definizione delle capriate ammalorate a seguito delle indagini strutturali.

Zona A	Zona B	Zona C
Capriata A1	Capriata B3	Capriata C2
Capriata A3	Capriata B7	Capriata C6
Capriata A7	Capriata B8	Capriata C9
-	-	Capriata C10

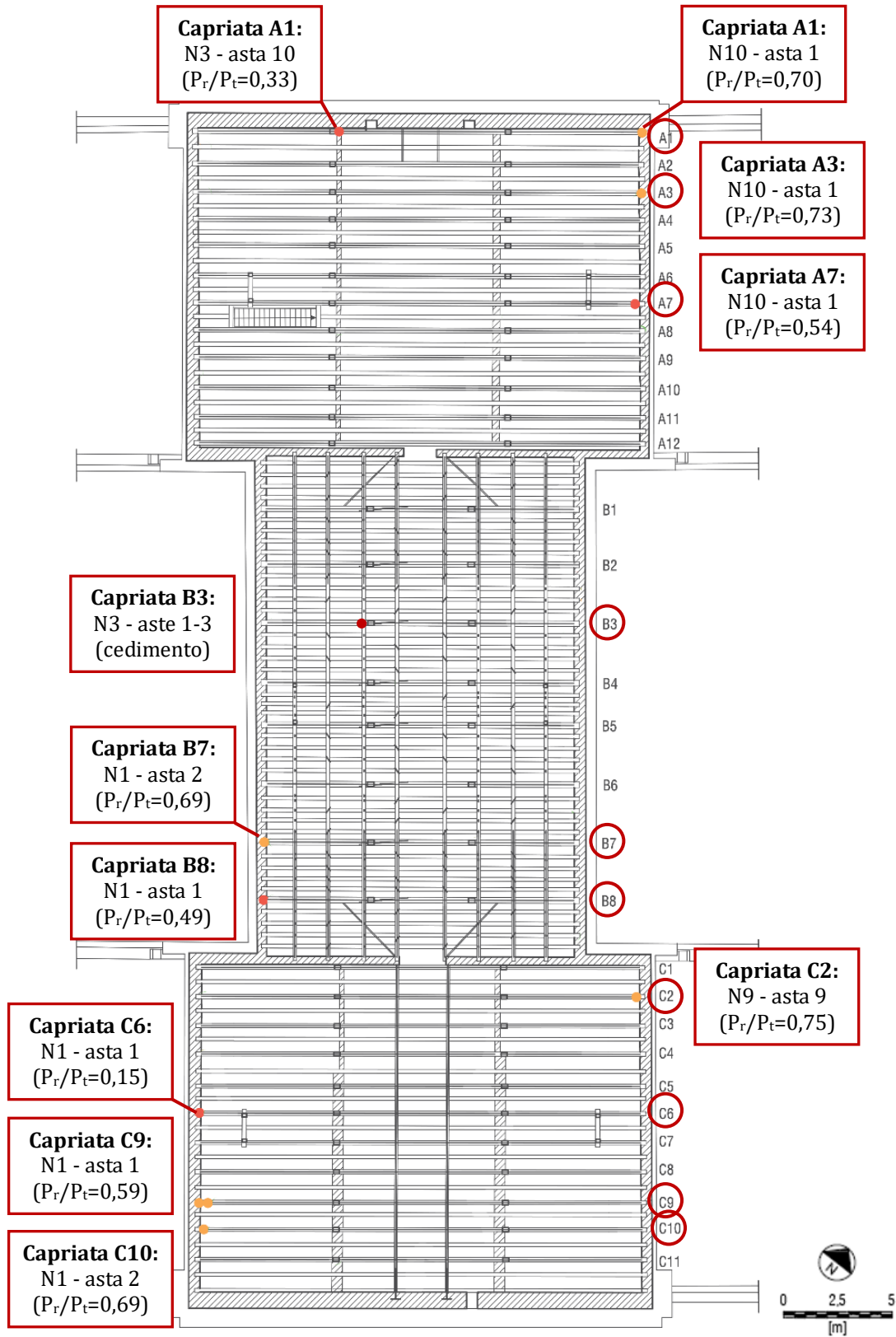


Fig. 6.18: Diagnosi delle capriate ammalorate del sottotetto centrale di Villa Pisani a Stra.

7. CONCLUSIONI

La valutazione della sicurezza di una struttura esistente è un processo complesso, volto a determinarne e verificarne le prestazioni residue. Il recupero del costruito storico esistente — inteso come la riabilitazione funzionale e statica dell'edificio nel suo complesso — assume oggi un ruolo fondamentale ai fini della conservazione. Le parti in legno di questi edifici offrono motivi di ulteriori criticità al percorso di conoscenza, per effetto della variabilità delle proprietà e della ridotta durabilità del materiale, che richiedono specifici approfondimenti. Le normative tecniche dedicate agli elementi lignei in opera nelle strutture portanti di edifici compresi nell'ambito dei beni culturali sono limitate alla norma UNI 11119:2004, che stabilisce obiettivi, procedure e requisiti per la diagnosi dello stato di conservazione e la stima della resistenza, e alla più recente norma UNI EN 17121:2019 che ne definisce il rilevamento e la valutazione delle condizioni.

Lo specifico percorso di conoscenza per gli elementi strutturali in legno è stato applicato sul caso-studio della copertura del corpo centrale di Villa Pisani a Stra, realizzato con capriate lignee palladiane composte. L'approfondimento della trattatistica e della letteratura ha evidenziato come la capriata costituisca un elemento complesso, di grande interesse e con larga diffusione spaziale e temporale, sottoposto ad un progressivo affinamento della concezione strutturale.

Tramite il rilievo in sito si è esaminato lo stato degli elementi strutturali dal punto di vista statico, valutandone lo stato di deformazione in termini di eventuali scorrimenti laterali, abbassamenti, svergolamenti ed inflessioni. Il rilievo ha interessato anche le parti di carpenteria, per quali si è operata una sistematica rilevazione fotografica al fine di valutarne lo stato meccanico ed ottenere i dati necessari per la classificazione strutturale degli elementi in opera. La classificazione visiva ha permesso di stimare le caratteristiche del materiale secondo le indicazioni della norma UNI 11119:2004, mentre il ricorso a prove debolmente distruttive eseguite con trapano resistografico ha consentito di confermare o ridefinire la classificazione condotta a vista, confermando la necessità di affiancare le indagini strumentali a quelle visive. L'ispezione visiva ha localizzato gli attacchi fungini in prossimità degli abbaini, principali varchi di ingresso delle acque meteoriche, mentre le prove resistografiche hanno mostrato che gli attacchi da insetti coinvolgono quasi esclusivamente le porzioni di alborno e sono totalmente pregressi, a conferma del buon esito di oltre il 90% delle stesse, che ha classificato il danno come lieve o assente.

Le indagini e i rilievi eseguiti in sito hanno evidenziato alcune problematiche e limitazioni nella loro conduzione. La classificazione secondo la resistenza dettata dalla norma UNI 11119:2004 ha mostrato i limiti legati all'assegnazione di una categoria per gli elementi lignei esistenti in base alle caratteristiche morfologiche esterne. La correlazione con i valori caratteristici per le verifiche agli Stati Limite proposta in letteratura è risultata da valutarsi specificatamente, evitandone un approccio di tipo sistematico che andrebbe a standardizzare dei parametri meccanici che, per natura dello stesso materiale legno, sono da considerarsi a seconda delle specifiche caratteristiche.

Il risultato delle indagini ha orientato l'analisi numerica sulle capriate maggiormente ammalorate. Indipendentemente dagli esiti delle verifiche agli Stati Limite si ritiene di poter affermare che, nel complesso, lo stato di salute degli elementi lignei sia sufficiente e che le deformazioni e gli abbassamenti registrati siano il risultato della vetustà e dell'azione dei carichi strutturali permanenti, unitamente alle condizioni igrometriche ed al conseguente biodegradamento, la cui incidenza è stata considerata nella definizione dei parametri meccanici del materiale. Le capriate con le maggiori alterazioni richiedono senz'altro un'analisi più approfondita ma al tempo stesso individuano le principali anomalie della copertura del corpo centrale. L'aver considerato una riduzione del modulo di elasticità del materiale in funzione dei difetti e dell'entità del degrado per le zone ammalorate ha consentito la valutazione del danno in funzione degli abbassamenti dei principali nodi delle capriate, confrontati con i medesimi delle capriate in condizioni sane. Sulla base dei risultati ottenuti per le capriate ammalorate è possibile affermare quanto segue:

- la capriata A1 (lato Nord) è apparsa come la più degradata e la più vulnerabile dell'intero sottotetto, l'attuale stabilità è garantita dagli interventi di sostegno attuati per il nodo 3 e per il nodo 10, senza i quali si avrebbe il cedimento del collegamento tra la controcatena (asta 10) ed il monaco (asta 4) con conseguente rischio di collasso;
- la capriata A3, a seguito del degrado della catena (asta 1) in prossimità del nodo 10 in appoggio sulla muratura (lato Est), mostra degli abbassamenti amplificati del 35% per i nodi posti nella sua porzione ad est;
- la capriata A7 mostra cedimenti maggiori di circa il 25%, a seguito del danno da carie dovuto all'umidità presente in corrispondenza del nodo 10 (lato Est), tra muratura ed abbaino;
- la capriata B3, nonostante un livello di danno lieve o assente, mostra degli abbassamenti maggiori di oltre il 30% rispetto a quelli delle capriate della stessa porzione centrale,

- soggette alla sola considerazione dell'umidità relativa e prive di anomalie, a conferma di come i difetti degli elementi incidano nella classificazione secondo la norma UNI 11119;
- le capriate B7 e B8 presentano una notevole riduzione della sezione efficace in prossimità del nodo 1 (lato Ovest) — le cui verifiche del collegamento puntone-catena non sono risultate soddisfatte — con conseguenti abbassamenti amplificati tra il 60% ed il 90% rispetto a quelli delle capriate della 'Zona B';
 - la capriata B8 mostra inoltre il massimo cedimento registrato (307%) nella mezzeria della sua controcatena (asta 7), a conferma dell'inflessione evidenziata in fase di ispezione visiva per la stessa asta, apparsa soggetta a biodegradamento da insetti;
 - la capriata C2 presenta un cedimento del monaco (asta 4) con un abbassamento maggiore di circa il 50%, mentre il danno limitato in prossimità del nodo 9 in appoggio alla muratura (lato Est) non sembra incidere in termini di abbassamenti;
 - la capriata C6 ha registrato il danno più grave dell'intero sottotetto ($P_r/P_t=0,15$) in corrispondenza del nodo 1, nella testa della catena (asta 1), con conseguenti cedimenti di circa il 115% per i nodi 3, 5 e 6, relativi al monaco (asta 4) ed alla controcatena (asta 10);
 - le capriate C9 e C10, poste ai lati dell'abbaino, hanno anch'esse presentato dei livelli di danno tendenti al grave in prossimità del nodo 1 (lato Ovest) — a conferma dell'ispezione visiva — con conseguenti abbassamenti del 110%, in particolare per il monaco (asta 4).

In linea generale, per le strutture lignee di copertura, è definibile quanto segue:

- lo stato di conservazione è buono in tutte le parti visibili e ispezionabili delle capriate;
- gli attacchi fungini e da insetti xilofagi, ove presenti, sono limitati alle porzioni di alburno;
- l'attività degli insetti è da considerarsi in ogni caso interrotta e conclusa da tempo;
- l'umidità del legno dovuta alle infiltrazioni favorisce nuovi possibili attacchi fungini;
- le infiltrazioni di acqua piovana avvengono principalmente dagli abbaini;
- il livello di danno incide sulla risposta strutturale e sulle caratteristiche meccaniche;
- la considerazione del danno incide sulle verifiche dettate dalle norme tecniche;
- l'efficienza dei collegamenti ammalorati è garantita dai rinforzi in ferro.

I possibili lavori di intervento dovranno essere mirati a preservare e restaurare l'apparato ligneo delle coperture appartenenti al corpo centrale di Villa Pisani, adottando tecniche minimamente invasive e idonee a ridare consistenza strutturale all'insieme senza perdere una importante testimonianza del saper fare costruttivo del passato, ancorché funzionale.

Per il sottotetto l'intervento dovrebbe prevedere:

- la manutenzione se non la sostituzione degli infissi degli abbaini per eliminare le infiltrazioni;
- la sostituzione delle porzioni di elementi con un livello di danno grave;
- il ripristino ed il rinforzo delle connessioni non conformi alle verifiche;
- la conservazione e il ripristino delle orditure secondarie.

I dati raccolti e le analisi condotte possono contribuire ad ampliare il livello di conoscenza della fabbrica di Villa Pisani, in particolare per la porzione del corpo centrale, per la cui copertura sono da eseguirsi ulteriori prove sulle caratteristiche meccaniche del materiale ligneo costituente le capriate palladiane composte.

In relazione ai possibili sviluppi futuri del caso-studio esaminato, poiché la vulnerabilità delle capriate può derivare dalla tipologia, dai dettagli e dalle condizioni dei suoi giunti di carpenteria, gli aspetti da esaminare possono essere relativi:

- alla capacità di mantenere le sue connessioni in condizioni di carico cicliche;
- alla valutazione del comportamento post-elastico evitando rotture di tipo fragile.

Ulteriori aspetti potrebbero infine interessare le tematiche relative all'integrazione dei risultati derivanti dal rilievo e dall'ispezione in sito, sia in termini geometrici che numerici, nel modello BIM interoperabile.

BIBLIOGRAFIA

Andreolli, M. (2009). *Esempio di progettazione di un tetto. Disegno e documentazione*, Dispense Corso di approfondimento promo_legno, Tetti e coperture di legno.

Andreolli, M., Tomasi, R. (2009). *Esempio di dimensionamento di una copertura di legno*, Collana Didattica Università di Trento – Facoltà di Ingegneria, Rapporto n. 13.

Angeletti, M., Baldan, F., Baratto, M., Garcia Hernanz, J., Giorio, M., Maioli, S., Mazzocchin, A., Saltarin, G., Zadra, M. (2020). *L'approccio alla conoscenza per la conservazione degli edifici storici: un'applicazione al museo nazionale di Villa Pisani*. Galileo, 244, 10-17.

Aveta, A., Monaco, L.M. (2007). *Consolidamento e restauro delle strutture in legno. Diagnostica e interventi conservativi*, Napoli, ESI.

Aveta, A. (2013), *Consolidamento e restauro delle strutture in legno*, Palermo, Flaccovio Editore.

Badalini, J., Barbò, S., Del Curto, D. (2009). *La prova resistografica per l'analisi e la diagnostica di strutture lignee in opera: letteratura, normativa, applicazioni sul costruito storico*, Atti XXV Convegno di Studi Conservare e Restaurare il Legno, Bressanone, 23-26 giugno 2009.

Barbisan, U., Laner, F. (2003) *Capriate e tetti in legno. Progetto e recupero*, Milano, Franco Angeli.

Belletti, B., Coisson, E., Picarelli, F. (2005). *Analyses for the conservation of the load bearing wooden structures of the Teatro Comunale in Modena*, Conservation of Historic Wooden Structures, Florence, Italy, Feb. 22-27, 2005, 1: 303- 308.

Bernasconi, A., Schickhofer, G., Piazza, M. (2005). *Il calcolo delle strutture in legno*, Dispense Corso Base promo_legno, Corso sull'uso strutturale del legno.

Bertolini Cestari, C., Biglione, G., Cestari, L., Corradino, G., Crivellaro, A., De Luca, D., Marzi, T., Pasquino, R. (2009). *Per la conservazione delle grandi coperture lignee del Duomo di Vercelli*.

Bertolini Cestari, C., Marzi, T. (2018). *Conservation of historic timber roof structures of Italian architectural heritage: diagnosis, assessment, and intervention*, International Journal of Architectural Heritage, 12:4, 632-665, DOI: 10.1080/15583058.2018.1442523.

Branco, J.M., Piazza, M., Cruz, P.J.S. (2010). *Structural analysis of two King-post timber trusses: Non-destructive evaluation and load-carrying tests*, Construction and Building Materials, 24.3: 371-383, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.025.

Branco, J.M., Piazza, M., Cruz, P.J.S. (2011). Experimental evaluation of different strengthening techniques of traditional timber connections, *Engineering Structures*, 33.8: 2259-2270.

Branco, J.M., Peixoto, T., Lourenco, P., Medeiros, P. (2011). *Mechanical characterization of old chestnut beams*, International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHA-'TIS'11), Lisbon, Portugal, June 1-8.

Brigante, F., Toraldo, F. (2012). *In tema di strutture reticolari per le coperture di grandi luci nel costruito storico e monumentale*, Atti del IV Congresso Nazionale di Storia dell'Ingegneria, Vol. II, pp. 1011-1022.

BS EN 17121:2019 *Conservation of cultural heritage – Historic timber structures – Guidelines for the on-site assessment of load-bearing timber structures*.

Caleca, L. (1994), *Architettura tecnica*, Palermo, Flaccovio Editore, 1994.

Carino, C. (2016). *Modellazione ed analisi agli elementi finiti di capriate lignee alla lombarda*, Collana rapporti scientifici, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura dell'Università di Pavia.

Cavalli, A., Togni, M. (2013). *How to improve the on-site MoE assessment of old timber beams combining NDT and visual strength grading*, *Nondestructive Testing and Evaluation*, 28:3, 252-262, DOI: [10.1080/10589759.2013.764424](https://doi.org/10.1080/10589759.2013.764424).

Ceccotti, A., Bonamini, G., Ruffino, M., Uzielli, L. (1998). *Restauro conservativo di capriate lignee. La Pieve di S. Marino*, Torino, C.L.U.T.

Ceccotti, A., Follesa, M., Lauriola, M.P. (2005). *Le strutture di legno in zona sismica*, Torino, C.L.U.T.

Ceraldi, C., Mormone V., Russo Ermolli, E. (2001) *Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics*, *Materials and Structures*, Vol. 34, January-February, pp. 59-64.

Checchin, F. (2022). *Valutazione del comportamento sismico del corpo centrale di Villa Pisani a Stra: analisi del contributo dinamico sui meccanismi fuori piano*, Tesi di Laurea, DICEA, Università degli Studi di Padova.

Circolare 21/01/2019, n. 7 C.S.LL.PP. – *Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle "Norme Tecniche delle Costruzioni"* di cui al DM 17/01/2018.

CNR-DT 206-R1:2018 *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno*.

Croatto, G., Turrini, U. (2014). *Restoration of historical timber structures criteria, innovative solutions and case studies*. In: Sousa HS, Branco JM, Lourenço PB (eds) *Intervir em construções existentes de madeira* livro de Atas. Escola de Engenharia, Guimarães, pp. 119-136.

Cruz, H., Yeomans, D., Tsakanika, E., Macchioni, N., Jorissen, A., Touza, M., Mannucci, M., Laurencio, P.B. (2015). *Guidelines for on-site assessment of historic timber structures*, International Journal of Architectural Heritage, Vol. 9, pp. 277-289.

De Giacometti, M., Barp, I. (2002). *Analisi statica delle strutture di copertura*, Relazione relativa ad analisi e studi preliminari relativi ai solai ed alla copertura, Progetto di Restauro di Villa Nazionale Pisani di Strà (VE), MIBACT – Soprintendenza per i Beni Culturali e per il Paesaggio del Veneto Orientale.

Decreto Ministeriale 17/01/2018 - *Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le Costruzioni"*.

Di Giorgio Martini, F. (1967). *Trattati di Architettura, Ingegneria e Arte militare*, Edizioni il Polifilo, Milano.

Di Tondo, S., Macchia, C., Ottolenghi, M. (1997). *Il recupero delle strutture di legno*, Rimini, Maggioli.

Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 09/02/2011 (G.U. n. 47 del 26/02/2011) *Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale allineate alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008*.

Expin Srl (2020). *Relazione tecnica: indagini diagnostiche. Strà (VE)/Villa Pisani*, Relazione Finale.

Giordano, G. (1993). *Tecnica delle costruzioni in legno*, Milano, Biblioteca Tecnica Hoepli.

Laner, F. (1997). *Atlante delle partizioni orizzontali*, ricerca MIBAC, luav.

Laner, F. (2005). *Diagnostica delle strutture lignee*, Le Guide Peter Cox, Flap Edizioni.

Laner, F. (2018). *Il mio legno*, Verona, unidea srl.

Lione, R., Fiandaca, O., Rinaldo, V. (2002). *Il legno. Caratteristiche tecniche e progettazione*, Roma, Carocci Faber.

Macchioni, N., Fabbri, R., Casali, V., Crivellaro, A. (2004). *Strutture lignee di copertura a Ferrara tra fine '400 e fine '600: analisi dei sistemi costruttivi, identificazione delle specie legnose e studio delle marche incise nel legno*.

Macchioni, N., Mannucci M. (2018). *The assessment of Italian trusses: survey methodology and typical pathologies*, International Journal of Architectural Heritage, 12:4, 533-544, DOI: 10.1080/15583058.2018.1442516.

Macchioni, N., Feio, A., Ruisinger, U., Saporiti, J., Tsakanika, E., Yeomans, D. (2019). *The prEN 17121: historic timber structures – Guidelines for the on-site assessment of load-bearing timber structures*, 5th International Conference on Structural Health of Timber Structures.

Macchioni, N.; Palanti, S. (2020). *Struttura lignea di copertura di Villa Pisani a Stra (PD). Indagine in situ sulla presenza di biodeteriogeni nel sottotetto centrale*, CNR-IBE.

-
- Mazzocchi, L. (1871). *Trattato su le costruzioni in legno*, Milano.
- Mazzolani, F.M., Faggiano, B., Marzo, A. (2004). *Methodology for the analysis of complex historical wooden structures: a study case*, 4° Congresso Internazionale su "Structural Analysis of Historical Constructions (SAHC)", Padova, Italia, 10-13 Novembre, Vol. 2, 2004, pp. 945-955.
- Menichelli, C., Modena, C., Valluzzi, M.R., Garbin, E., Da Porto, F. (2005). *Timber roof structures of the "Arsenale" of Venice*. In Structural analysis of historical constructions, eds. C. Modena, P.B. Lourenço, and P. Roca, 967-75. London.
- Milizia, F. (1847). *Principj di architettura civile*, Bassano.
- Munafò, P. (2002). *Le capriate lignee antiche per i tetti a bassa pendenza*, Firenze, Alinea Editrice.
- Palanti, S. (2013). *Durabilità del legno*, Palermo, Flaccovio Editore.
- Parisi, M.A., Cordiè, C., Piazza, M. (2007). *Adeguamento sismico delle capriate lignee: i metodi tradizionali di rinforzo*, Atti Convegno Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica (ANIDIS).
- Parisi, M.A., Piazza, M. (2000). *Mechanics of plain and retrofitted traditional timber connections*, Struct Engng Am Soc Civ Engrs, 126(12): 1395-403.
- Parisi, M.A., Piazza, M. (2002). *Seismic behaviour and retrofitting of joints in traditional timber roof structures*, SoilDynamic And Earthquake Engineering, 2002, 22: 1183-1191.
- Piazza, M. (2007). *Il contributo della sperimentazione alla progettazione degli interventi di restauro su strutture lignee*, Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni.
- Piazza, M., Tomasi, R. (2004). *Sistemi di connessioni. Connessioni di carpenteria*, Dispense Corso Base promo_legno, Corso sull'uso strutturale del legno.
- Piazza, M., Tomasi, R., Modena, R. (2005). *Strutture in legno*, Milano, Biblioteca Tecnica Hoepli.
- Pozza, L. (2018). *Diagnosi, rilievo del degrado, tecniche di intervento su solai, coperture e controsoffitti centinati*, Dispense del Corso di Progetto di Strutture in Legno, Nota di approfondimento, Università degli Studi di Bologna.
- Rallo, G. (2000). *Opere di restauro e valorizzazione di Villa Pisani a Stra*, Padova, Il Prato.
- Riggio, M., D'Ayala, D., Parisi, M.A., Tadini, C. (2018). *Assessment of heritage timber structures: review of standards, guidelines and procedures*, Journal of Cultural Heritage, 31: 220-235.
- Rinn, F. (1996). *Resistographic visualisation of tree-ring density variations*, In: Dean JS, Meko DM, Swetnam TW. eds. Tree rings, environment and humanity. Department of Geosciences, The University of Arizona, Tucson, 871-878.
-

-
- Rondelet, J. (1831). *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, Mantova.
- Scancelli L. (2017), *Correlazione tra metodi di indagine non invasivi per la qualificazione del legno e prove di caratterizzazione meccanica di componenti strutturali dell'edilizia storica*, Tesi di Laurea, Università degli Studi di Padova.
- Tampone, G. (2001). *Acquaintance of the ancient timber structures*, In: Lourenco PB, Roca P, editors. *Historical constructions. Possibilities of numerical and experimental techniques*.
- Tampone, G. (2005). *Il restauro delle strutture di legno*, Milano, Biblioteca Tecnica Hoepli.
- Tampone, G., Ruggieri, N. (2016). *State-of-the-art technology on conservation of ancient roofs with timber structure*, J. Cult. Herit. 22 (2016) 1019–1027, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.05.011>.
- Tannert, T., Anthony, R.W., Kasal, B., Kloiber, M., Piazza, M., Riggio, M., Rinn, F., Widmann, R., Yamaguchi, N. (2013). *In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques*, *Materials and Structures*.
- Thoma, H., Togni, M., Uzielli, L. (2007). *Determinazione sperimentale della resistenza di nodi puntone-catena di capriate lignee tradizionali*, *Architettura e tecnica delle coperture - Atti a cura di M. D'Orazio, D. Dogana*, pp. 151-156.
- Tomasi, R., Piazza, M., Parisi, M.A., Branco, J. (2007). *Analisi sperimentale su collegamenti tradizionali e rinforzati nelle capriate lignee*, *Atti Convegno Associazione Nazionale Italiana di Ingegneria Sismica (ANIDIS)*.
- UNI 11035-1:2010 *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 1: Terminologia e misurazione delle caratteristiche*.
- UNI 11035-2:2010 *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 2: Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza meccanica e valori caratteristici per tipi di legname strutturale*.
- UNI 11035-3:2010 *Legno strutturale - Classificazione a vista dei legnami secondo la resistenza meccanica - Parte 3: Travi Uso Fiume e Uso Trieste*.
- UNI 11118:2004 *Beni culturali - Manufatti lignei - Criteri per l'identificazione delle specie legnose*.
- UNI 11119:2004 *Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera*.
- UNI EN 335:2013 *Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Classi di utilizzo*.
- UNI EN 338:2016 *Legno strutturale - Classi di resistenza*.
- UNI EN 17121:2019 *Conservazione del patrimonio culturale - Strutture storiche in legno - Linee guida per la valutazione in situ di strutture in legno portanti*.
-

BIBLIOGRAFIA

UNI EN 1995-1-1:2005 *Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-1: Regole generali - Regole comuni e regole per gli edifici.*

Valeriani, S. (2005). *Monaci, dardi e colonnelli. Genesi e caratteristiche delle capriate italiane*, Atti IV Congresso Nazionale di Storia delle Costruzioni, Cádiz, 27-29 gennaio 2005.

Valluzzi, M.R., Bondi, A., da Porto, F., Franchetti, P., Modena, C. (2002). *Structural investigation and analyses for the conservation of the 'Arsenale' of Venice*, Journal of Cultural Heritage, Vol. 3, 1:65-71, [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01161-5](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01161-5).

Verbist, M., Matos, F.T., Branco, J.M. (2020). *Structural and health assessment of historic timber roofs from the Convent of Christ in Tomar*, Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2019, 9:491-511, <https://doi.org/10.1007/s13349-019-00347-6>.

Villa Pisani, detta "Nazionale", Portale Cultura Veneto. Disponibile da: <https://www.culturaveneto.it/it/beni-culturali/ville-venete/>

Zan, B. (2018). *Calcolo e verifica delle strutture di legno*, Palermo, Flaccovio Editore.

RINGRAZIAMENTI

I miei ringraziamenti più sinceri vanno alla Prof.ssa Maria Rosa Valluzzi, relatrice del presente elaborato e docente dei corsi di Restauro e Problemi Strutturali dei Monumenti e dell'Edilizia Storica, che con i suoi consigli, revisioni e con incondizionata disponibilità e fiducia mi ha concesso di realizzare questo lavoro di tesi e mi ha trasmesso la passione e le competenze necessarie per affrontare un caso-studio di pregio e valore storico artistico quale è il Museo Nazionale di Villa Pisani a Stra.

Un particolare ringraziamento va all'Arch. Loretta Zega, Direttrice del Museo Nazionale di Villa Pisani. Promotrice degli interventi e delle indagini, si è sempre dimostrata disponibile alle richieste e alle domande sull'opera ed interessata e vigile ai lavori di rilievo in sito.

Sono grato inoltre all'Ingegnere Matteo Salvalaggio, correlatore della tesi, che con la sua disponibilità, unita alle competenze tecniche ed ai preziosi consigli e suggerimenti, mi ha seguito nelle analisi numeriche agli elementi finiti. Ringrazio anche gli Ingegneri Luca Sbrogiò e Ylenia Saretta per i loro contributi relativamente all'evoluzione storica delle capriate lignee ed all'interpretazione delle indagini in sito, oggetto di revisioni e di spunti interessanti che hanno contribuito a dar forma a questo elaborato.

Ringrazio il Dott. Ing. Filippo Casarin e tutti i collaboratori di Expin Srl per il supporto tecnico fornito durante la fase delle prove strumentali in sito e per il relativo materiale messo a disposizione. Il ringraziamento è esteso anche agli Ingg. Mocellini e Pavanetto di R-Struct Srl.

Un sincero ringraziamento va all'amico e collega Federico Checchin — con cui ho condiviso l'intero percorso di studi universitari — che ha condotto con il sottoscritto le ispezioni e i rilievi in sito nel corso della fase preliminare alla redazione dell'elaborato, dimostrandosi un vero compagno di viaggio ed un prezioso riferimento nell'arco degli anni accademici.

Ringrazio inoltre i colleghi di corso, in particolare l'ormai Ing. Riccardo Franceschini, e tutti i docenti che in questi anni mi hanno fornito occasioni di confronto, crescita e maturazione; così come ringrazio i professionisti che ho avuto modo di incontrare nel mio percorso di studente-lavoratore, la cui passione mi ha spinto a perseguire questo traguardo e ad approfondire i temi dell'ingegneria edile-architettura.

Un grazie speciale va agli Amici ed ai Colleghi Arbitri che mi sono stati vicini in questo percorso di tesi, coinciso con un particolare momento di difficoltà della mia vita.

Il ringraziamento più grande e sincero va infine alla mia Famiglia, vero supporto e sostegno in questi anni, nonché quotidiano riferimento di crescita dal lato umano.

A. APPENDICE

Si riportano i risultati delle indagini strutturali condotte per la copertura del corpo centrale di Villa Pisani a Stra (VE), così suddivisi:

- A.1 Elaborati tecnici della copertura;
- A.2 Schede di rilievo delle capriate lignee;
- A.3 Rapporti delle prove con trapano resistografico⁴⁵.

A.1 Elaborati tecnici della copertura

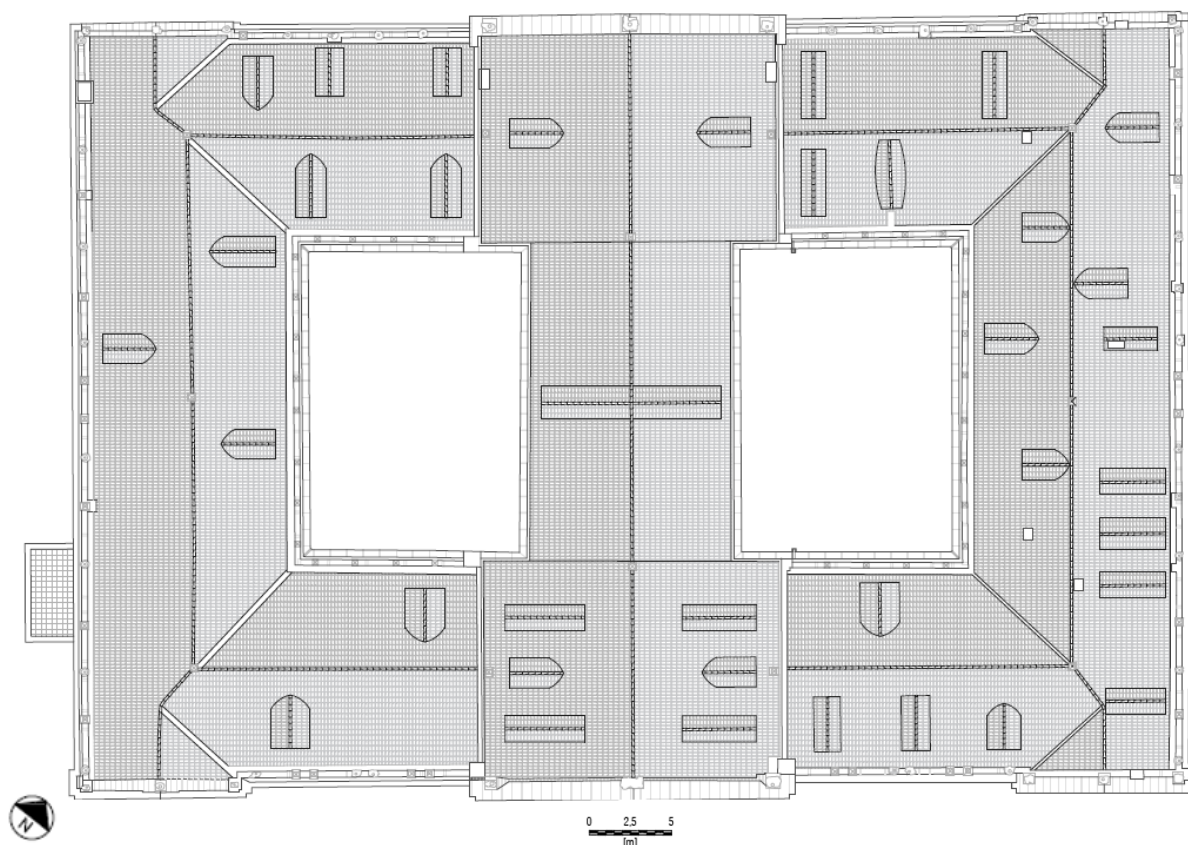


Fig. A.1: Planimetria di Villa Pisani – Pianta della copertura.

⁴⁵ Le indagini resistografiche sono state eseguite in sito da parte del Laboratorio Autorizzato Expin Srl. I rapporti delle prove sono di proprietà di Expin Srl che ne ha concesso la riproduzione e sono estratti da Expin (2020).

APPENDICE

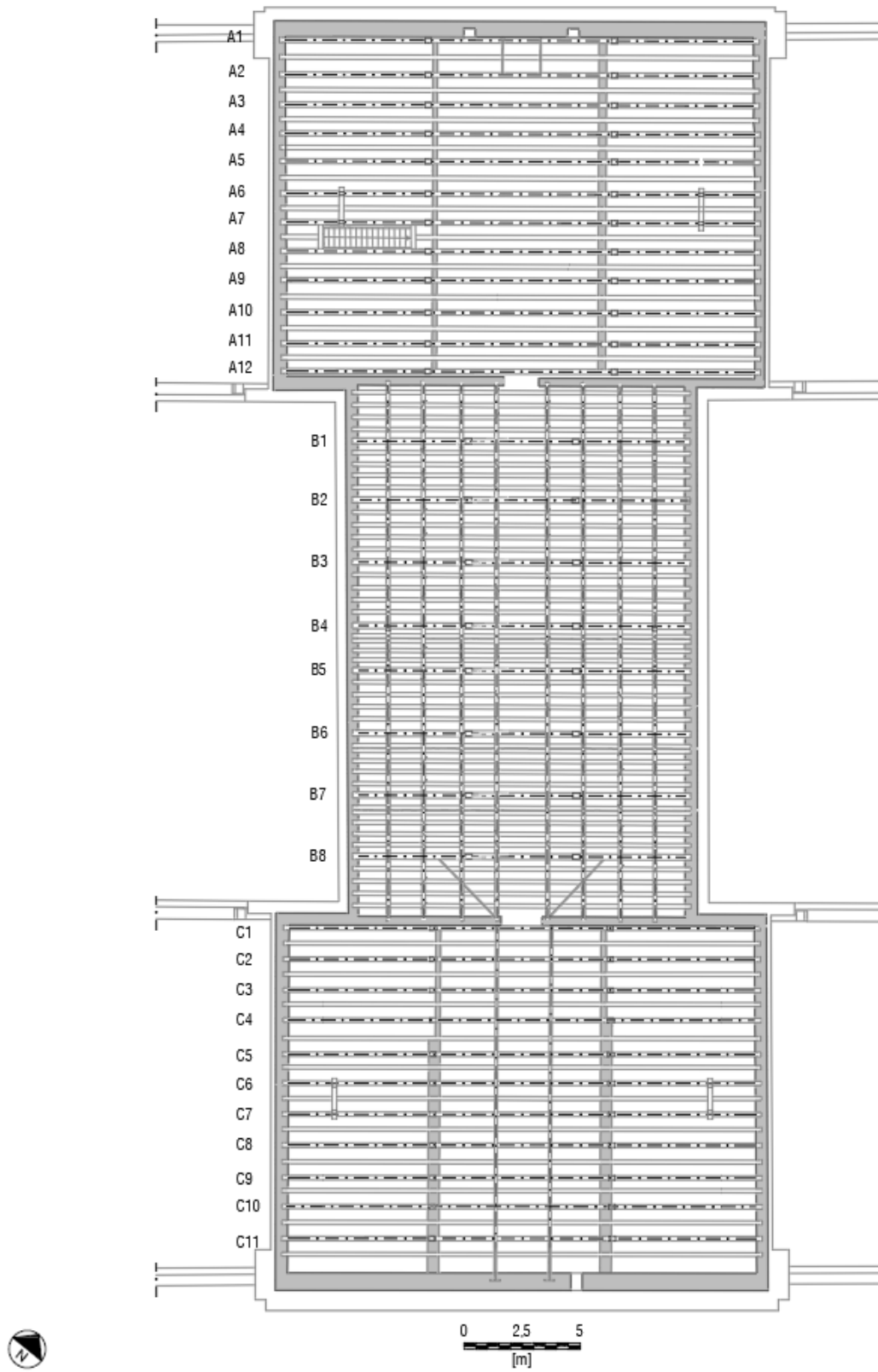


Fig. A.2: Pianta della copertura del corpo centrale di Villa Pisani – Pianta catene.

APPENDICE

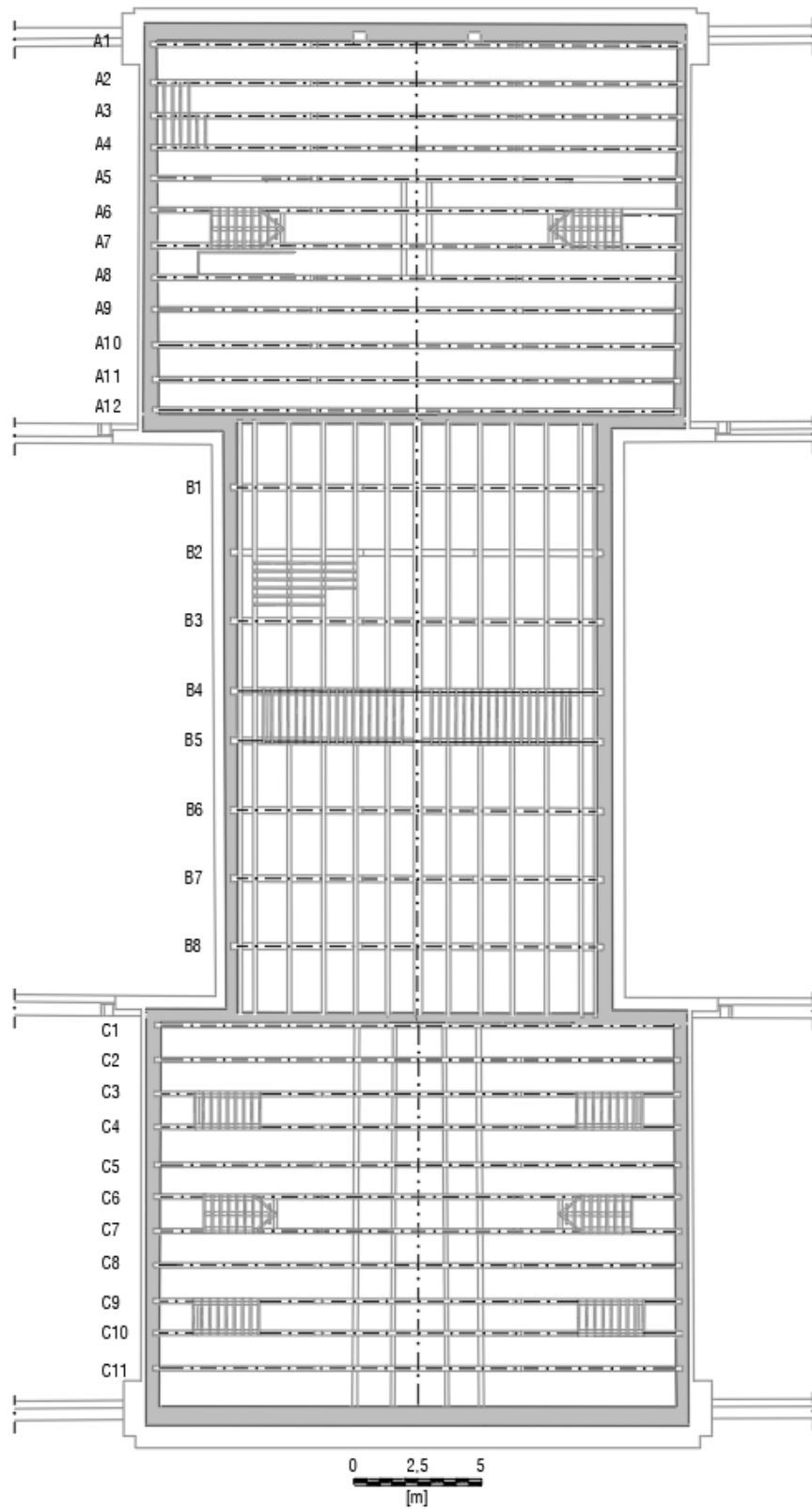


Fig. A.3: Pianta della copertura del corpo centrale di Villa Pisani – Pianta puntoni.

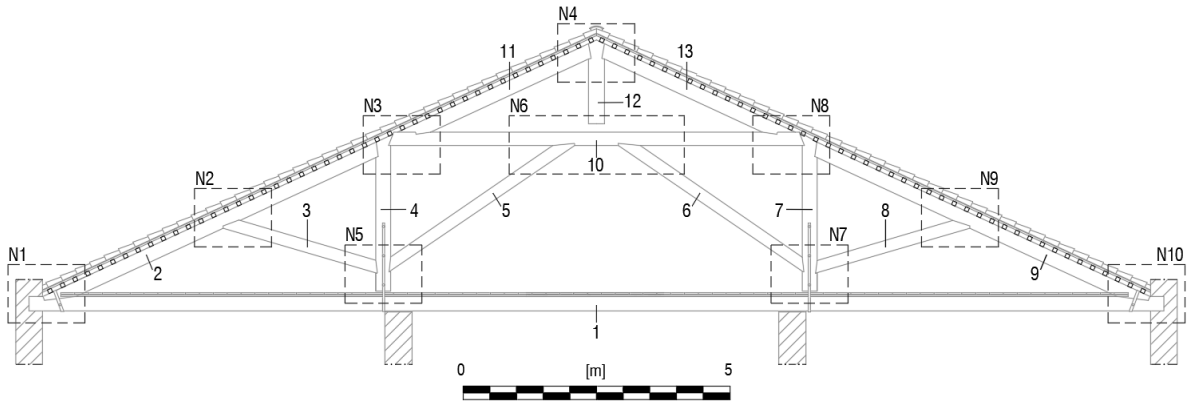


Fig. A.4: Capriata "Tipo A-C" – Restituzione CAD ed individuazione di aste e nodi.

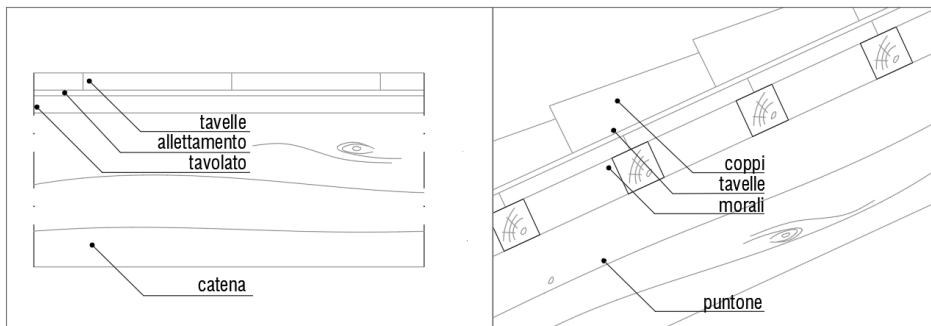


Fig. A.5: Capriata "Tipo A-C" – Dettagli tipologici delle stratigrafie di calpestio e di copertura.

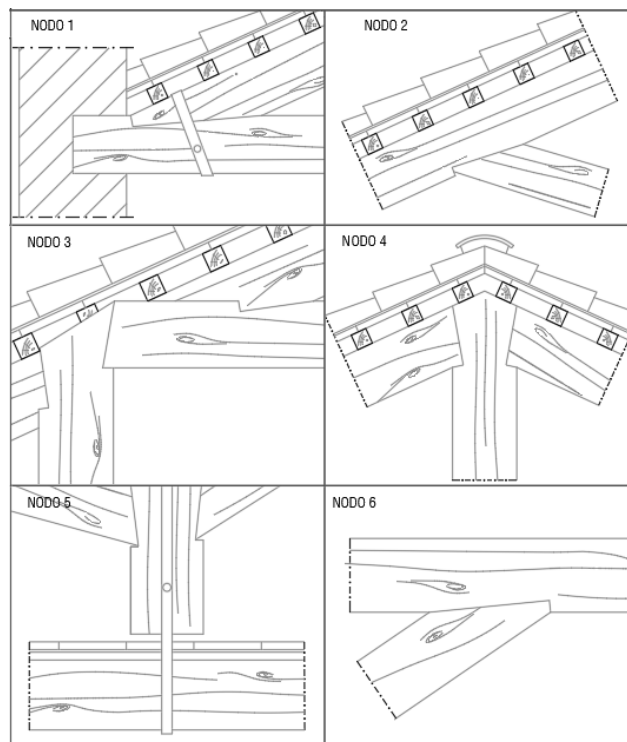


Fig. A.6: Capriata "Tipo A-C" – Dettagli tipologici dei principali nodi di carpenteria.

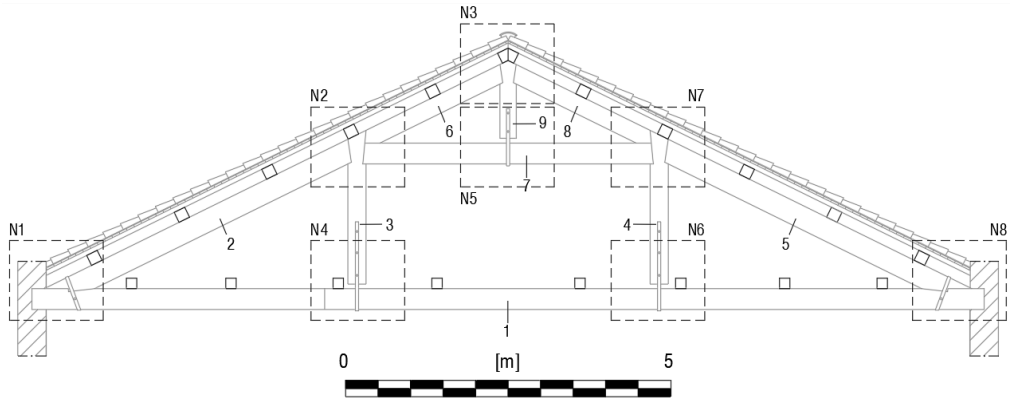


Fig. A.7: Capriata 'Tipo B' - Restituzione CAD ed individuazione di aste e nodi.

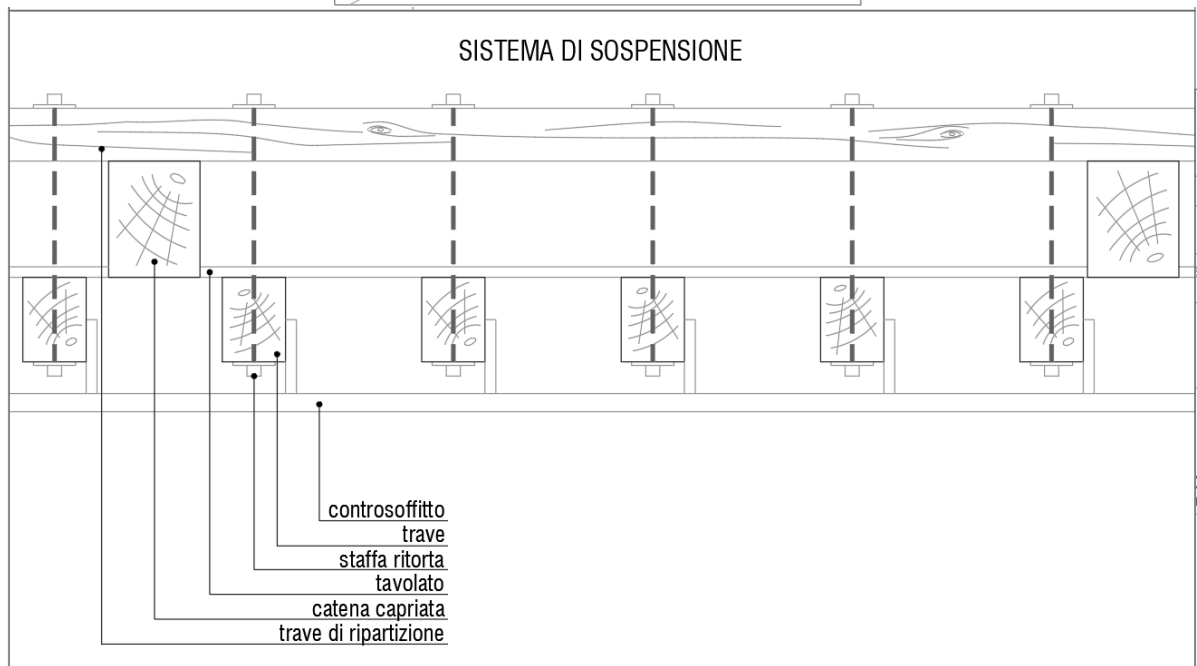
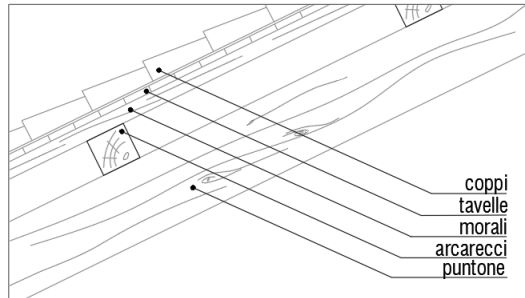


Fig. A.8: Capriata 'Tipo B' - Dettagli tipologici delle stratigrafie di copertura e del sistema di sospensione.

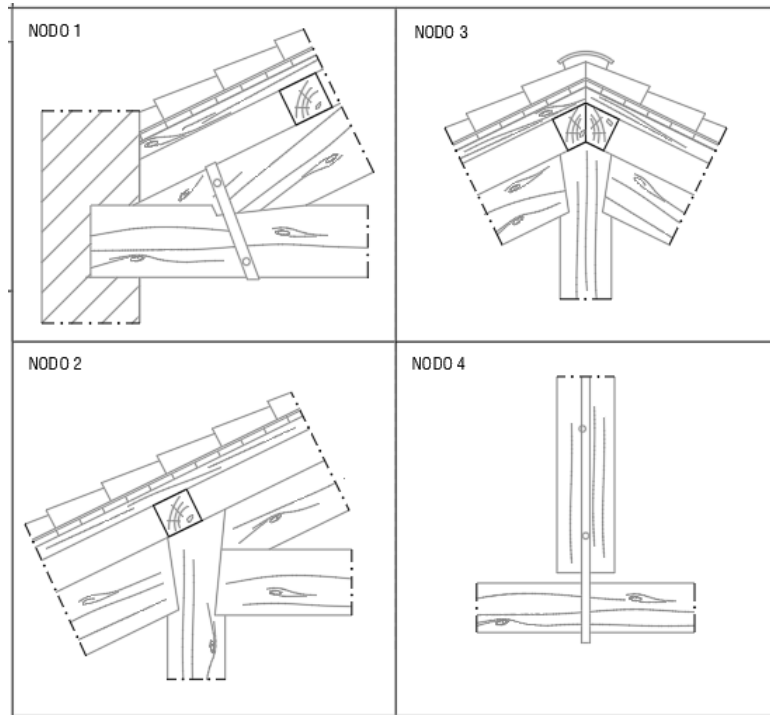


Fig. A.9: Capriata "Tipo B" - Dettagli tipologici dei principali nodi di carpenteria.



Fig. A.10: Capriata "Tipo B" - Rilievo geometrico del giunto a 'dardo di Giove'.

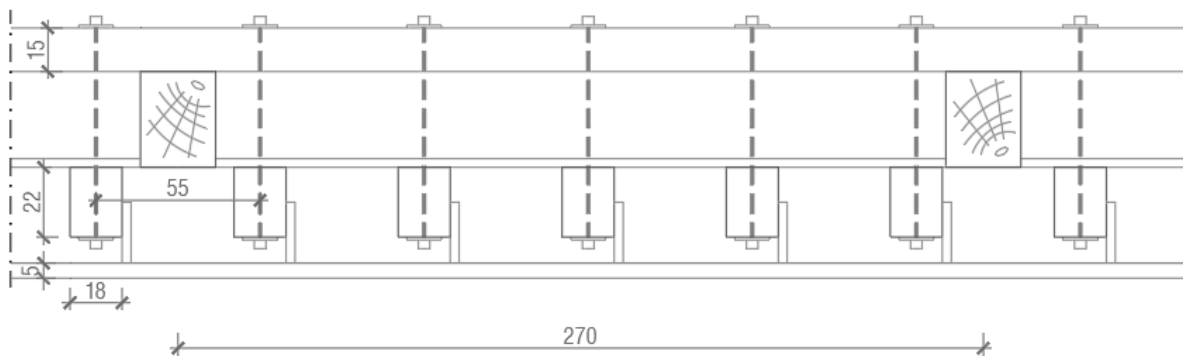


Fig. A.11: Capriata "Tipo B" - Rilievo geometrico del sistema di sospensione gravante sulle catene.

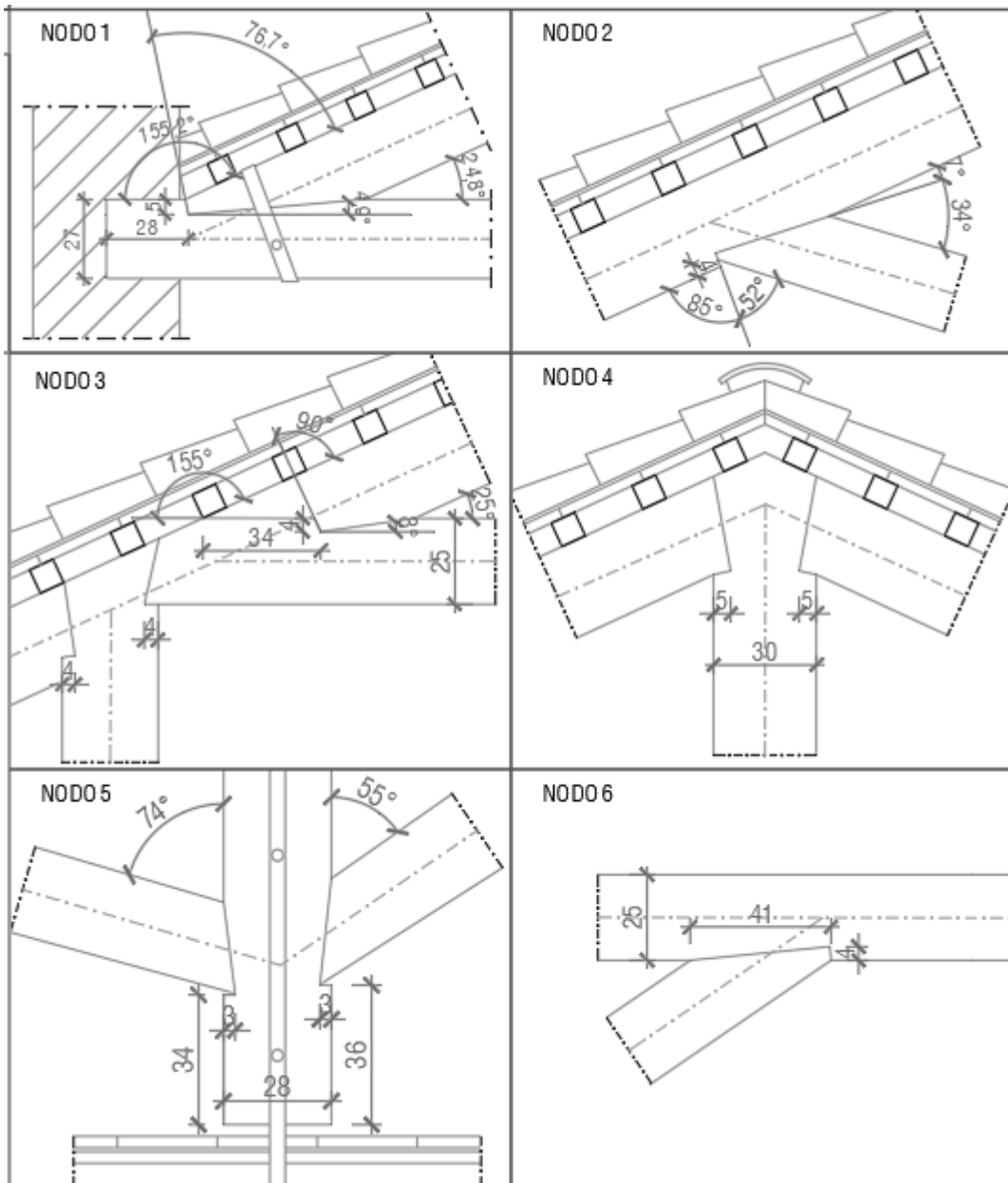


Fig. A.12: Capriata "Tipo A-C" - Rilievo geometrico dei principali nodi di carpenteria.



Fig. A.13: Capriata "Tipo A-C" - Rilievo fotografico dei principali nodi di carpenteria.

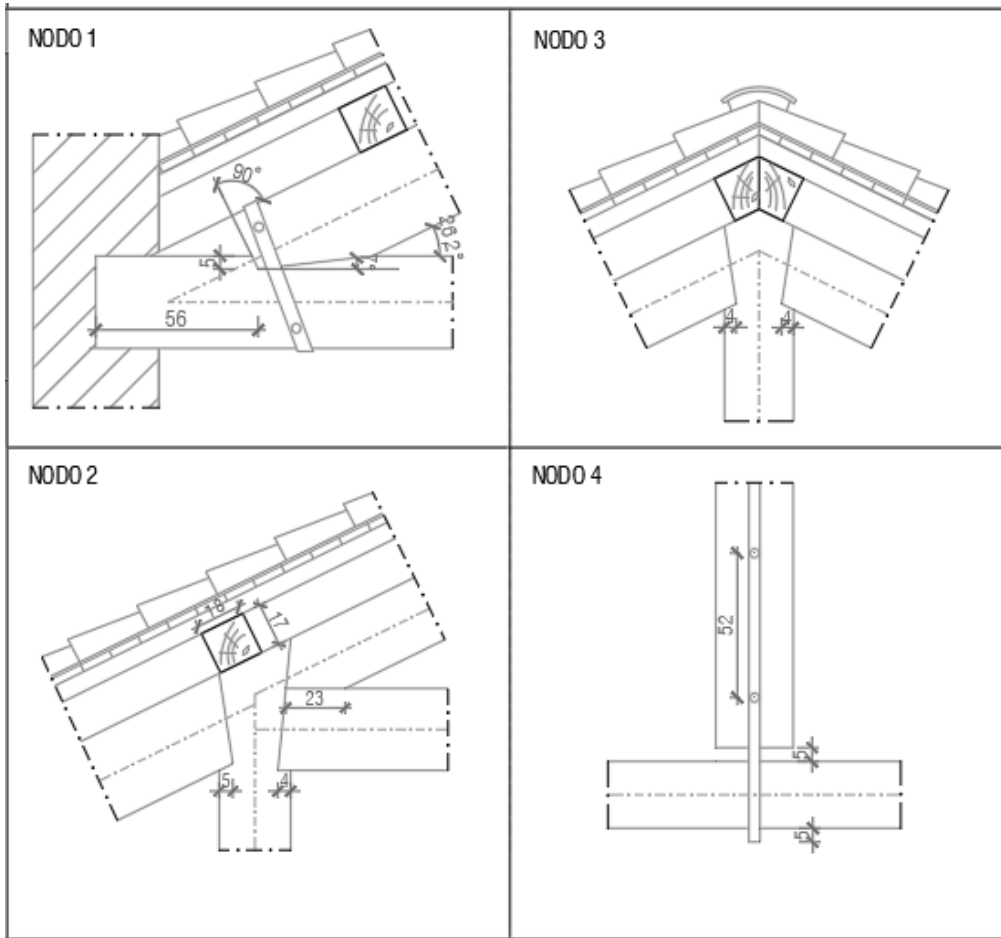


Fig. A.14: Capriata 'Tipo B' - Rilievo geometrico dei principali nodi di carpenteria.



Fig. A.15: Capriata 'Tipo B' - Rilievo fotografico dei principali nodi di carpenteria.

A.2 Schede di rilievo delle capriate lignee

Sono riportate in questa Appendice le schede di rilievo delle 31 capriate della copertura del corpo centrale di Villa Pisani, realizzate a partire dal brogliaccio di ispezione, secondo norma UNI 11119:2004. Ogni scheda include i dati seguenti:

- denominazione alfanumerica della capriata;
- identificazione delle aste e dei nodi;
- restituzione del rilievo geometrico e classificazione;
- restituzione del rilievo del degrado biotico e meccanico (fronte/retro);
- identificazione puntuale delle prove resistografiche.

Tutti gli elementi o le parti di elementi non visibili o non raggiungibili con alcuna tipologia di indagine, sono stati classificati come 'non ispezionabili'.

L'esito di tale operazione di schedatura ha consentito la definizione dello stato di conservazione di ogni singola capriata secondo una scala di valutazione articolata in:

- buono o con lievi anomalie locali;
- con anomalie distinguibili;
- con notevoli anomalie.

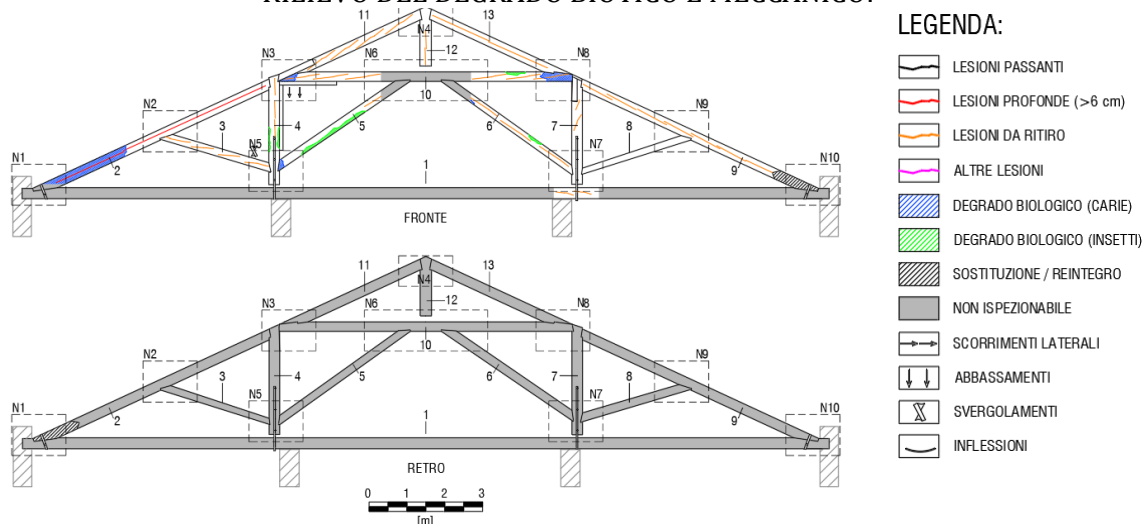
APPENDICE

SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A1

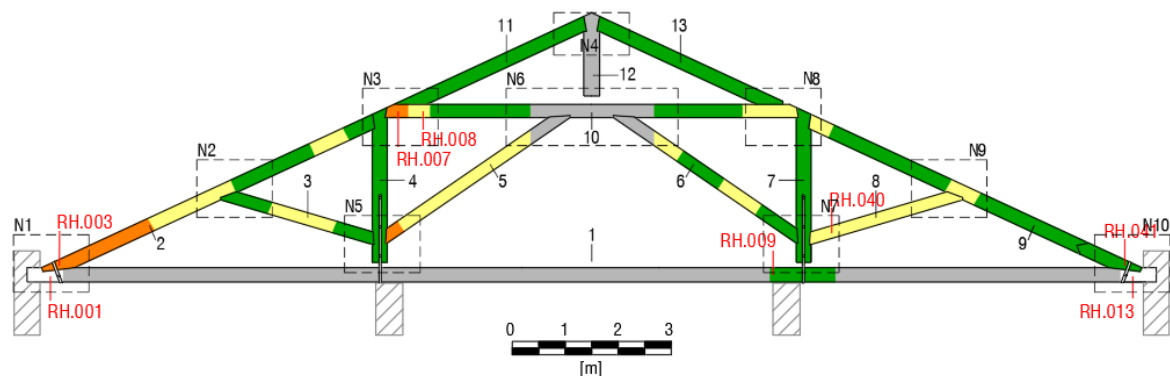
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	21	29	NR	NR	NR	NR	NR	PARZIALMENTE ISPEZIONABILE	1
2	19	27	NR	6 cm	0,20	-	<10%	TESTA TRAVE MARCIA, LATO NORD NON ISP.	2
3	14	24	2,850	RITIRO	0,10	-	≈10%	-	2
4	23	28	2,875	RITIRO	0,11	-	<10%	-	1
5	16	20	NR	RITIRO	0,15	-	<10%	MARCIA VERSO N5, N6 NON ISP.	1
6	16	20	3,970	RITIRO	0,15	-	<10%	-	1
7	17,5	25	2,870	RITIRO	0,11	-	15%	-	1
8	15	19	2,835	-	0,17	-	<10%	FORTE DEGRADO	1
9	21	25	NR	RITIRO	0,17	-	≈10%	SOSTITUZIONE TESTA TRAVE N10	2
10	16	25	NR	NR	NR	NR	NR	TESTA TRAVE AMMALORATA	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:



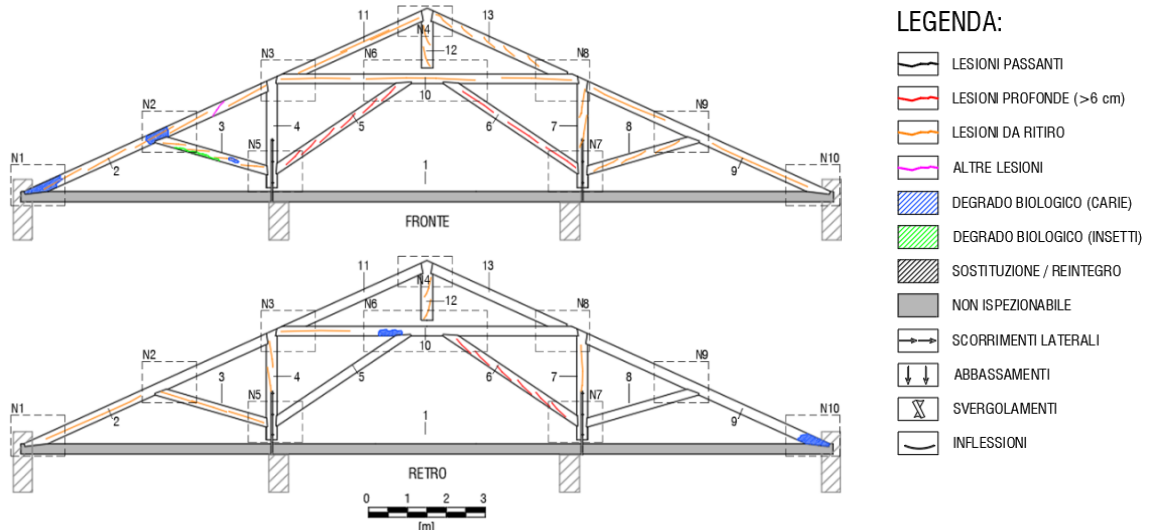
LEGENDA: ■ BUONO O CON LIEVI ANOMALIE LOCALI ■ CON ANOMALIE DISTINGUIBILI ■ CON NOTEVOLI ANOMALIE ■ NON ISPEZIONABILE

SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A2

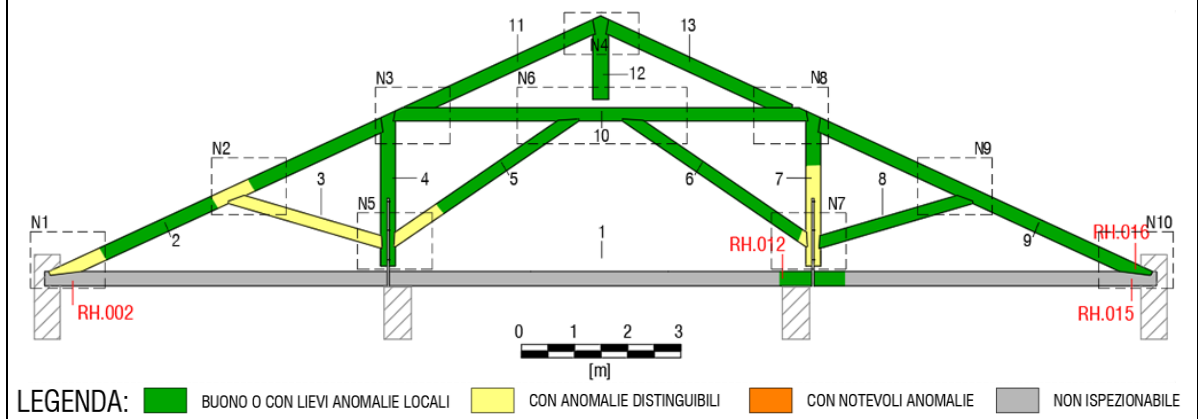
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	29	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	19	28	NR	RITIRO	0,15	-	≈10%	RIALZO N1	2
3	15	18	2,900	RITIRO	0,17	-	≈10%		2
4	22	30	2,845	RITIRO	0,07	-	<10%	LESIONI DA RITIRO PROFONDE 5 cm	1
5	15	18	3,950	RITIRO	0,11	-	≈10%	LESIONI DA RITIRO PROFONDE 6 cm	2
6	18	20	3,930	7,5 cm	0,17	-	<10%	RASTREMA VERSO NODO 7	2
7	18	24	2,815	RITIRO	0,17	-	20%	USURA LATO NORD	2
8	15	18	2,830	RITIRO	0,17	-	≈10%	SEZIONE IRREGOLARE	2
9	23	28	NR	RITIRO	0,17	-	<10%	USURA NOTEVOLE	1
10	15	26	NR	NR	NR	NR	NR		1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

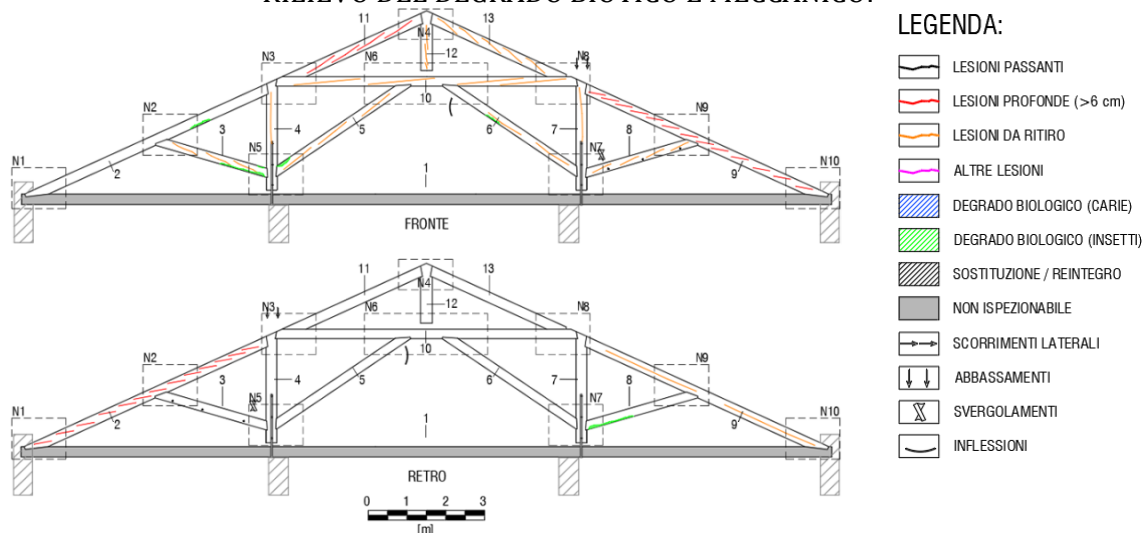


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A3

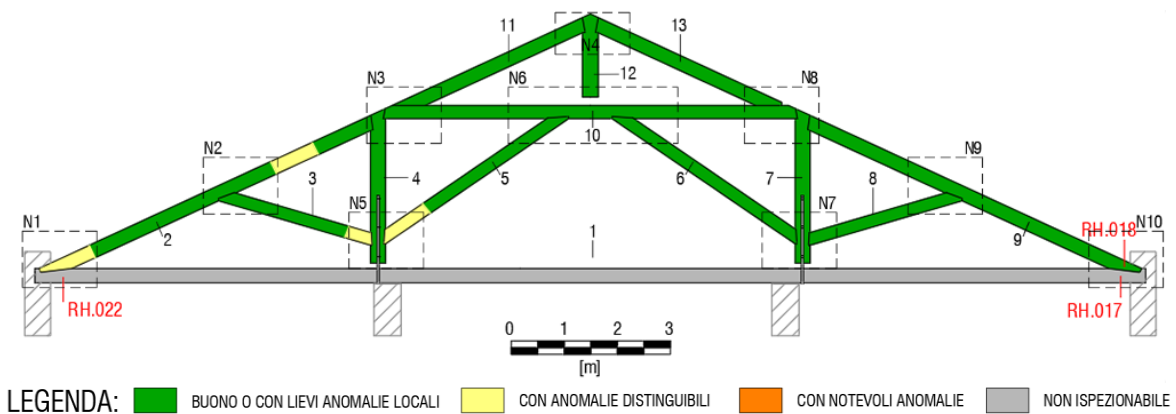
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	18	24	NR	RITIRO	0,22	0,23	<10%		2
3	17	21	2,865	RITIRO	0,18	-	≈10%		2
4	23	28	2,835	RITIRO	0,11	-	<10%	USURA LATO SUD	1
5	12	18	3,990	RITIRO	0,19	-	<10%	FORO PASSANTE A 2,14 m DA NODO 5, Ø 3 mm	3
6	13	20	3,960	RITIRO	0,18	-	<10%		1
7	20	27	2,715	RITIRO	0,18	-	≈10%	RIALZO, CEDIMENTO DEL MONACO, TETTO INFLESSO	2
8	16	20	2,825	RITIRO	0,13	-	≈10%	3 FORI PASSANTI	3
9	22	29	NR	RITIRO	0,22	-	≈10%	LESIONI 7 cm, PRESENZA SACCHE DI RESINA	3
10	15	25	NR	NR	NR	NR	NR		1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

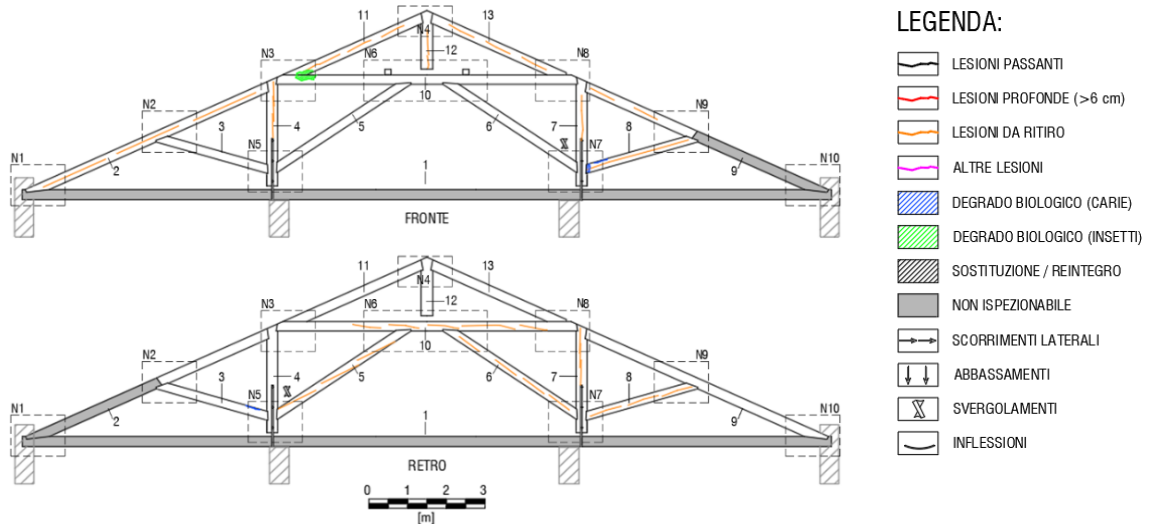


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A4

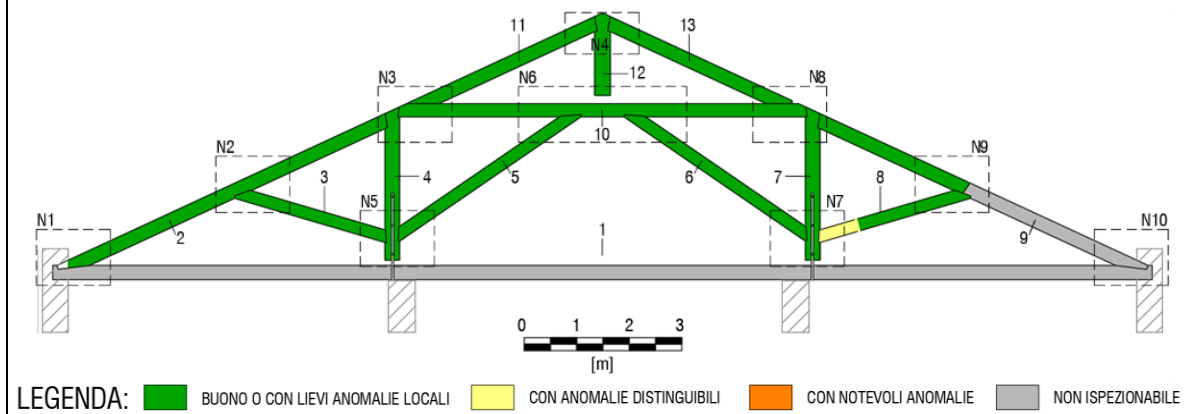
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	21	27	NR	RITIRO	0,14	0,17	<10%		1
3	15	21	2,845	RITIRO	0,24	-	<10%	SEZ. DA QUADRATA A CIRCOLARE VERSO IL N2	2
4	28	28	2,850	RITIRO	0,14	-	<10%	USURA LATO NORD	1
5	14	18	3,990	RITIRO	0,11	-	<10%		1
6	15	22	3,955	RITIRO	0,20	-	>20%	FIBRA RITORTA, NON CLASSIFICABILE AL SUONO	3
7	22	28	2,780	RITIRO	0,14	-	<10%	LESIONE ATTRAVERSA UN NODO	2
8	14,5	19	2,855	RITIRO	0,17	-	<10%		1
9	22	26	NR	RITIRO	0,15	-	<10%	RINFORZO SU N10, USURA LATO SUD	1
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

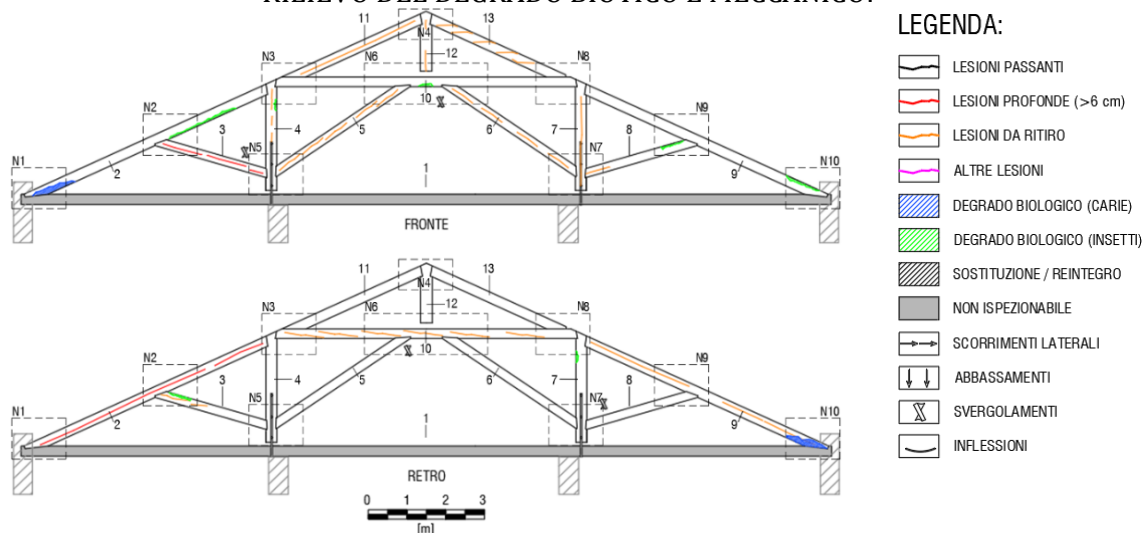


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A5

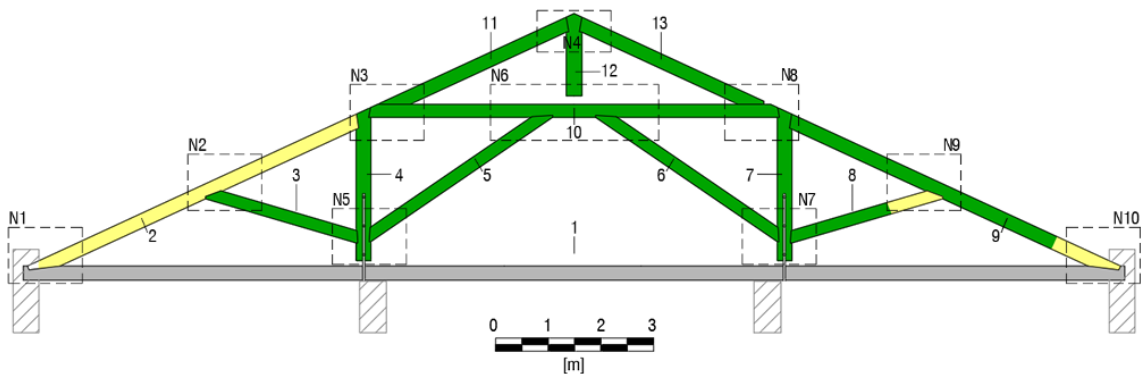
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	21	28	NR	NR	NR	NR	NR	LIEVI SMUSSI DA USURA DOVE ISPEZIONATO	1
2	23	28	NR	RITIRO	0,17	-	<10%	PRESENZA INSETTI, SMUSSI DA USURA	1
3	17	25	2,860	RITIRO	0,16	-	<10%	LESIONI 6 cm, SVERGOLA SU N4	1
4	22	27	2,860	RITIRO	0,20	-	<10%	USURA LATO SUD	2
5	13,5	19,5	3,990	RITIRO	0,19	-	<10%	-	1
6	16	18	4,005	RITIRO	0,17	-	≈10%	SVERGOLA SU NODO 6	2
7	22	29	2,870	RITIRO	0,16	-	<10%	USURA LATO NORD	1
8	15	16,5	2,905	RITIRO	0,20	-	≈10%	-	2
9	21	27,5	NR	RITIRO	0,14	-	<10%	LESIONI 7 cm, PRESENZA INSETTI IN TESTA TRAVE	3
10	16,5	22,5	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:



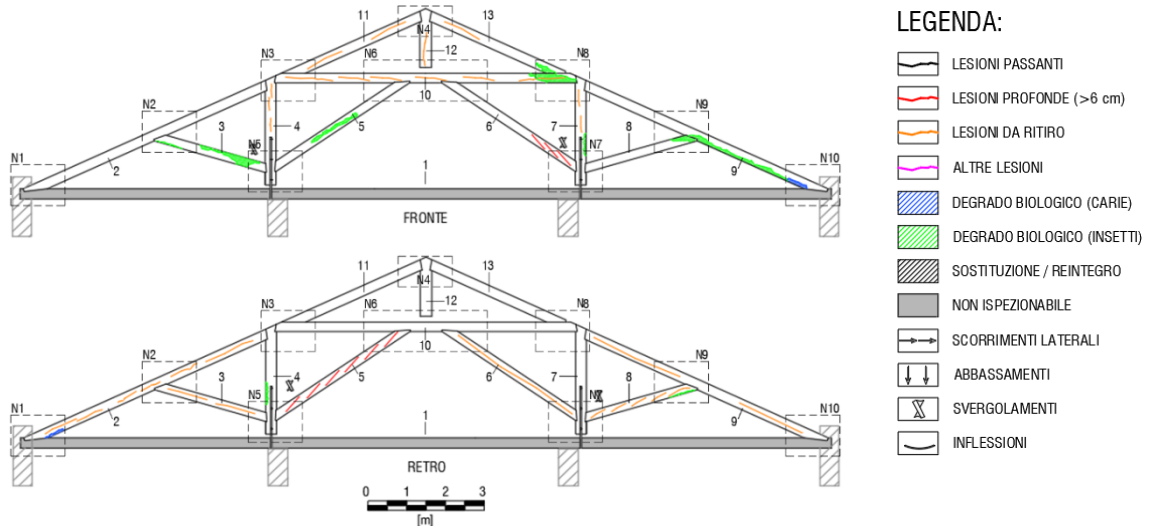
LEGENDA: ■ BUONO O CON LIEVI ANOMALIE LOCALI ■ CON ANOMALIE DISTINGUIBILI ■ CON NOTEVOLI ANOMALIE ■ NON ISPEZIONABILE

SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A6

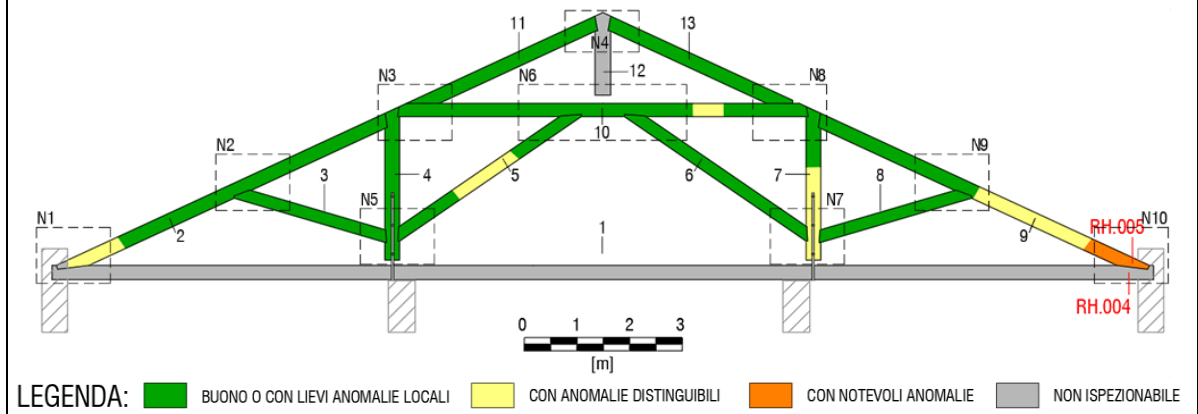
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	20	26,5	NR	RITIRO	0,14	0,19	<10%	USURA LATO SUD	1
3	15	18	2,925	RITIRO	0,20	-	≈10%	FORTEMENTE AMMALORATA	2
4	22	27,5	2,835	RITIRO	0,11	-	<10%	USURA LATO NORD	1
5	14,5	19	3,975	RITIRO	0,18	-	<10%	ROTAZIONE SUL PROPRIO ASSE	1
6	13	19	3,980	RITIRO	0,18	-	15%	LESIONI DA RITIRO PROFONDE	2
7	22	27	2,855	RITIRO	0,15	-	<10%	-	1
8	15	21,5	2,855	RITIRO	0,27	-	<10%	LOCALI SITUAZIONI DI DEGRADO	2
9	21	24	NR	RITIRO	0,15	-	<10%	LOCALI SMUSSI DA USURA (LIEVI)	1
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

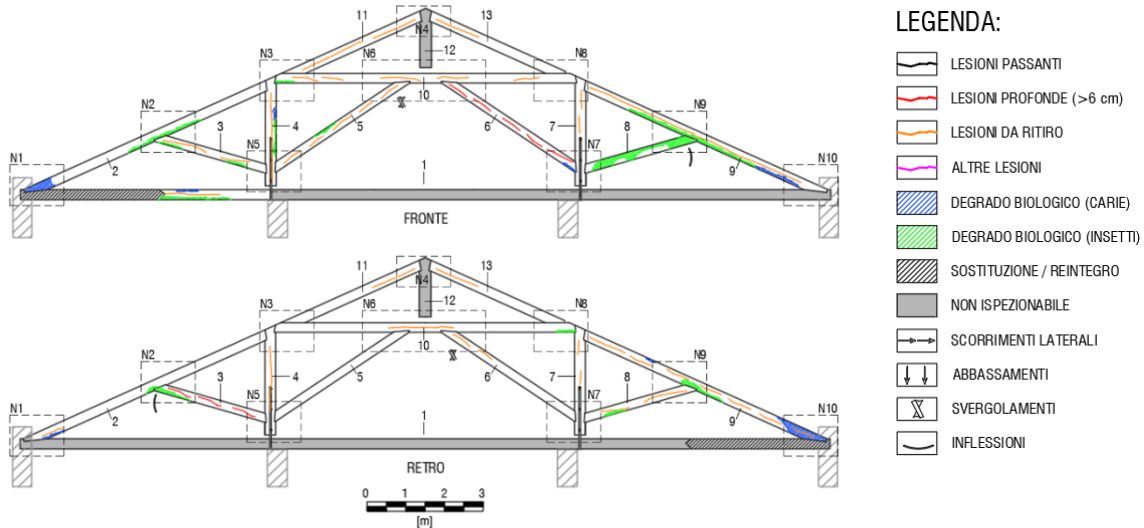


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A7

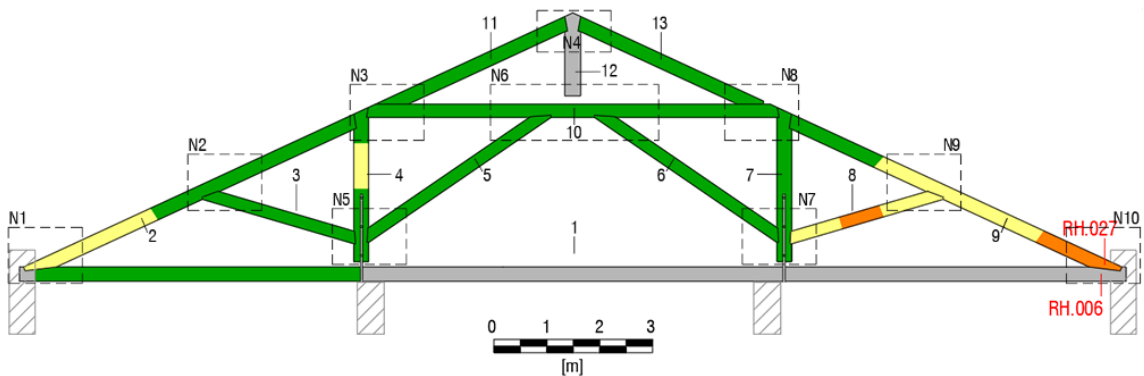
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	TESTA CATENA SOSTITUITA SU N1 (VANO SCALA)	1
2	22	27,5	NR	RITIRO	0,18	-	<10%	-	1
3	16	24	2,840	RITIRO	0,13	-	≈10%	LESIONI PARALLELE SU DUE FACCE	2
4	21	28	2,855	RITIRO	0,17	-	<10%	LOCALI SMUSSI DA USURA/DEGRADO	1
5	15,5	19,5	3,980	RITIRO	0,20	0,23	<10%	-	1
6	14,5	22	3,920	7 cm	0,14	0,30	<10%	LESIONI PROFONDE FINO A 6-7 cm	3
7	21,5	27,5	2,855	RITIRO	0,13	-	<10%	USURA LATO NORD	1
8	17	19	2,855	7,5 cm	0,21	-	<10%	FORTE DEGRADO, FORO INCLINATO A 10,85 CM DA N7	3
9	21,5	28,5	NR	RITIRO	0,16	-	<10%	TESTA TRAVE MOLTO AMMALORATA	1
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:



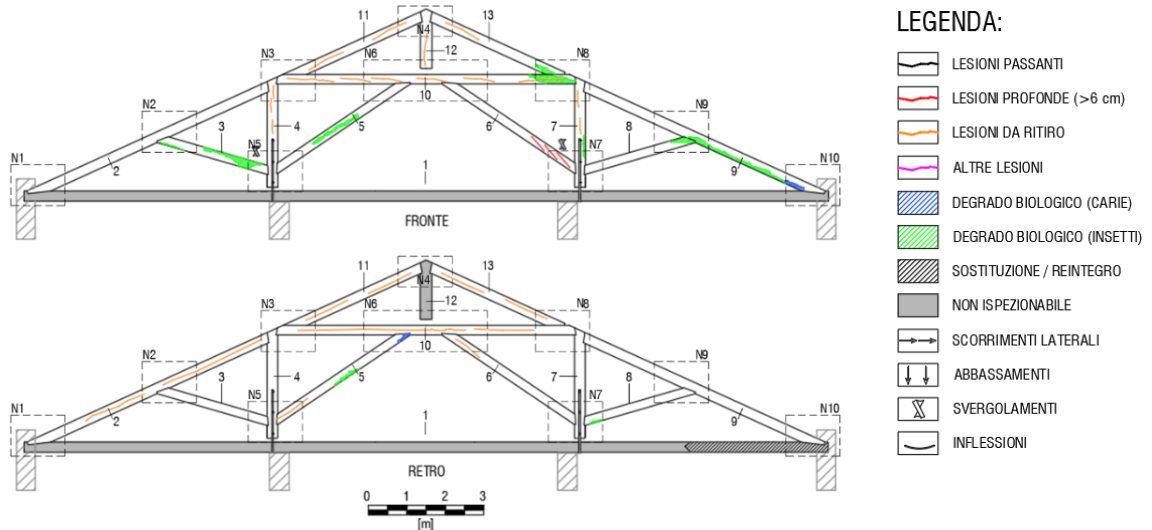
LEGENDA: ■ BUONO O CON LIEVI ANOMALIE LOCALI ■ CON ANOMALIE DISTINGUIBILI ■ CON NOTEVOLI ANOMALIE ■ NON ISPEZIONABILE

SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A8

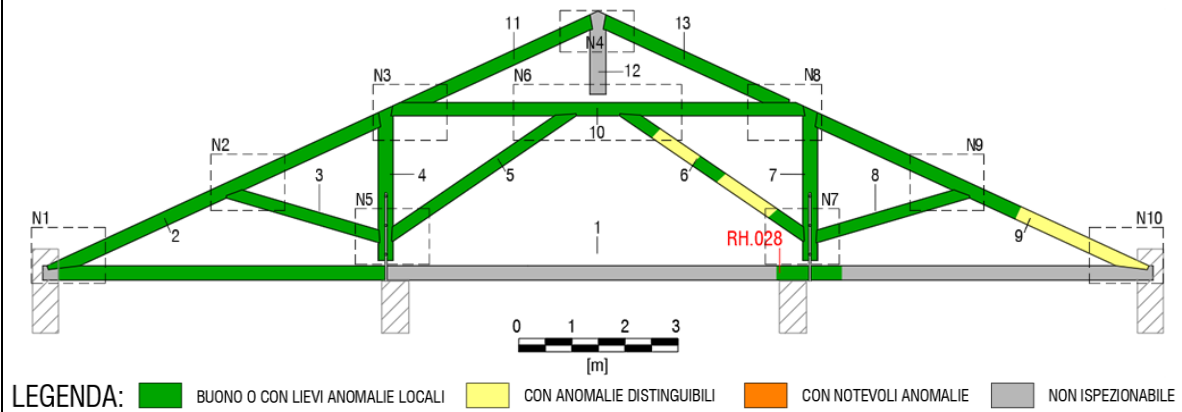
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	21	29	NR	NR	NR	NR	NR	ESEGUITO RESISTOGRAPH SU ISPEZIONE N7	1
2	20	28	NR	RITIRO	0,13	-	<10%	LOCALE UMIDITA' SU NODO 2	1
3	16	20	2,890	RITIRO	0,10	-	≈10%		2
4	21	25,5	2,845	RITIRO	0,19	-	<10%	SMUSSI LOCALI DA USURA, USURA LATO SUD	1
5	14	19	3,940	RITIRO	-	-	<10%		1
6	12	18,5	3,970	RITIRO	0,13	-	<10%	INSETTI, CARIE SU N6	1
7	21	30	2,860	9,5 cm	0,19	0,13	<10%	LESIONI DA RITIRO PROFONDE 9,5 cm	3
8	14	19	2,282	RITIRO	0,18	-	≈10%	RIDUZIONE SEZIONE A CM 50 DA N8	2
9	24	28	NR	RITIRO	0,17	-	<10%		1
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

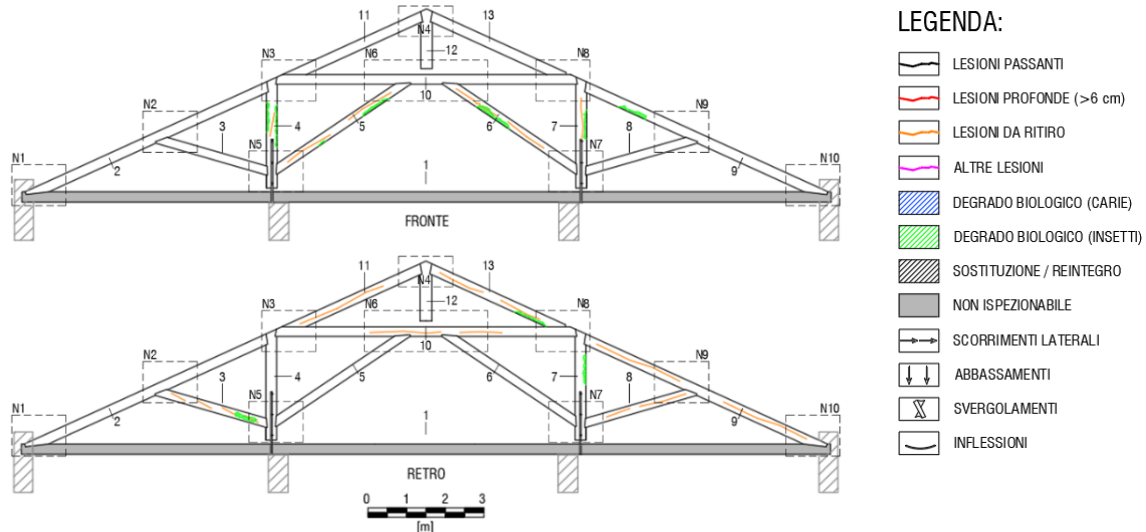


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A9

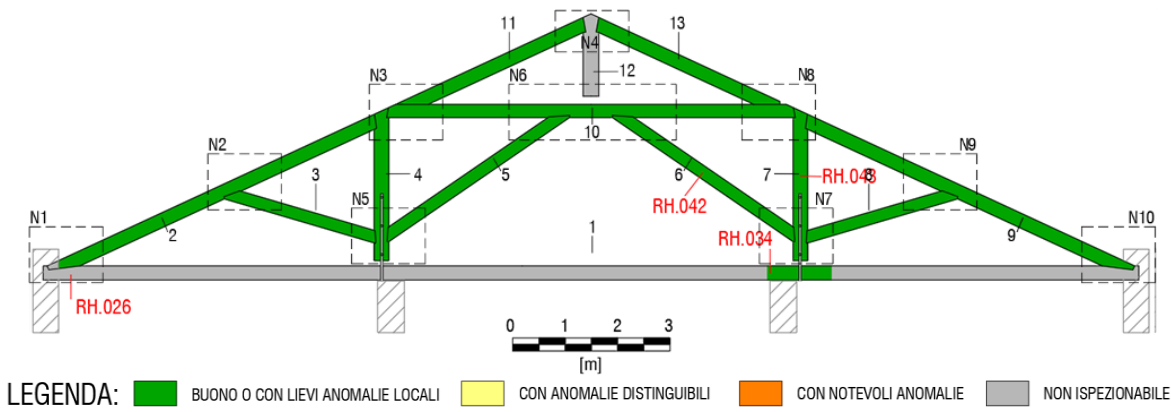
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	22	27	NR	NR	NR	NR	NR	ESEGUITO RESISTOGRAPH TESTE EST/OVEST	1
2	24	28	NR	RITIRO	0,11	-	≈10%	-	2
3	14	18	2,830	RITIRO	0,17	-	≈10%	FORO A 131 CM DA NODO 5 DI DIAMETRO 2,5 CM	3
4	18	25	2,850	RITIRO	0,16	-	15%	-	2
5	13,5	21	3,010	RITIRO	0,21	-	<10%	RASTREMA VERSO N5	2
6	13	19	3,980	RITIRO	0,14	-	<10%	FORO A 145 CM DA N7	3
7	22	26,5	2,830	RITIRO	0,11	-	<10%	-	1
8	16	20	2,890	RITIRO	0,17	-	≈15%	-	2
9	20	28	NR	RITIRO	0,07	-	≈10%	-	2
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

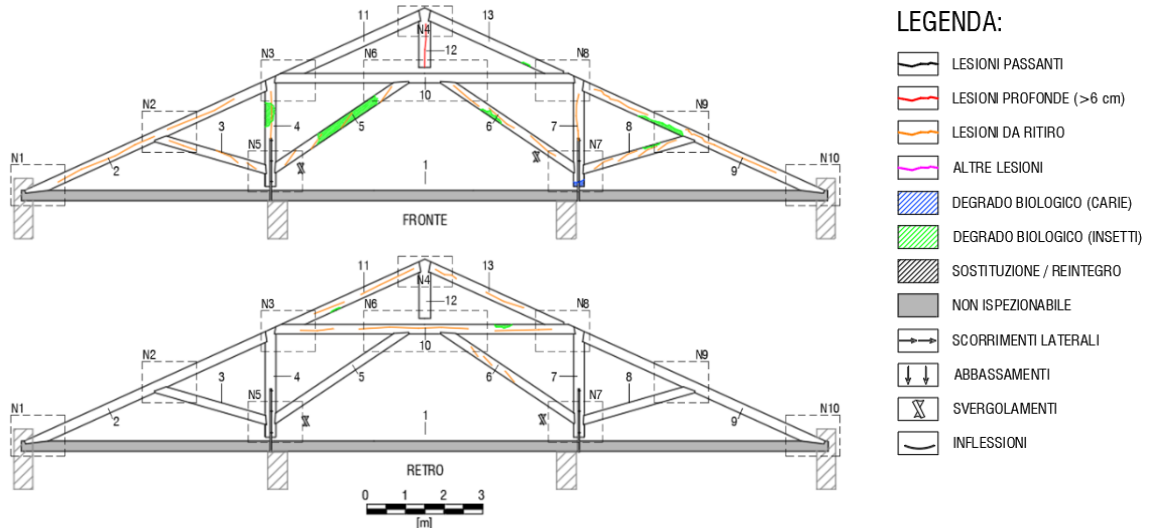


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A10

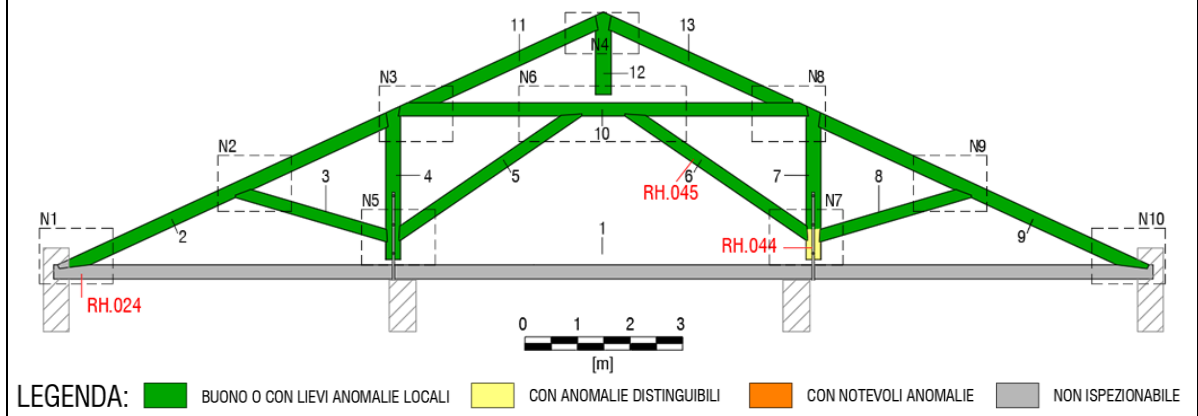
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	23	30	NR	NR	NR	NR	NR	ISPEZIONATO	1
2	22	28	NR	RITIRO	0,18	-	≈10%	-	2
3	15	19	2,870	RITIRO	0,13	-	≈15%	-	2
4	23,5	28	2,865	RITIRO	0,13	0,13	<10%	-	1
5	16	22	3,930	RITIRO	0,14	-	>20%	FIBRA RITORTA	2
6	15	21,5	3,915	RITIRO	0,17	0,33	≈10%	LOCALI INTAGLI, TESTA N7 DEGRADATA	2
7	19	26	2,855	RITIRO	0,16	-	≈20%	IMPERFEZIONE GEOM. A 70 CM DA NODO 8	2
8	15	19	2,870	RITIRO	0,27	-	≈15%	RASTREMA SU N9	2
9	23	28,5	NR	RITIRO	0,13	0,22	<10%	-	1
10	16	25	NR	RITIRO	0,16	-	<10%	-	1
11	17	20	NR	RITIRO	NR	NR	<10%	-	1
12	21	27	1,340	RITIRO	NR	NR	<10%	LESIONI IMPORTANTI (PROF. 9,5 cm AMBO LATI)	3
13	17	20,5	NR	RITIRO	NR	NR	<10%	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

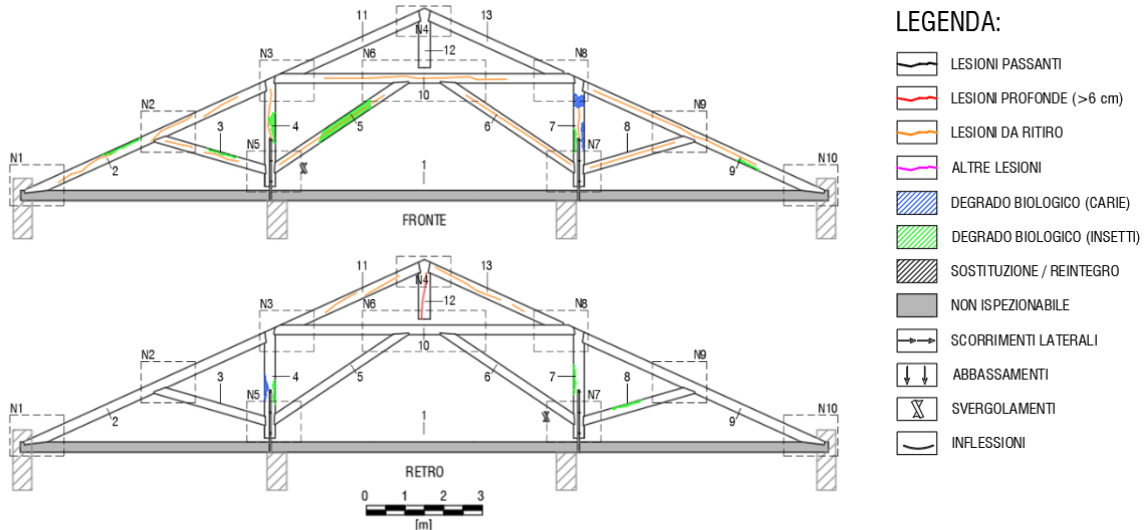


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A11

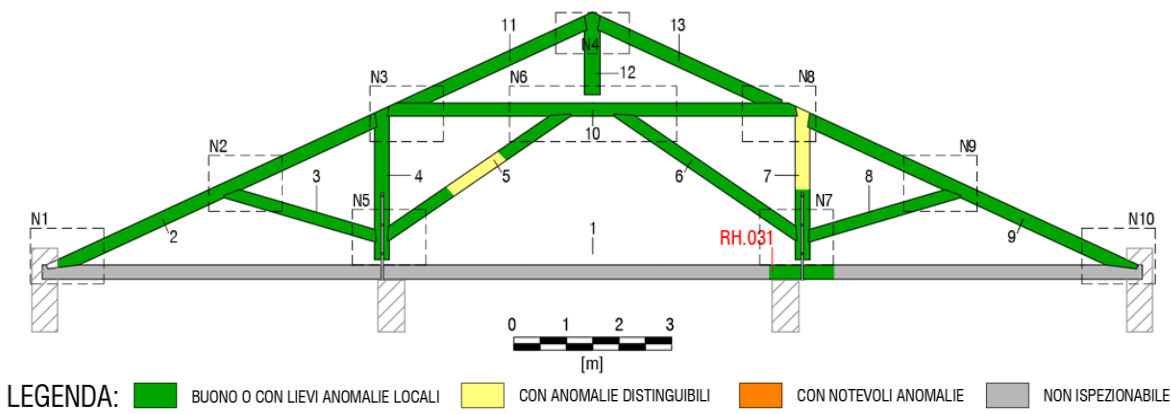
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	24	29	NR	NR	NR	NR	NR	ISPEZIONABILE SOLO IN UN PUNTO	1
2	25	28	NR	RITIRO	0,22	0,28	≈10%		2
3	15	20	2,830	RITIRO	0,10	-	<10%		1
4	22	27	2,860	RITIRO	0,18	-	<10%	USURA LATO SUD	1
5	18	21	3,960	RITIRO	0,39	-	<10%	IRREGOLARE, SMUSSI LOCALI, PRINCIPI FIBRA RITORTA	3
6	17,5	19	3,950	RITIRO	-	-	<10%	ELEVATA PRESENZA DI NODI	1
7	22	28	2,850	RITIRO	0,14	-	<10%	A META' TRAVE LA SEZIONE SI RIDUCE CON SMUSSO	1
8	14	19	2,840	RITIRO	0,21	-	<10%		2
9	24	28	NR	RITIRO	0,17	-	≈10%	LESIONI PROF. 7 cm, COPERTURA INFLESSA	3
10	17	25	NR	RITIRO	0,15	NR	<10%		1
11	16	22	NR	RITIRO	0,18	NR	<10%		1
12	24,5	26	1,325	RITIRO	0,12	NR	<10%	LESIONI DA RITIRO PROFONDE FINO A 12 cm	3
13	17	21,5	NR	RITIRO	NR	NR	≈10%		2

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

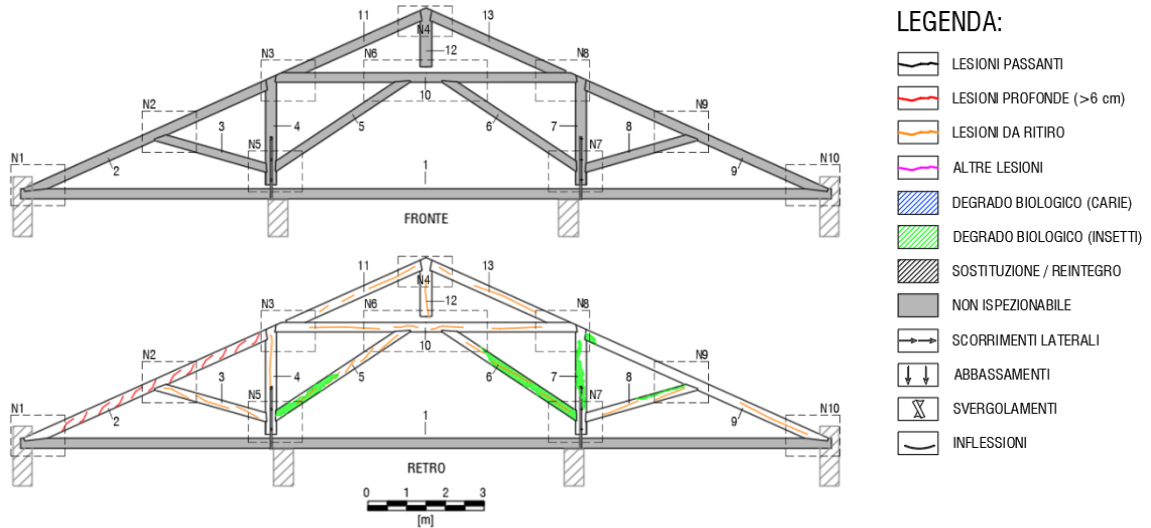


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA A12

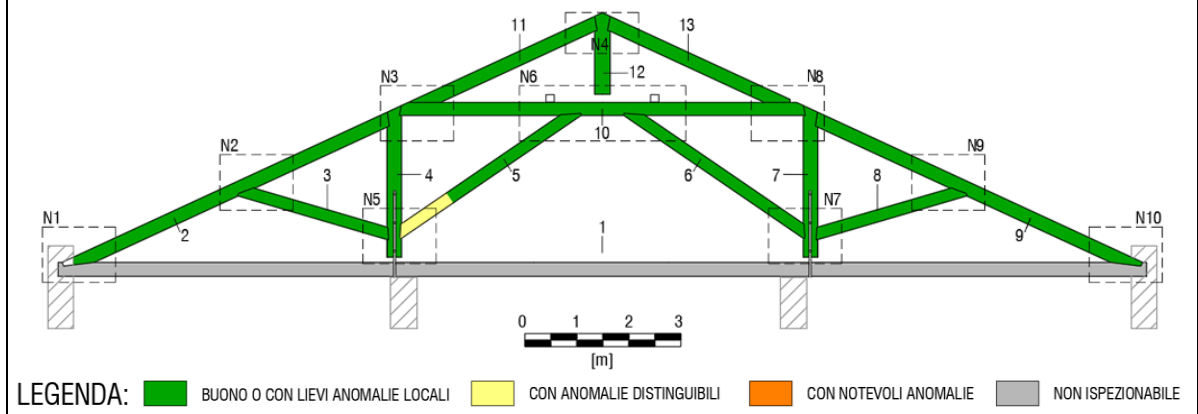
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	RINFORZO NODO 10	1
2	21,5	22,5	NR	RITIRO	0,19	-	≈10%	RIALZO DOPPIO (25 cm), COPERTURA INFLESSA	2
3	14,5	18	2,860	RITIRO	0,28	0,26	≈10%	RASTREMA LIEVEMENTE VERSO NODO 2	2
4	21	27	2,850	-	0,17	-	≈10%	LOCALI SMUSSI DA USURA	2
5	12,5	18	3,870	RITIRO	0,15	-	<10%		1
6	15	20	3,985	RITIRO	0,17	0,20	≈10%	LESIONI PROF. 5,5 cm, DEGRADO MARCATO	2
7	22	28	2,880	RITIRO	0,13	-	<10%	USURA LATO SUD	1
8	19	19	3,030	RITIRO	0,16	-	≈10%	PRINCIPI FIBRA RITORTA	2
9	22	29	NR	RITIRO	0,14	-	>20%	LESIONI PROF. 9 cm, LIEVE DEGRADO SU TESTA TRAVE	3
10	18	25	NR	RITIRO	NR	NR	<10%		1
11	19,5	27,5	NR	RITIRO	NR	NR	<10%		1
12	20,5	27	1,345	RITIRO	NR	NR	<10%	PRESENZA DI UNA STAFFA DIAGONALE	1
13	20	27	NR	RITIRO	NR	NR	<10%		1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

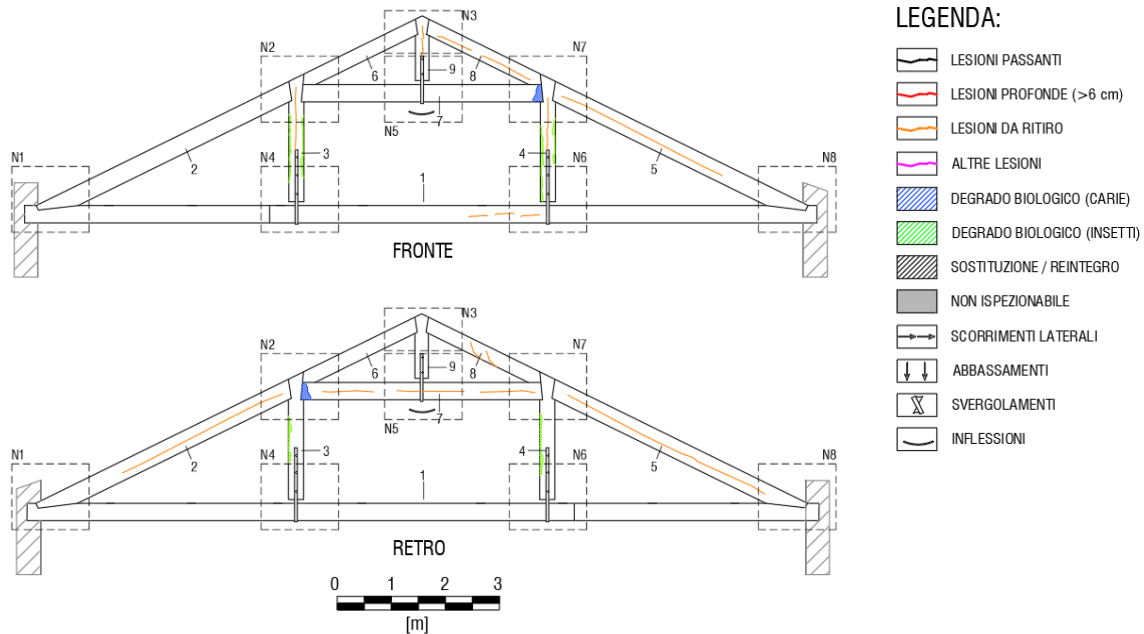


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B1

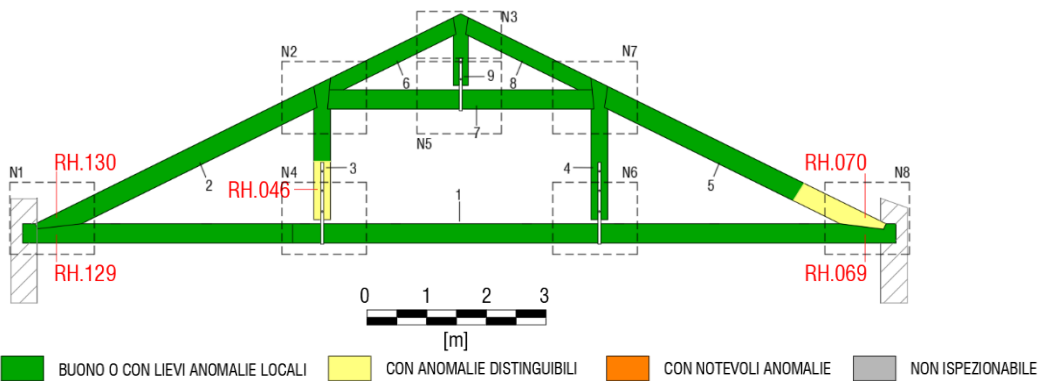
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	24	29	NR	RITIRO	0,07	-	<10%	CUNEO DARDO DI GIOVE SOLLEVATO	1
2	21	32	4,805	RITIRO	0,11	-	<10%	USURA LATO SUD	1
3	21	28	2,275	RITIRO	0,16	0,22	<10%	INSETTI	1
4	21,5	29	2,260	RITIRO	0,18	-	<10%	USURA ED INSETTI	1
5	22,5	34,5	4,800	RITIRO	0,12	-	<10%	TESTA TRAVE UMIDA	1
6	21	26	2,210	RITIRO	0,24	-	20%	FIBRARITORTA	3
7	22	28	4,420	RITIRO	0,18	0,18	<10%	INFLESSIONE IN MEZZERIA, RESINA ED USURA	1
8	23	25	2,230	RITIRO	0,16	0,26	<10%	-	1
9	23	29	1,130	RITIRO	0,09	-	<10%	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

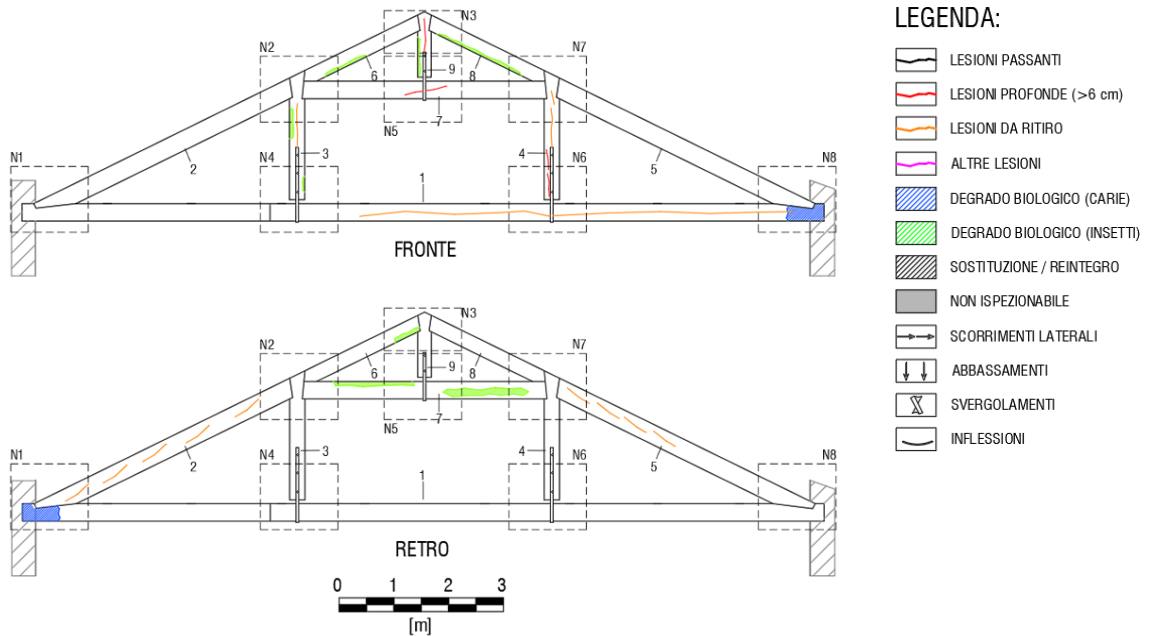


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B2

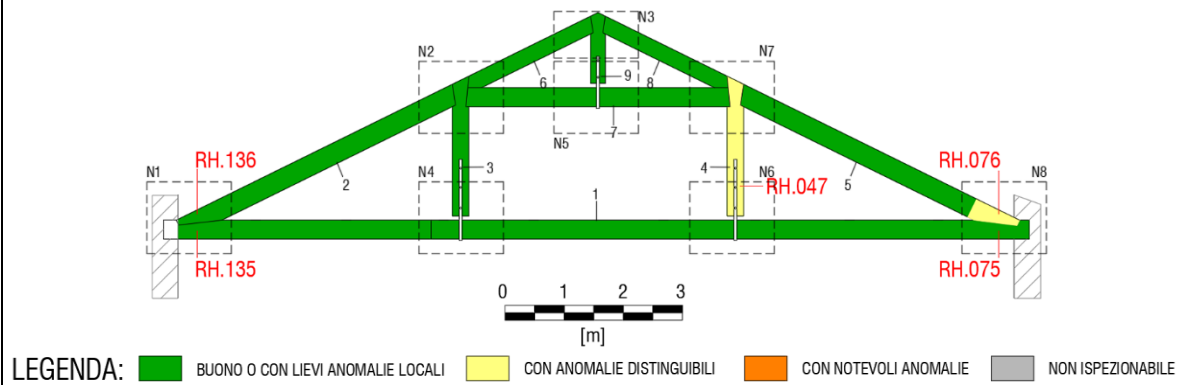
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
	n°	B		H	LESIONI	NODI	GR.NODI		
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	24	30	NR	RITIRO	-	-	<10%	TESTA TRAVE A DX UMIDA, VERIFICARE DARDO DI GIOVE	1
2	22,5	31	4,785	RITIRO	0,13	-	<10%	-	1
3	22	30	2,230	RITIRO	0,07	-	<10%	INSETTI LATO SX	1
4	22	28	2,200	RITIRO	0,16	-	≈10%	FORO PASSANTE DIAGONALE SX	3
5	22	33	4,810	RITIRO	0,05	-	<10%	-	1
6	23	25,5	2,240	RITIRO	0,12	0,28	<10%	-	1
7	22,5	31	4,445	RITIRO	0,23	0,29	≈10%	LESIONI DA RITIRO (PROF. 7 cm)	3
8	23,5	29	2,270	RITIRO	0,10	0,19	<10%	-	1
9	22	27,5	1,115	RITIRO	0,11	-	<10%	LESIONI DA RITIRO (PROF. 9 cm)	3

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

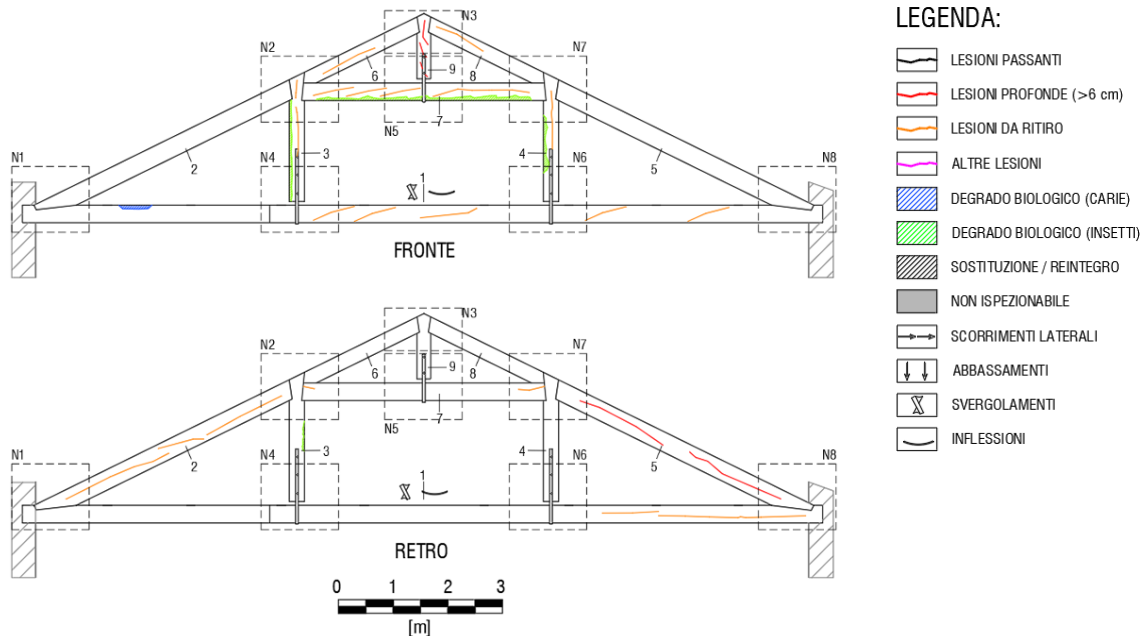


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B3

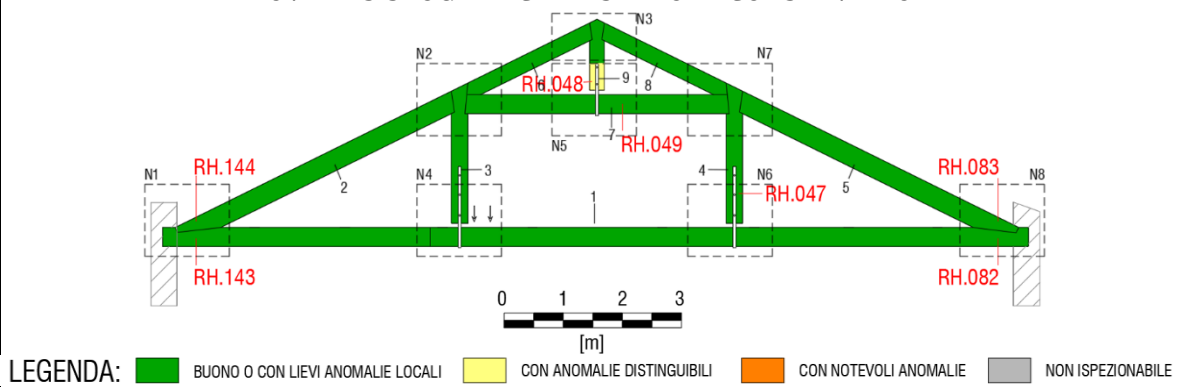
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
	n°	B		H	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	26,5	32	NR	RITIRO	0,11	-	≈15%	FIBRA RITORTA	3
2	24	33	4,805	RITIRO	0,21	-	<10%	PROBABILE SOSTITUZIONE	2
3	21,5	29	2,200	RITIRO	0,12	-	<10%	DEGRADO, UMIDITA', MONACO-CATENA QUASI A CONTATTO	1
4	21	28,5	2,180	RITIRO	0,14	-	<10%	PROBABILE SOSTITUZIONE	1
5	22	33	4,790	RITIRO	0,08	-	<10%	LESIONE IN MEZZERIA CON INCL 35%	3
6	22,5	27,5	2,270	RITIRO	0,18	-	<10%	-	1
7	23,5	28,5	4,400	RITIRO	0,07	-	≈15%	PRINCIPI FIBRA RITORTA	2
8	21	27,5	2,280	RITIRO	0,26	-	<10%	-	2
9	22	27	1,120	RITIRO	0,11	0,20	20%	LAVORAZIONE GROSSOLANA, PRINCIPI FIBRA RITORTA, RESINA	3

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

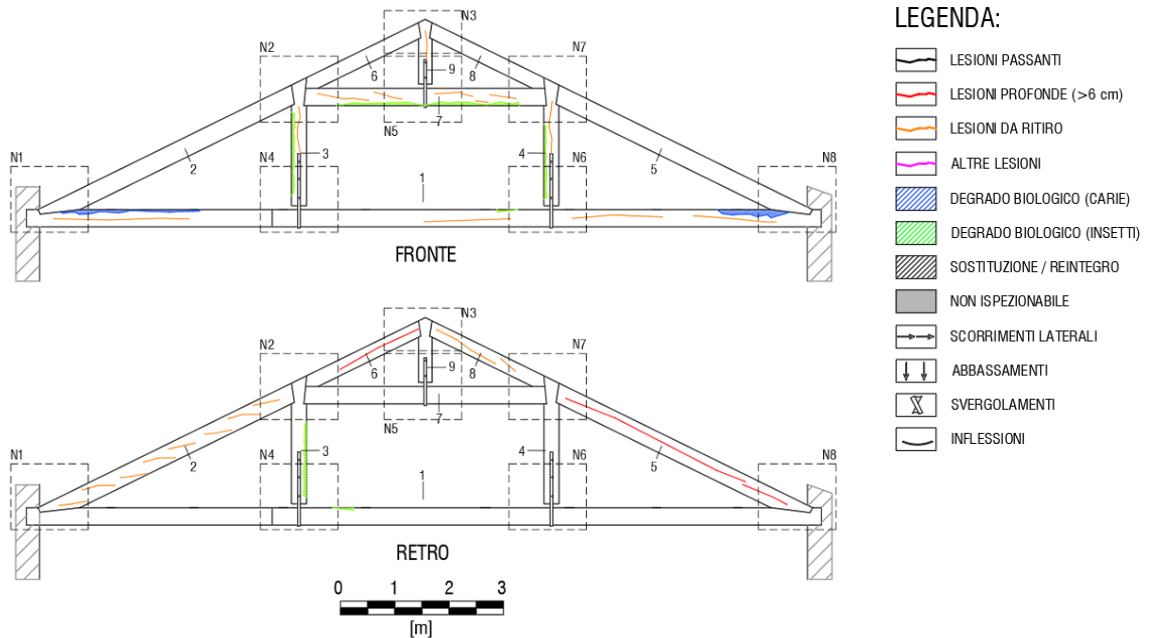


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B4

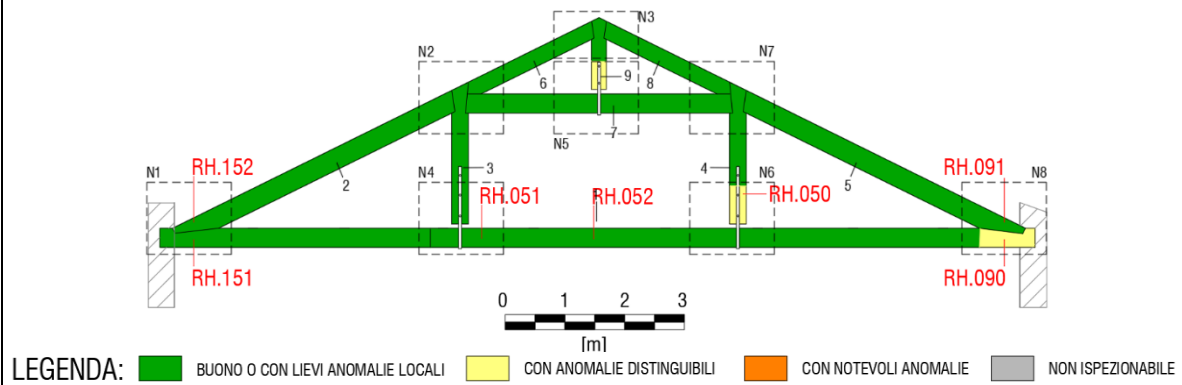
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCHE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
	n°	B		H	LESIONI	NODI	GR.NODI		
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	27,5	28,5	NR	RITIRO	0,14	-	<10%	INSETTI SU CUNEO DARDO DI GIOVE	1
2	21	33,5	4,830	RITIRO	0,06	-	≈10%	PROBABILE SOSTITUZIONE	1
3	21,5	27,5	2,185	RITIRO	0,28	0,30	<10%	LOCALI SMUSSI DA USURA	2
4	20,5	29	2,205	RITIRO	0,17	-	≈10%	UMIDITÀ	1
5	23	32,5	4,770	RITIRO	0,12	-	<10%	PROBABILE SOSTITUZIONE	1
6	22	24,5	2,190	RITIRO	0,22	-	<10%	RESINA, LAVORAZIONE IRREGOLARE	2
7	22,5	27,5	4,400	RITIRO	0,16	0,17	<10%	RESINA	1
8	23	26	2,260	RITIRO	-	-	<10%	PROFONDITA' LESIONI DA RITIRO FINO AD 8 cm	3
9	23,5	27,5	1,105	RITIRO	0,15	0,30	<10%	IRREGOLARE, UMIDITÀ	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

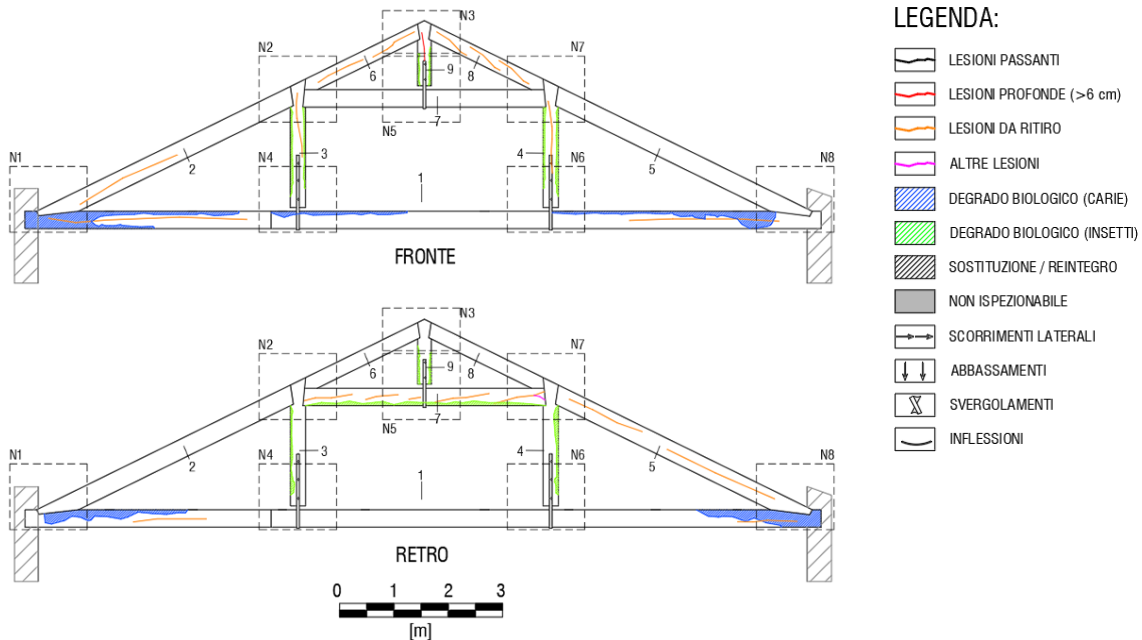


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B5

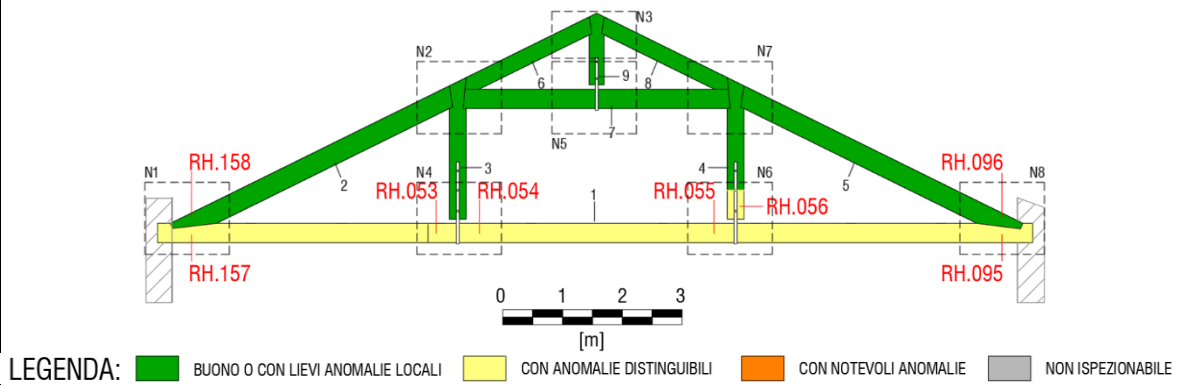
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	27,5	30,5	NR	RITIRO	0,13	-	<10%	DEGRADO SUPERFICIALE, INSETTI SU CUNEO DARDO DI GIOVE	1
2	22,5	34	4,780	RITIRO	0,13	-	≈15%	PROBABILE SOSTITUZIONE	2
3	20,5	29	2,190	RITIRO	0,17	-	<10%	LATO OVEST DEGRADATO	1
4	22	28	2,230	RITIRO	0,11	-	<10%	LOCALI SMUSSI DA USURA, LATO EST USURATO	1
5	23	33	4,800	RITIRO	0,06	-	<10%	PROBABILE SOSTITUZIONE	1
6	22	24	2,260	RITIRO	0,23	-	<10%	LAVORAZIONE IRREGOLARE	2
7	22	29,5	4,370	RITIRO	0,19	-	≈10%	BIFORCAZIONE DI UNA LESIONE IN TESTA TRAVE	3
8	22,5	26,5	2,250	RITIRO	0,18	-	20%	RESINA, NON RILEVABILE LA PARTE ALTA	2
9	20,5	25,5	1,130	RITIRO	0,17	-	<10%	LESIONI DA RITIRO (PROF. 11 cm), RESINA	3

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

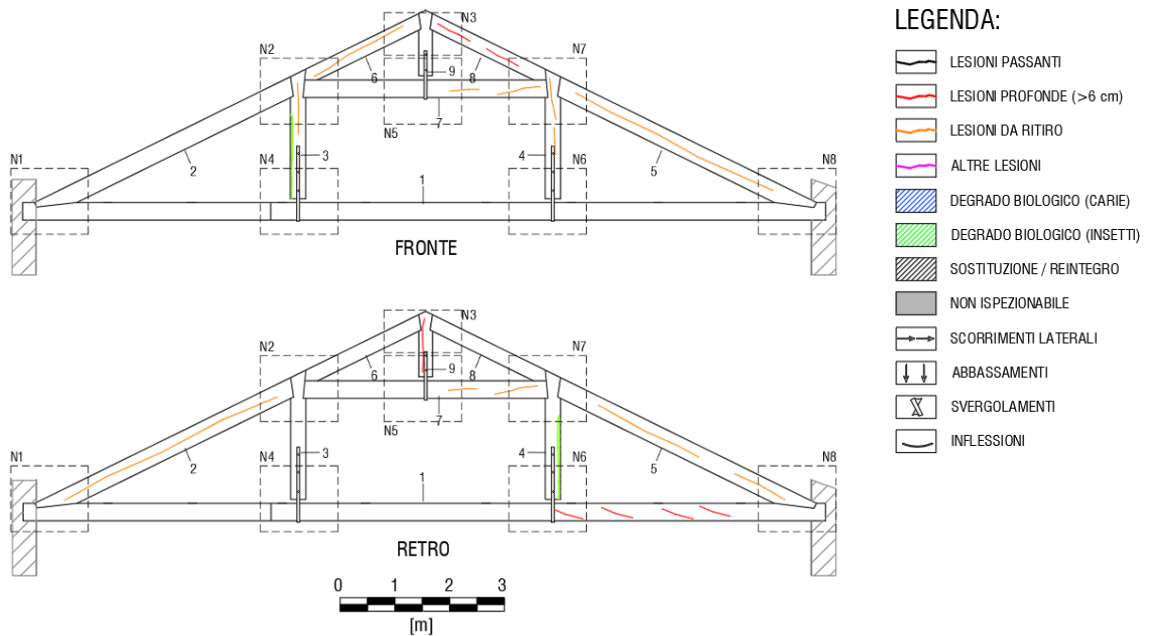


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B6

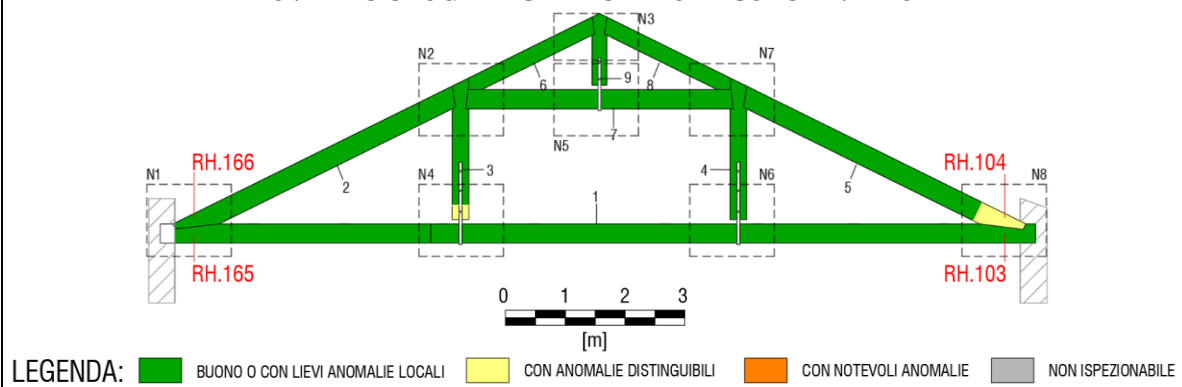
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCHE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
	n°	B		H	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	26,5	27,5	NR	RITIRO	0,13	-	20%	FIBRA RITORTA	2
2	23	32	4,810	RITIRO	0,17	-	<10%	-	1
3	21,5	29,5	2,160	RITIRO	0,16	-	<10%	INSETTI ED USURA SPIGOLO ALTO SX	1
4	22	28,5	2,200	RITIRO	0,18	-	20%	SOSTITUZIONE, LOCALI SMUSSI DA USURA	2
5	23	32	4,750	RITIRO	0,09	-	<10%	PROBABILE SOSTITUZIONE	1
6	23	26	2,240	RITIRO	0,11	-	≈10%	-	1
7	22	29	4,400	RITIRO	0,21	-	≈15%	INFLESSA VERSO IL BASSO E VERSO NORD, PRESENZA RESINA	2
8	23,5	25	2,260	RITIRO	0,17	0,26	≈15%	LESIONI DA RITIRO (PROF. 7 cm)	2
9	22,5	28,5	1,130	RITIRO	0,12	-	<10%	CADUTA CHIODI DELLA STAFFA DURANTE LA PROVA SONORA	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

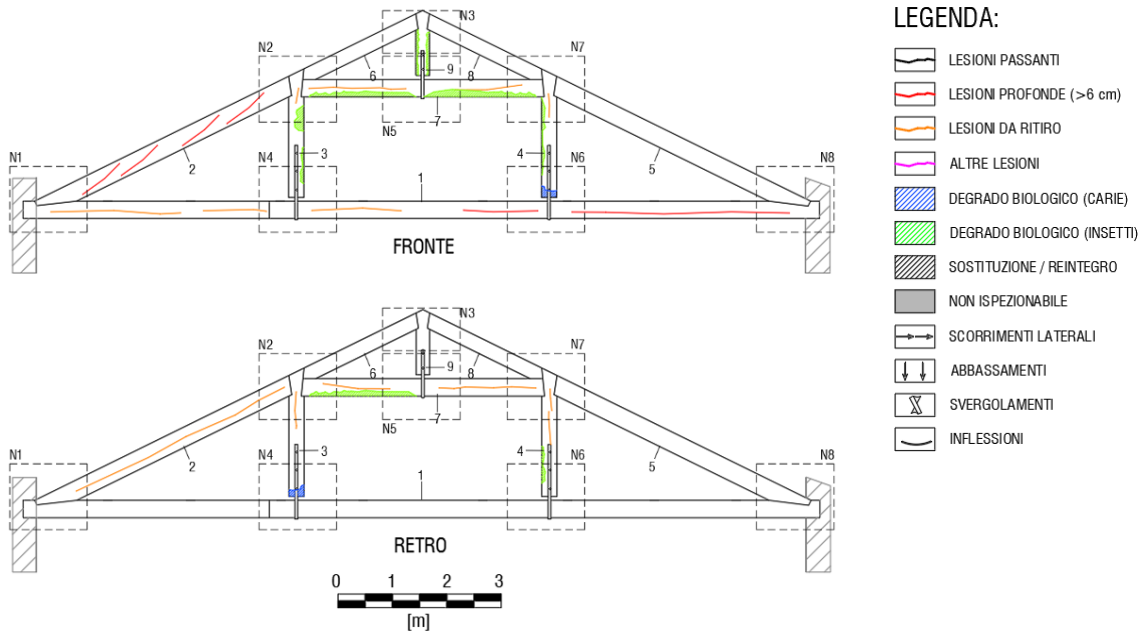


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B7

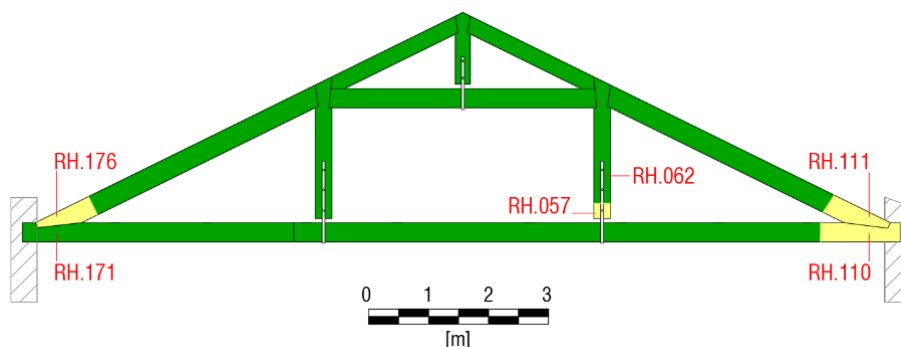
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	25,5	30,5		RITIRO	0,16	-	<10%	VERIFICARE DARDO DI GIOVE	1
2	23	28	4,780	PROF.	0,07	-	≈15%	LESIONI PROF. 10 cm, FIBRA RITORTA	3
3	22,5	28,5	2,100	RITIRO	0,12	-	<10%	BASE DEL MONACO DANNEGGIATA, PRESENZA DI FORI PASSANTI	3
4	22,5	27,5	2,070	RITIRO	0,15	0,37	<10%	PORZIONE SOSTITUITA, PRESENZA RESINA, BASE AMMALORATA	2
5	22	27	4,760	RITIRO	0,11	0,20	≈15%	PRESENZA RESINA	2
6	22	24	2,250	RITIRO	0,18	-	≈15%	LESIONI PROF. 7 cm, FIBRA RITORTA, RESINA	3
7	23	28	4,385	RITIRO	0,18	0,22	<10%	-	1
8	21,5	26	2,260	RITIRO	0,12	-	≈15%	FIBRA RITORTA	2
9	18	29	1,125	RITIRO	0,17	-	<10%	PRESENZA INSETTI	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:



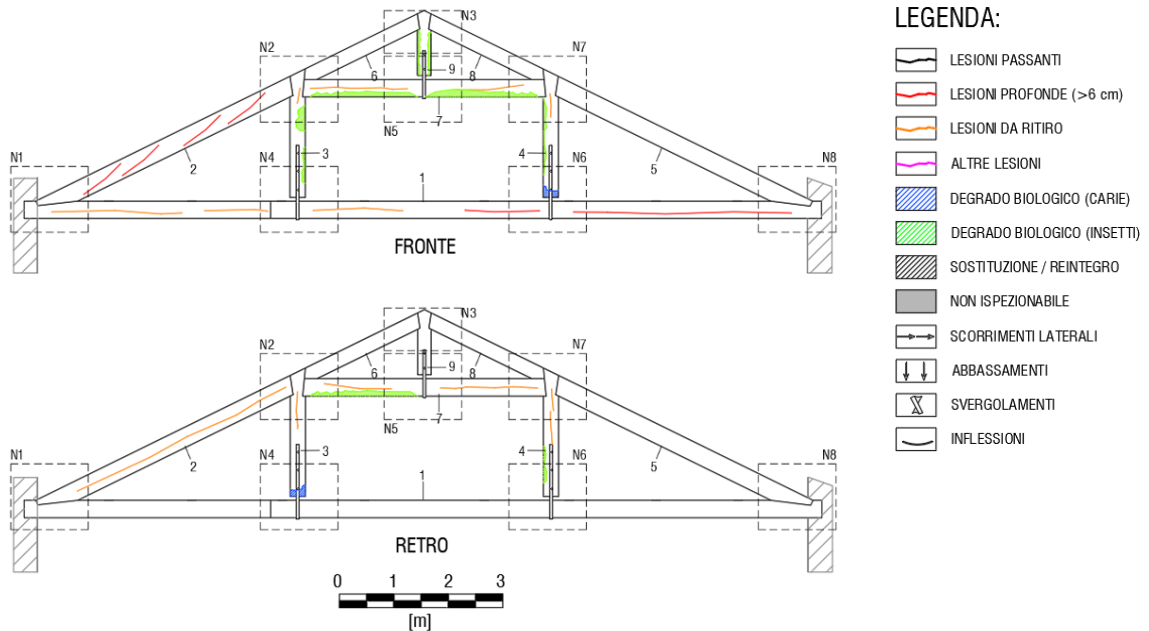
LEGENDA: ■ BUONO O CON LIEVI ANOMALIE LOCALI ■ CON ANOMALIE DISTINGUIBILI ■ CON NOTEVOLI ANOMALIE ■ NON ISPEZIONABILE

SCHEDA RILIEVO CAPRIATA B8

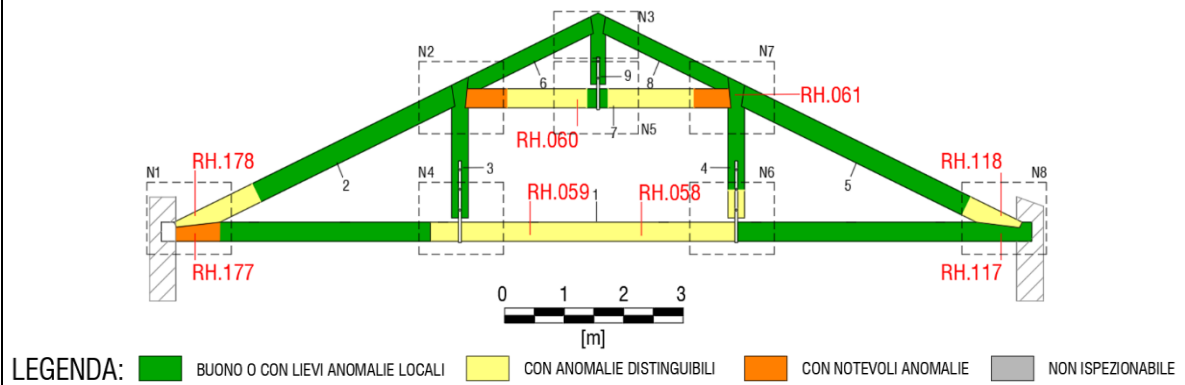
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA		CAT. UNI 11119:2004
	n°	B		H	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]	
1	26	30	NR	PROF.	-	-	<10%	LESIONI PROF. 10 cm, VERIFICARE DARDO DI GIOVE	3	
2	23	27	4,800	RITIRO	0,16	-	20%	LESIONI DA RITIRO (PROF. 8 cm), PROBABILE SOSTITUZIONE	3	
3	22,5	30	2,200	RITIRO	0,20	-	<10%	RESINA	2	
4	22	29	2,190	RITIRO	0,16	0,65	≈15%	RESINA	2	
5	23,5	34	4,740	RITIRO	0,11	-	≈10%	PROBABILE SOSTITUZIONE	1	
6	23	27,5	2,240	RITIRO	0,09	-	>20%	FIBRA RITORTA	3	
7	23	29,5	4,410	RITIRO	0,10	-	≈35%	RESINA, FIBRA RITORTA, INFLESSIONE, DEGRADO GENERALE	3	
8	23	24	2,270	RITIRO	0,15	-	<10%	-	2	
9	20,5	28	1,140	RITIRO	0,24	-	<10%	RESINA	2	

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

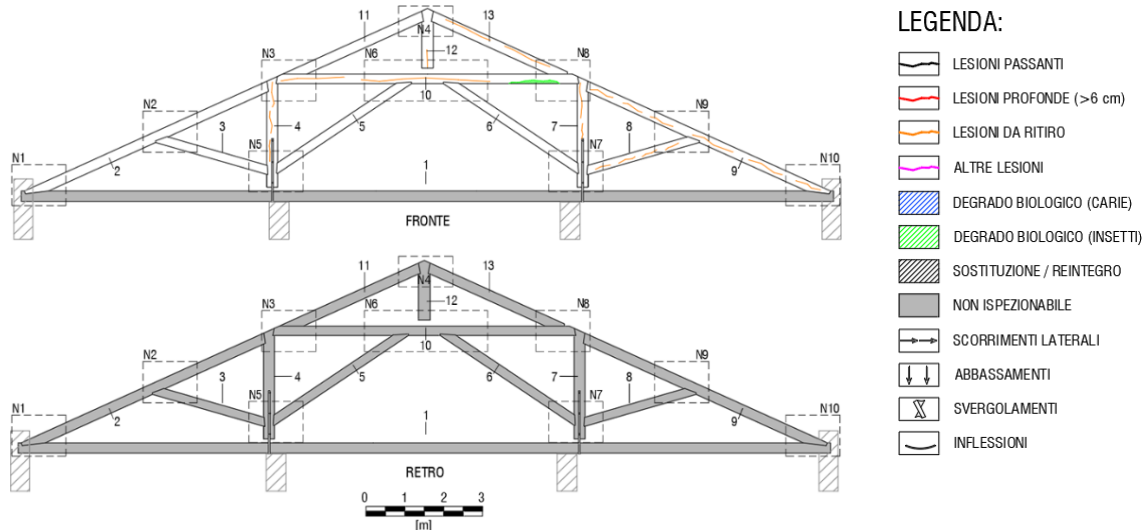


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C1

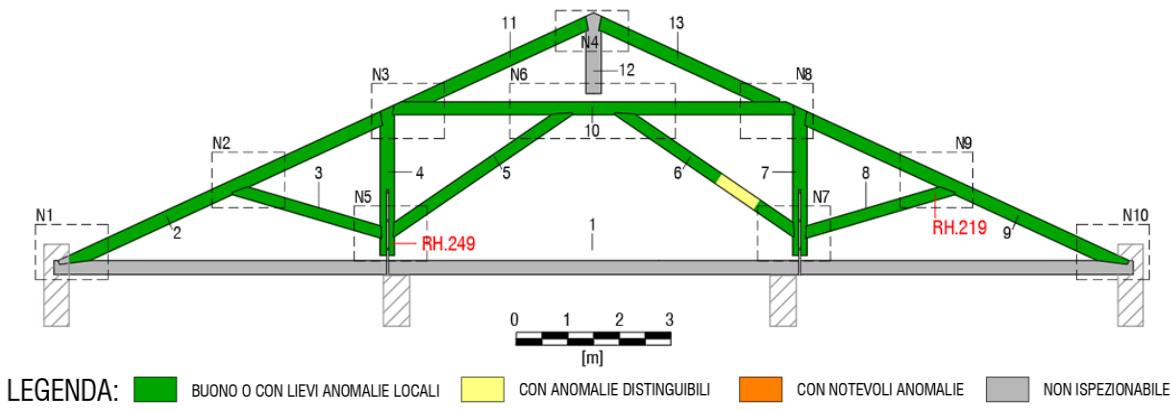
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	24	26	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	22	26	NR	RITIRO	0,24	0,20	<10%	RIALZO SU NODO 1 (L=2,54m B=0,20m)	2
3	16	24	2,785	RITIRO	0,15	-	<10%		1
4	22	30	2,885	RITIRO	0,18	-	<10%		1
5	18	23	3,840	RITIRO	0,44	-	<10%		3
6	15	23	3,920	RITIRO	0,22	0,13	≈10%		2
7	20	28	2,918	RITIRO	0,07	-	<10%		1
8	16	22	2,825	RITIRO	0,16	-	<10%		1
9	20,5	29	6,570	RITIRO	-	-	<10%	RIALZO SU NODO 10 (L=3m B=0,18m)	1
10	15	23	NR	RITIRO	NR	NR	<10%		3
11	14,5	28	NR	RITIRO	NR	NR	NR		1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR		1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

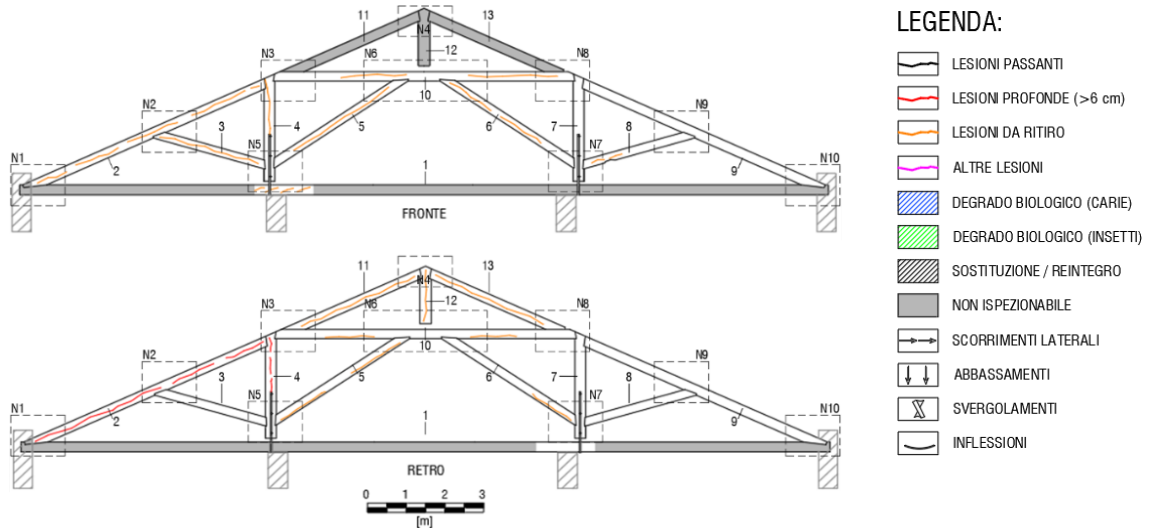


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C2

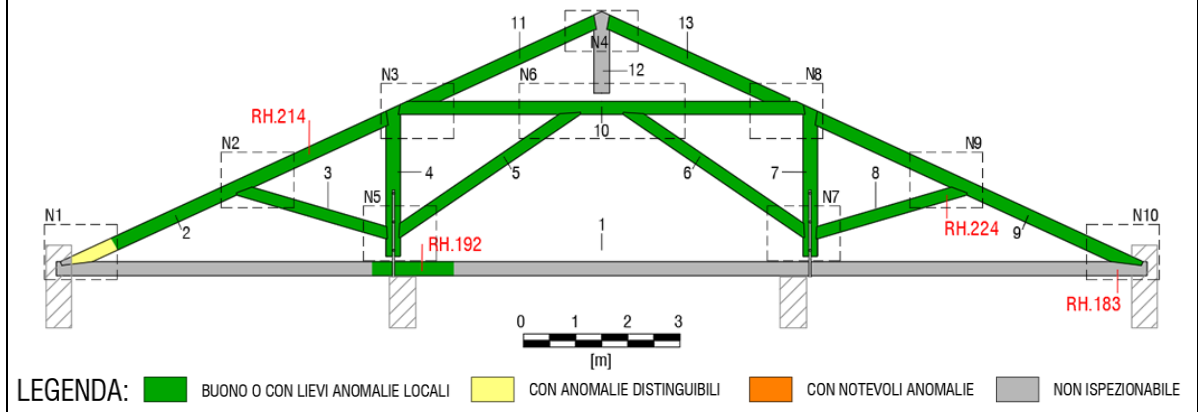
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	23	30	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	20	26	NR	RITIRO	0,14	0,23	<10%	RIALZO NODO 1 (L=3,60m H=0,24m)	1
3	16	24	2,800	RITIRO	0,17	-	<10%	PRESENZA CUNEO NODO 2	1
4	19	29	2,890	RITIRO	0,22	-	<10%	-	2
5	17	23	3,830	RITIRO	0,21	-	<10%	-	2
6	16	23	3,880	RITIRO	0,22	-	≈10%	VARIAZIONE SEZIONE - SMUSSI IN SOMMITA' ACCENTUATI	2
7	22	28	2,910	RITIRO	0,18	0,25	≈10%	LESIONI DA RITIRO IMPORTANTI	2
8	20	27	2,830	RITIRO	0,22	-	<10%	ASTA SVERGOLATA , RIDUZIONE SEZIONE VERSO N7	2
9	20	25,5	6,655	RITIRO	0,10	-	<10%	LESIONI RITIRO IMPORTANTI - RIALZO NODO 10 (L=3,85m H=0,25m)	2
10	16	25	NR	RITIRO	0,16	-	NR	-	1
11	17	29,5	NR	RITIRO	-	-	NR	-	1
12	18	26	1,350	RITIRO	-	-	NR	-	1
13	18	24,5	NR	RITIRO	0,22	-	NR	-	2

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

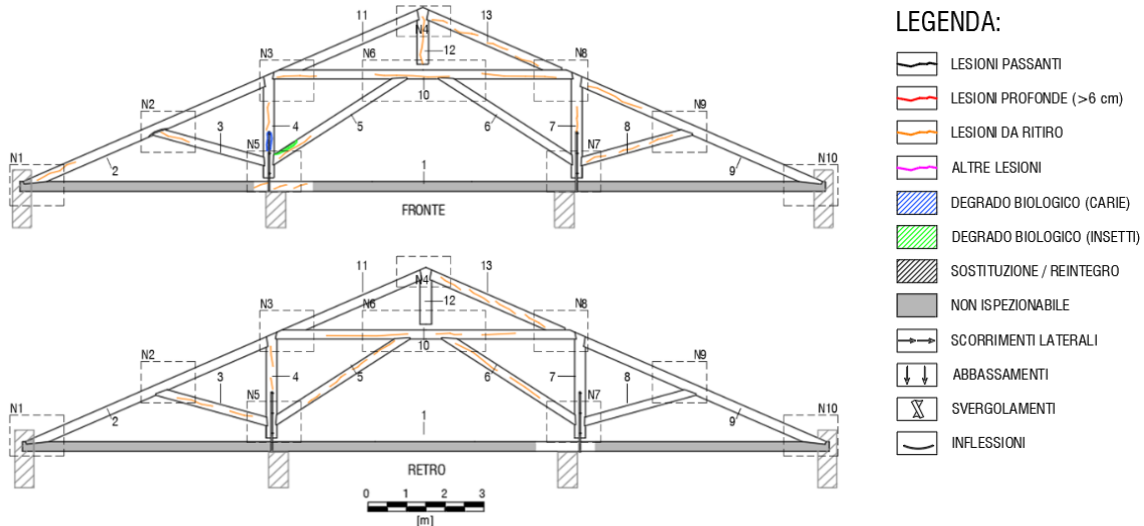


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C3

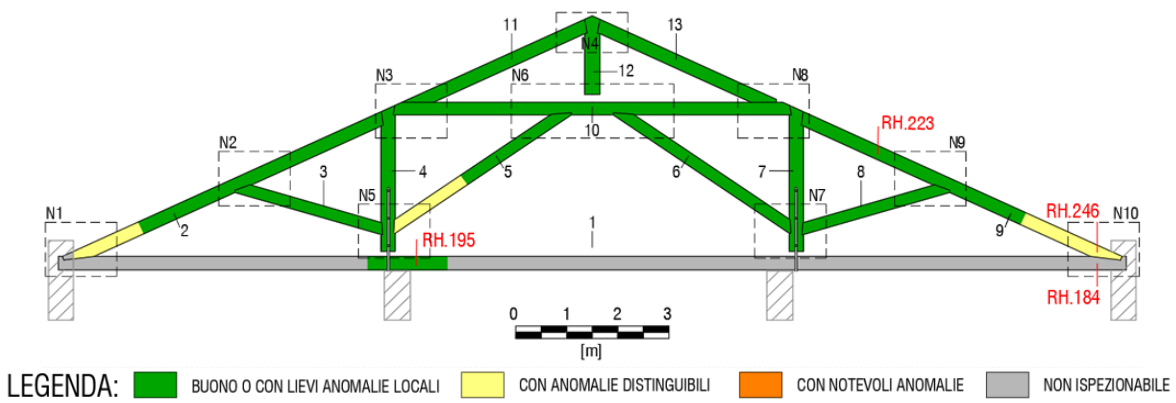
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	22	27	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	20	26,5	NR	RITIRO	0,15	-	<10%	RIDUZIONE SEZIONE VICINO NODO 2 + CUNEO	1
3	18	24	2,970	RITIRO	0,10	0,125	<10%	-	1
4	18	27,5	2,885	RITIRO	0,15	-	<10%	USURA LATO SUD	1
5	17,5	25,5	3,890	RITIRO	0,20	-	≈10%	-	2
6	18	25	3,865	RITIRO	0,19	-	<10%	-	1
7	19	26	3,080	RITIRO	0,26	-	<10%	PRESENZA MOLTI NODI	2
8	18	24	2,845	RITIRO	0,28	-	<10%	-	2
9	20	29	6,690	RITIRO	0,14	-	<10%	RIALZO NODO 1	1
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	PRINCIPI DI FIBRA RITORTA	3

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

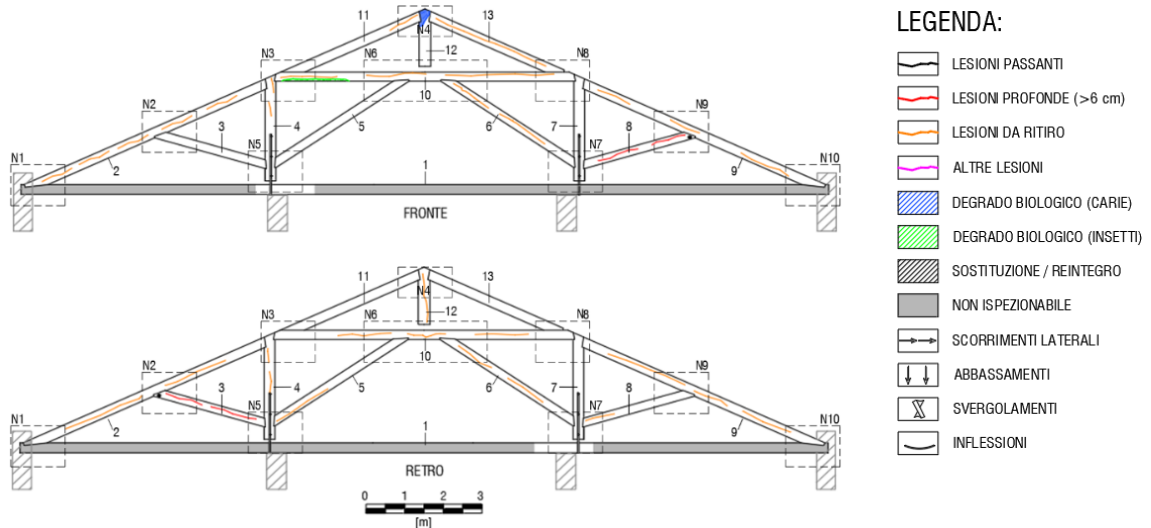


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C4

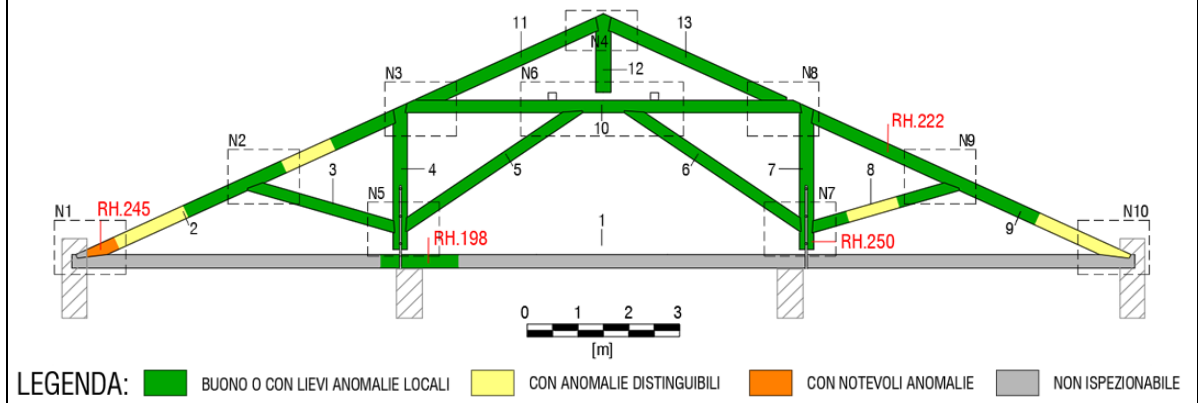
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	22	27	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	22	28	NR	RITIRO	0,18	0,34	<10%	RIALZO NODO 1 - CUNEO NODO 2 - MENSOLA NODO 3 - MOLTI NODI	1
3	17	25	2,800	RITIRO	0,06	-	<10%	-	1
4	23	28	3,100	RITIRO	0,20	-	≈20%	SUONO DISOMOGENEO - PRESENZA CORTECCIA	2
5	17	23	3,850	RITIRO	0,22	-	<10%	CUNEO NODO 5	2
6	15	24	3,870	RITIRO	0,38	-	<10%	-	3
7	20	27	3,125	RITIRO	0,07	-	<10%	SEZIONE TRAPEZIOIDALE	1
8	17	25	2,830	RITIRO	0,22	-	<10%	SIONI DA RITIRO IMPORTANTI - PRESENZA FORO PASSANTE NODO	2
9	20,5	27,5	6,555	RITIRO	0,25	-	<10%	-	2
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:



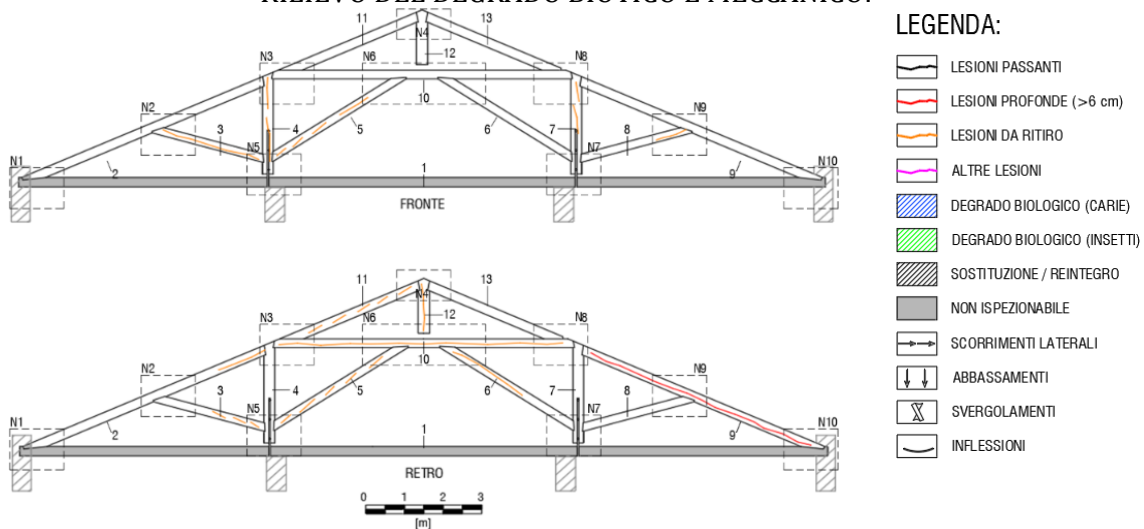
APPENDICE

SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C5

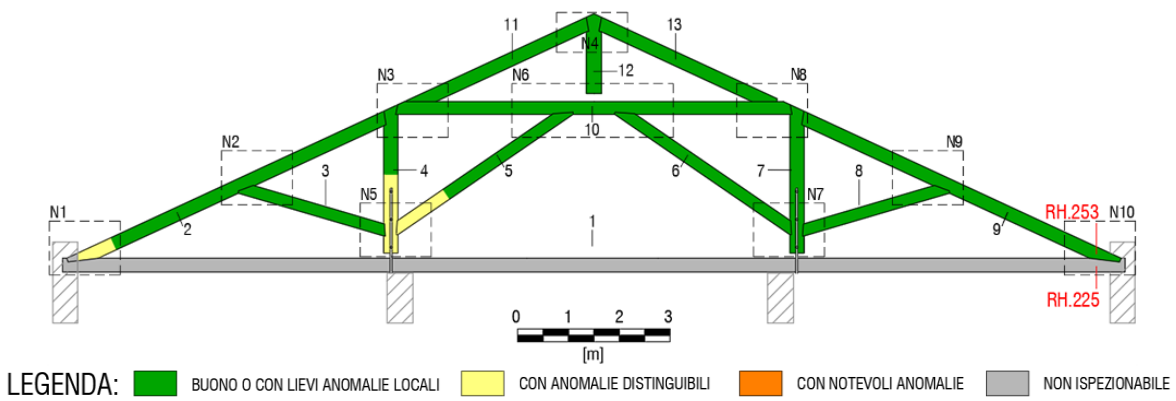
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	
1	22	30,5	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	18	28	NR	RITIRO	0,11	-	<10%	RIALZO NOD 1 - LESIONE CONTINUA RILEVANTE	1
3	17	26	2,840	RITIRO	0,15	-	≈10%	CUNEO NODO 2	2
4	18	26	2,915	RITIRO	0,15	-	<10%	USURA LATO SUD - STAFFA DANNEGGIATA	1
5	14,5	22,5	3,945	RITIRO	0,13	-	<10%	LATO SUD MAGGIORMENTE SMUSSATO	2
6	15	23,5	3,920	RITIRO	0,20	-	<10%	RASTREMAZIONE VERSO NODO 6	1
7	22	29	3,115	RITIRO	0,23	-	≈15%	-	2
8	18	25	2,825	RITIRO	0,14	-	≈10%	AUMENTO SMUSSO VERSO NODO 7 - PRESENZA ALVEARE	2
9	20	25	NR	RITIRO	0,17	0,29	<10%	-	1
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

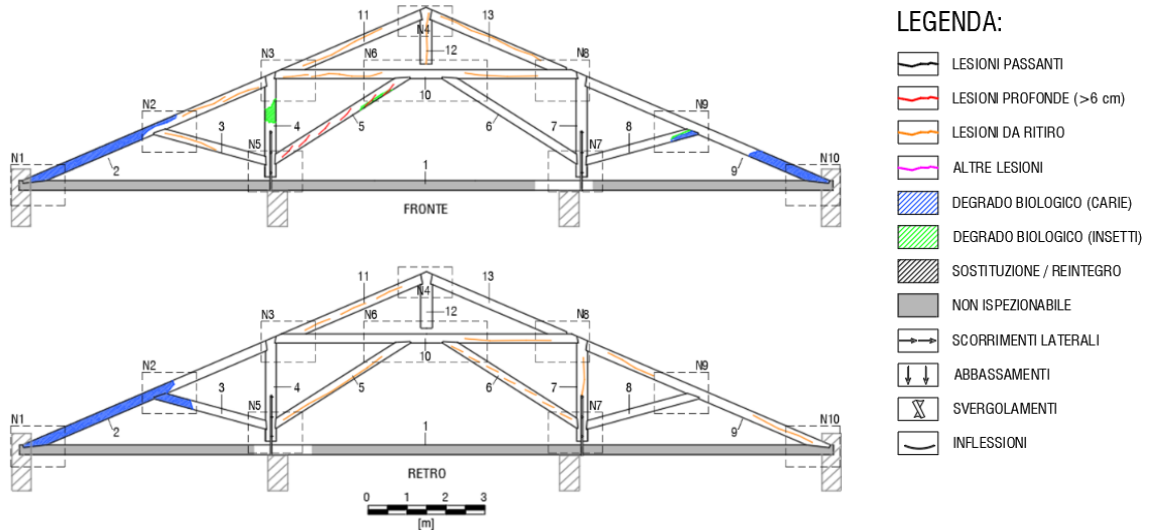


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C6

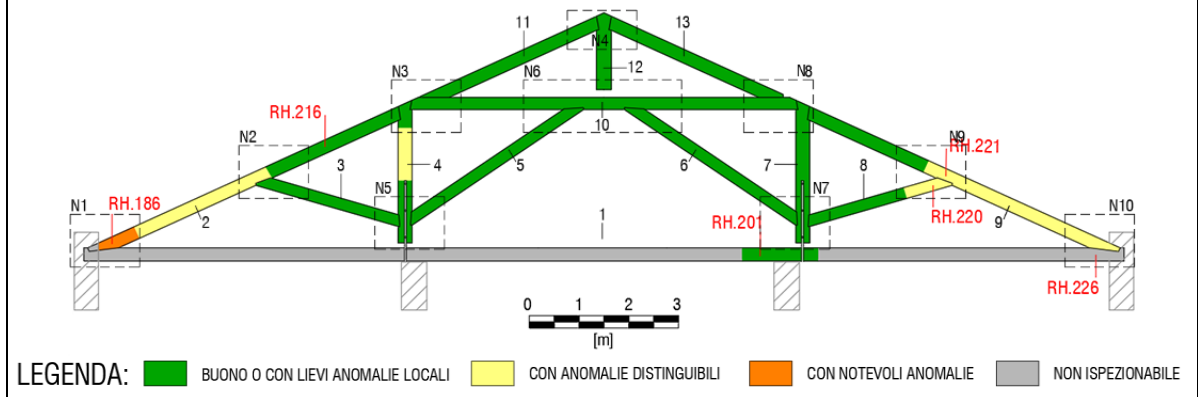
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	24	28	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	24	27,5	NR	RITIRO	0,20	0,25	<10%	USURA LATO SUD (MARCIA)	1
3	17	23,5	2,790	RITIRO	0,11	-	<10%	SVERGOLA VERSO NODO 5	1
4	23	29,5	2,885	RITIRO	0,22	-	<10%		2
5	17	25	3,900	RITIRO	0,18	-	<10%	INIZIO ATTACCO INSETTI	1
6	17,5	25,5	3,875	RITIRO	0,16	-	<10%		1
7	19	26	2,870	RITIRO	0,11	-	≈10%	MENSOLA NODO 8 - UMIDITA' LATO SUD	2
8	15	24	2,825	-	0,10	-	≈10%	ASTA SVERGOLATA VERSO NODO 9	2
9	19,5	28	NR	RITIRO	0,14	-	<10%	UMIDITA' NOTEVOLE - INFILTRAZIONE DA COPERTURA	1
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

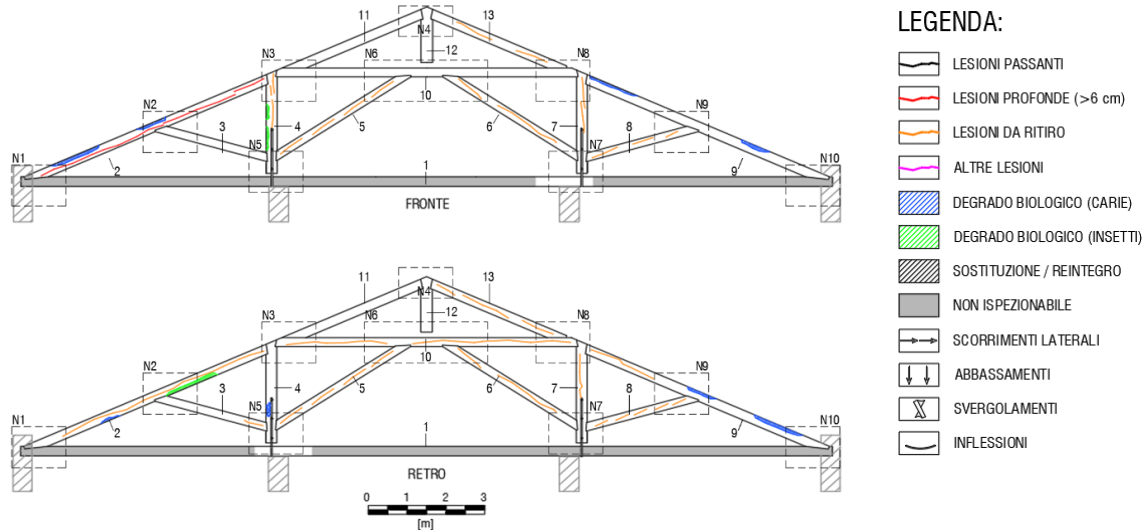


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C7

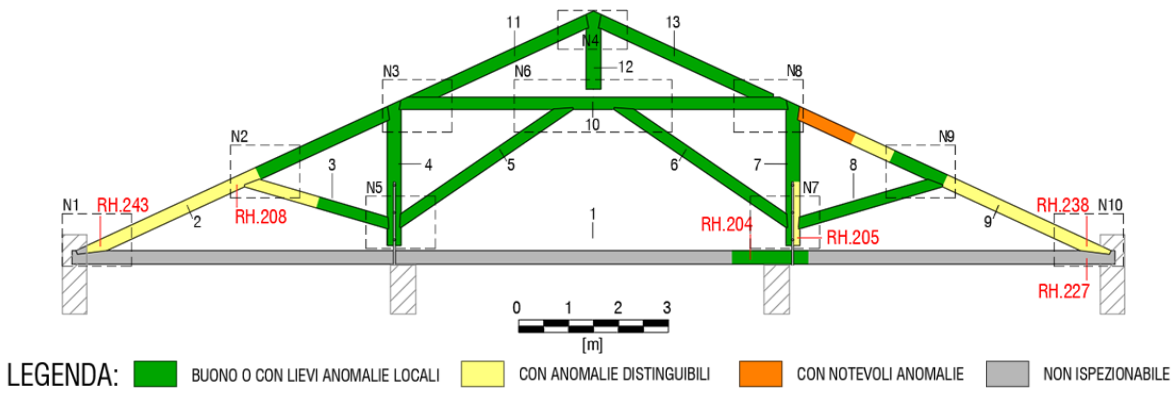
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	21,5	29	NR	RILEVANT	0,14	-	<10%	SUONO GRAVE IN PROSSIMITA' LESIONE	1
3	17	23	2,835	RITIRO	0,21	0,22	≈10%	-	2
4	20	26,5	3,125	RITIRO	0,20	-	<10%	PRESENZA NOTEVOLE NODI - RIDUZIONI LOCALI DI SEZIONE	1
5	16	24,5	3,930	RITIRO	0,21	-	<10%	-	2
6	18	26,5	3,845	RITIRO	0,17	-	≈10%	USURA	2
7	19,5	28,5	2,890	RITIRO	0,13	-	<10%	-	1
8	16	24	2,850	RITIRO	-	-	<10%	SEZIONE VARIABILE (SMUSSI CONSIDERATI IN MEDIA)	1
9	20	29	NR	RITIRO	0,25	-	<10%	-	2
10	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	PRAFAFULMINE LATO NORD	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

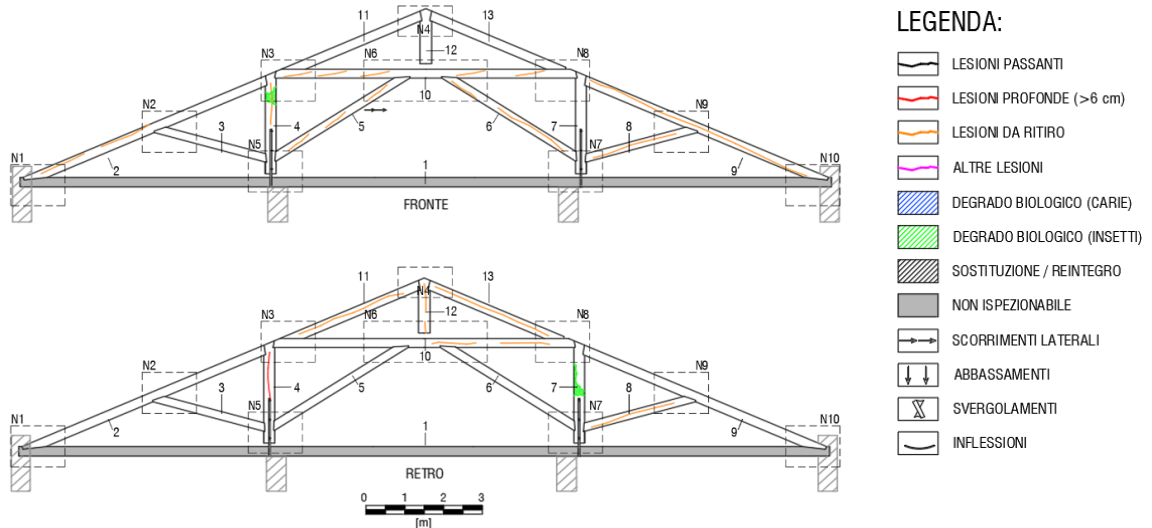


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C8

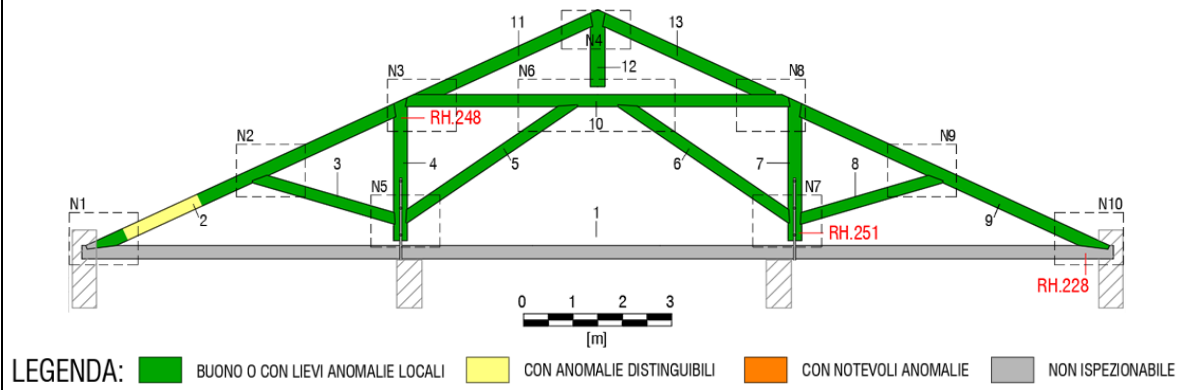
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	20	27	NR	RITIRO	0,17	-	<10%	-	1
3	15,5	23	2,760	RITIRO	0,15	-	≈10%	USURA LATO SUD	2
4	20	26	2,885	RITIRO	0,21	0,24	≈20%	PRESENZA MOLTI NODI - RIDUZIONI LOCALI DI SEZIONE	3
5	16,5	24,5	3,940	RITIRO	0,24	-	≈10%	-	2
6	18	23	3,905	RITIRO	0,12	-	<10%	USURA LATO NORD	1
7	19	27,5	2,915	RITIRO	0,31	-	<10%	-	2
8	16,5	22	2,815	RITIRO	0,13	-	<10%	-	1
9	21	28	NR	RITIRO	0,17	0,14	<10%	-	1
10	17,5	25	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:



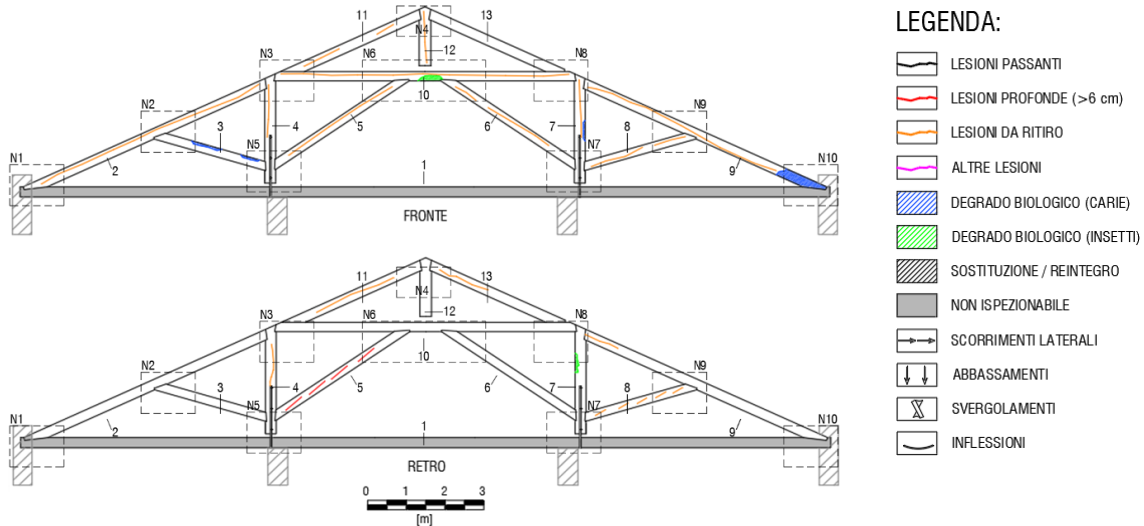
APPENDICE

SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C9

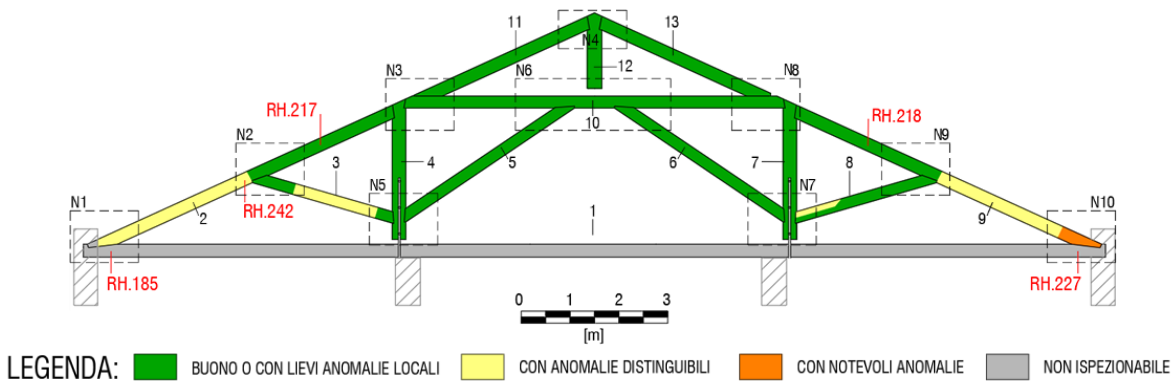
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	18,5	28		RITIRO	0,18	-	<10%	RIALZO NODO, LESIONATO, PRESENZA NOTEVOLE DI NODI	2
3	18	24	2,830	RITIRO	0,17	-	≈15%	-	2
4	18	27,5	2,895	RITIRO	0,22	0,25	<10%	-	2
5	15,5	23	4,007	RITIRO	0,05	-	≈10%	-	3
6	16	23,5	3,895	RITIRO	0,22	-	≈10%	SVERGOLA VERSO NODO 7	2
7	18	26,5	3,095	RITIRO	0,04	-	<10%	LESIONE NOTEVOLE (7 CM) FRONTE NORD - DEGRADO SUP.LE	3
8	18	25	2,825	RITIRO	0,10	-	≈10%	-	2
9	20	29,5	NR	RITIRO	0,10	-	<10%	TESTA TRAVE UMIDA	1
10	17,5	26,5	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
11	17	28	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	18	27,5	1,345	RITIRO	0,17	-	<10%	-	1
13	19,5	27,5	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

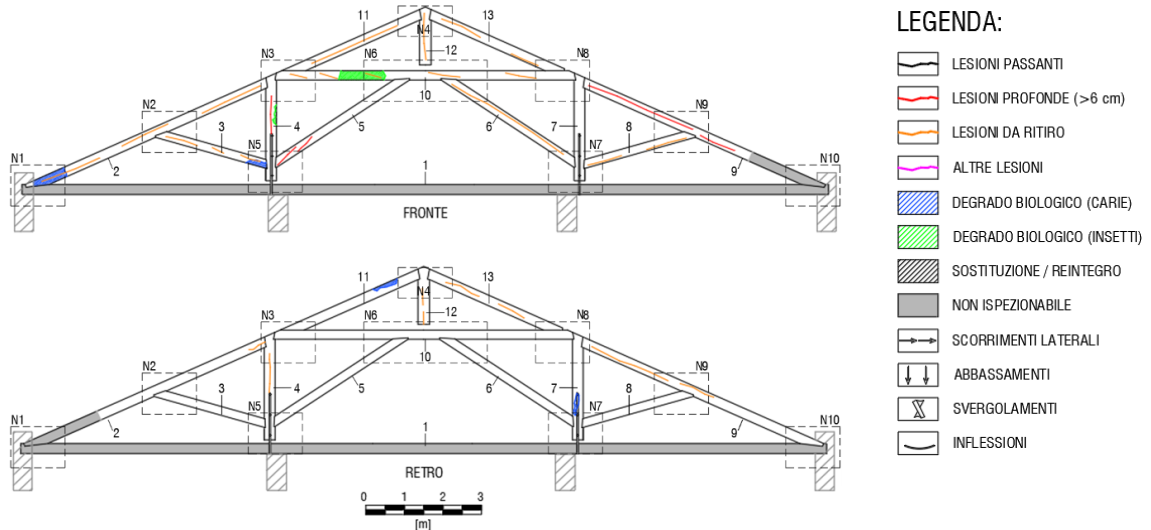


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C10

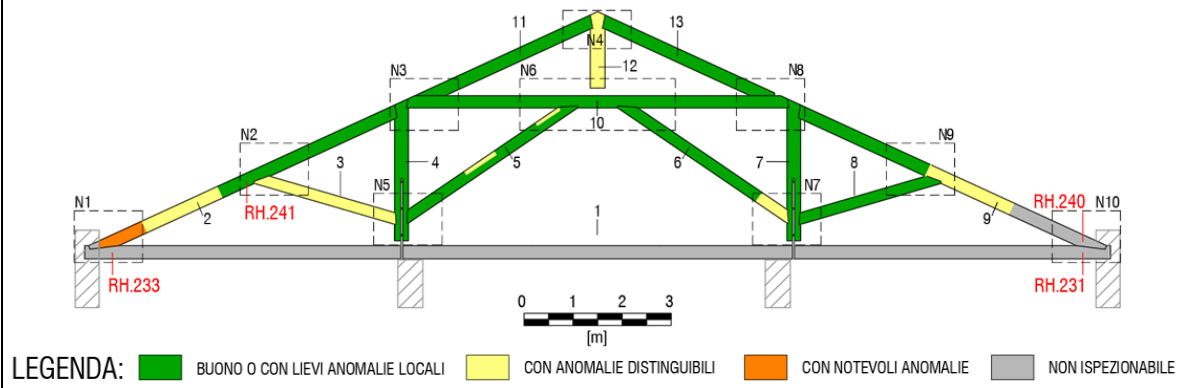
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	11119:2004
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	21	27	NR	RITIRO	0,19	-	<10%	USURA - TESTA TRAVE UMIDA	1
3	16	24	2,825	RITIRO	0,16	-	≈20%	CARIE NODO 5 (MARCIA)	3
4	22,5	29,5	3,125	RITIRO	0,08	-	<10%	LESIONI DA RITIRO PROF. 7 cm	3
5	19	24	3,895	RITIRO	0,08	-	≈10%	LESIONI DA RITIRO PROF. 7 cm	3
6	16,5	23	3,880	RITIRO	0,18	-	<10%	-	2
7	19	28	2,905	RITIRO	0,20	0,28	≈10%	-	2
8	16,5	23	2,785	RITIRO	0,13	-	≈10%	-	2
9	22	30	NR	RITIRO	0,12	-	<10%	RINFORZO NODO 10	1
10	17	25	NR	RITIRO	NR	NR	>30%	FIBRA RITORTA	3
11	18	27,5	NR	NR	NR	NR	NR	-	1
12	18	29	1,365	RITIRO	NR	NR	NR	-	1
13	18,5	27	NR	NR	NR	NR	NR	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:

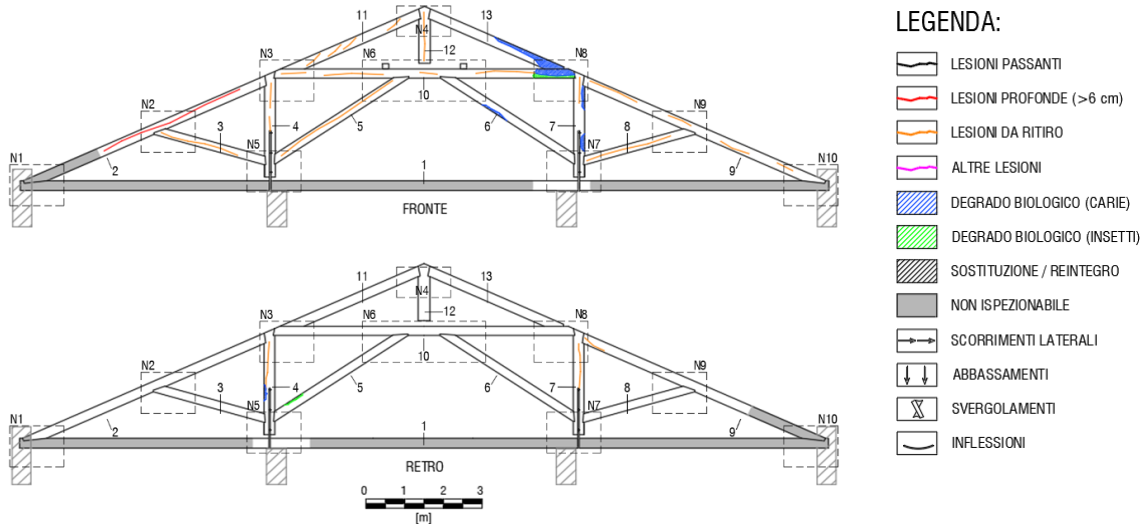


SCHEDA RILIEVO CAPRIATA C11

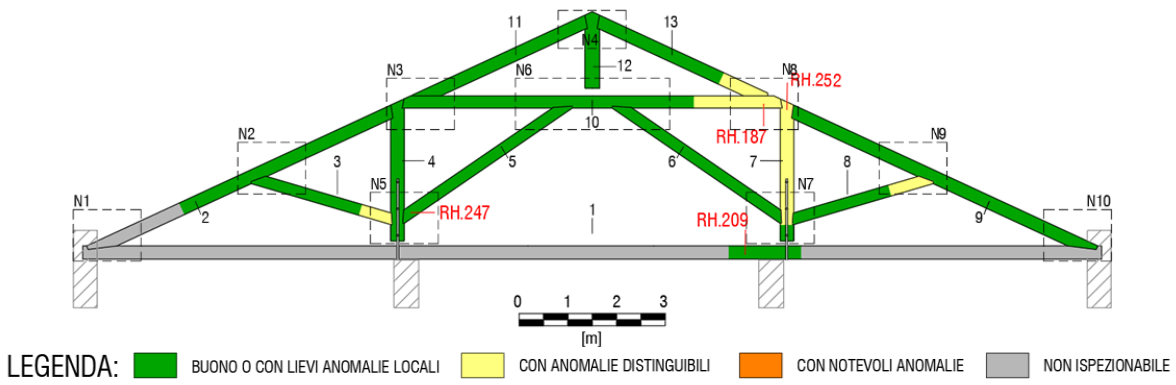
RILIEVO GEOMETRICO E CLASSIFICAZIONE SECONDO LA RESISTENZA:

ASTA	SEZIONE		LUCE	CARATTERISTICHE / DIFETTI				ESITO ISPEZIONE VISIVA	CAT. UNI 11119:2004
n°	B	H	L	LESIONI	NODI	GR.NODI	INC.FIBR.	ANNOTAZIONI	
[#]	[cm]	[cm]	[m]	[-]	[-]	[-]	[%]	[-]	[-]
1	21,5	28	NR	NR	NR	NR	NR	NON ISPEZIONABILE	1
2	22	27	NR	RITIRO	0,12	-	<10%	RIALZO, LESIONI DA RITIRO PROF. 6,5 cm	1
3	18	26	2,795	RITIRO	0,17	-	<10%	-	1
4	18	26	2,905	RITIRO	0,19	0,39	<10%	-	1
5	16,5	23	3,860	RITIRO	0,23	0,33	<10%	-	2
6	16	24	3,915	RITIRO	0,13	-	<10%	CARIE	1
7	23	27,5	2,900	RITIRO	0,27	0,30	<10%	FORTE IRREGOLARITA' - DEGRADO	2
8	17	23	2,810	RITIRO	0,13	-	<10%	APPOGGIO NODO 8 MARCIO	2
9	18,5	27,5	6,350	RITIRO	0,18	-	<10%	-	1
10	16	19	NR	RITIRO	0,31	-	<10%	USURA LATO NORD	2
11	NR	NR	NR	NR	NR	NR	≈20%	-	2
12	NR	NR	NR	NR	NR	NR	<10%	-	1
13	NR	NR	NR	NR	NR	NR	≈10%	-	1

RILIEVO DEL DEGRADO BIOTICO E MECCANICO:



PROVE RESISTOGRAFICHE E STATO DI CONSERVAZIONE:



A.3 Rapporti prove con trapano resistografico⁴⁶

Tab. A.1: Riepilogo delle prove resistografiche eseguite per le capriate della 'Zona A'.

DATI CAPRIATA				DATI PROVA							NOTE
TIPO [-]	ASTA [#]	B [cm]	H [cm]	RIF. [-]	U [%]	α [°]	β [°]	Pt [cm]	Pr [cm]	Pr/Pt [-]	
A1	1	21	29	RH.001	NR	45°	0°	23,1	21,9	0,95	Testa catena su N1
A1	1	21	29	RH.009	14,8	0°	90°	26,5	25,3	0,95	Ispezione N7 (T) ⁴⁷
A1	1	21	29	RH.013	15,8	45°	0°	23,6	16,5	0,70	Testa catena su N10
A1	2	19	27	RH.003	15,7	0°	-90°	39,9	35,3	0,88	Testa puntone su N1
A1	8	15	19	RH.040	17,6	0°	90°	18,9	17,8	0,94	Prossimità N7
A1	9	21	25	RH.041	14,7	0°	-90°	26,3	26,3	1,00	Testa N10 (sost.)
A1	10	16	25	RH.007	NR	0°	-90°	29,9	9,9	0,33	25 cm da N3 (rinf.)
A1	10	16	25	RH.008	NR	0°	-90°	32,9	28,4	0,86	70 cm da N3 (rinf.)
A2	1	NR	29	RH.002	NR	45°	0°	16,9	16,5	0,98	Testa catena su N1
A2	1	NR	29	RH.012	15,7	0°	90°	28,4	28,4	1,00	Ispezione su N7 (T)
A2	1	NR	29	RH.015	15,5	45°	0°	16,1	13,6	0,84	Testa catena su N10
A2	2	19	28	RH.016	16,0	0°	0°	22,3	19,3	0,87	Testa puntone N10
A3	1	NR	NR	RH.017	17,4	45°	0°	25,1	18,4	0,73	Testa catena su N10
A3	1	NR	NR	RH.022	13,6	45°	0°	35,3	35,3	1,00	Testa catena su N1
A3	9	22	29	RH.018	18,9	0°	0°	22,3	22,3	1,00	Testa puntone N10
A6	1	NR	NR	RH.004	15,8	45°	45°	28,4	28,4	1,00	Testa catena su N10
A6	9	21	24	RH.005	13,1	0°	0°	20,9	16,1	0,77	Testa puntone N10
A7	1	NR	NR	RH.006	15,0	45°	45°	19,5	10,5	0,54	Testa catena su N10
A7	9	21,5	28,5	RH.027	16,4	0°	90°	22,0	21,0	0,95	Testa puntone N10
A8	1	21	29	RH.028	16,2	0°	90°	28,9	28,9	1,00	Ispezione su N7 (T)
A9	1	22	27	RH.026	10,6	45°	0°	32,4	29,3	0,90	Testa catena su N1
A9	1	22	27	RH.034	15,7	0°	90°	27,3	26,9	0,99	Ispezione su N7 (T)
A9	6	13	19	RH.042	17,0	0°	-90°	19,6	18,1	0,92	Mezzeria (degrado)
A9	7	22	26,5	RH.043	15,3	0°	0°	26,0	26,0	1,00	Mezzeria (degrado)
A10	1	23	30	RH.024	13,7	45°	0°	16,1	15,5	0,96	Testa catena su N1
A10	6	15	21,5	RH.045	19,5	0°	90°	25,0	25,0	1,00	Mezzeria (degrado)
A10	7	19	26	RH.044	15,8	0°	0°	24,0	20,5	0,85	Base (degrado N7)
A11	1	24	29	RH.031	15,7	0°	90°	32,0	32,0	1,00	Ispezione su N7 (T)

⁴⁶ Le indagini strumentali sono state eseguite con il resistografo RESI Power Drill 400 della IML Service (iml-service.com) mentre i rilievi dell'umidità relativa sono avvenuti per mezzo dell'igrometro elettrico a resistenza Trotec T510 (it.trotec.com).

⁴⁷ La nota (T) indica che la prova resistografica è stata eseguita antepoendo all'asta indagata un tester in legno di abete di classe di resistenza nota, al fine di avere un confronto nella lettura del profilo densimetrico restituito dallo strumento.

APPENDICE

Tab. A.2: Riepilogo delle prove resistografiche eseguite per le capriate della 'Zona B'.

DATI CAPRIATA				DATI PROVA							NOTE
TIPO [-]	ASTA [#]	B [cm]	H [cm]	RIF. [-]	U [%]	α [°]	β [°]	Pt [cm]	Pr [cm]	Pr/Pt [-]	
B1	1	21	33	RH.129	14,6	0°	45°	35,5	35,5	1,00	Testa catena su N1
B1	1	23	32	RH.069	13,7	45°	0°	29,6	29,6	1,00	Testa catena su N8
B1	2	21	32	RH.130	14,9	0°	0°	21,1	20,6	0,98	Testa puntone su N1
B1	3	21	28	RH.046	17,0	0°	0°	28,1	28,1	1,00	Parte degradata
B1	5	23	33,5	RH.070	13,9	0°	0°	25,1	25,1	1,00	Testa puntone su N8
B2	1	24	35	RH.135	15,0	0°	45°	38,9	38,9	1,00	Testa catena su N1
B2	1	22	33	RH.075	13,8	45°	0°	34,9	34,9	1,00	Testa catena su N8
B2	2	24	32	RH.136	15,6	0°	0°	22,6	22,6	1,00	Testa puntone su N1
B2	4	22	28	RH.047	18,3	0°	0°	27,6	24,6	0,89	Parte degradata (T)
B2	5	23	33	RH.076	16,9	0°	0°	24,3	24,3	1,00	Testa puntone su N8
B3	1	25	34	RH.143	13,5	0°	45°	37,5	37,5	1,00	Testa catena su N1
B3	1	23	33	RH.082	12,3	45°	0°	27,6	27,6	1,00	Testa catena su N8
B3	2	25	33	RH.144	14,6	0°	0°	24,9	24,9	1,00	Testa puntone su N1
B3	5	22	33	RH.083	16,9	0°	0°	24,3	24,3	1,00	Testa puntone su N8
B3	7	23,5	28,5	RH.049	12,7	0°	-90°	27,5	26,6	0,97	Prossimità mezzeria
B3	9	22	27	RH.048	13,1	0°	0°	14,0	14,0	1,00	Parte degradata (T)
B4	1	27,5	28,5	RH.051	13,8	0°	90°	29,5	29,0	0,98	Su dardo Giove (T)
B4	1	27,5	28,5	RH.052	13,0	0°	90°	29,4	29,4	1,00	Prossimità N6 (T)
B4	1	25	33	RH.151	10,8	0°	45°	35,1	34,6	0,99	Testa catena su N1
B4	1	26	35	RH.090	15,3	45°	0°	37,8	37,8	1,00	Testa catena su N8
B4	2	22	34	RH.152	15,4	0°	0°	23,6	23,6	1,00	Testa puntone su N1
B4	4	20,5	29	RH.050	19,1	0°	0°	28,5	28,5	1,00	Parte degradata (T)
B4	5	24	33	RH.091	15,2	0°	0°	22,6	21,5	0,95	Testa puntone su N8
B5	1	27,5	30,5	RH.053	13,3	0°	90°	31,3	25,8	0,82	Su dardo Giove
B5	1	27,5	30,5	RH.054	11,7	0°	90°	32,1	32,1	1,00	Su dardo Giove
B5	1	27,5	30,5	RH.055	13,0	0°	90°	34,1	33,1	0,97	Catena vicino N6
B5	1	24	33	RH.157	11,5	0°	45°	32,8	32,8	1,00	Testa catena su N1
B5	1	27	35	RH.095	15,7	45°	0°	37,9	35,3	0,93	Testa catena su N8
B5	2	23	33	RH.158	13,5	0°	0°	22,8	22,8	1,00	Testa puntone su N1
B5	4	22	28	RH.056	15,3	0°	0°	31,1	30,8	0,99	Base monaco su N6
B5	5	24	35	RH.096	15,4	0°	0°	23,4	23,4	1,00	Testa puntone su N8
B6	1	27	35	RH.165	10,6	0°	45°	34,0	34,0	1,00	Testa catena su N1
B6	1	23	33	RH.103	13,1	45°	0°	31,3	27,4	0,88	Testa catena su N8
B6	2	24	33	RH.166	13,7	0°	0°	25,6	25,6	1,00	Testa puntone su N1
B6	5	23	33	RH.104	13,3	0°	0°	24,0	24,0	1,00	Testa puntone su N8
B7	1	25	34	RH.171	11,9	0°	45°	39,4	39,4	1,00	Testa catena su N1
B7	1	24	33	RH.110	12,0	45°	0°	19,8	18,6	0,94	Testa catena su N8
B7	2	23	29	RH.176	12,0	0°	0°	22,8	15,8	0,69	Testa puntone su N1

APPENDICE

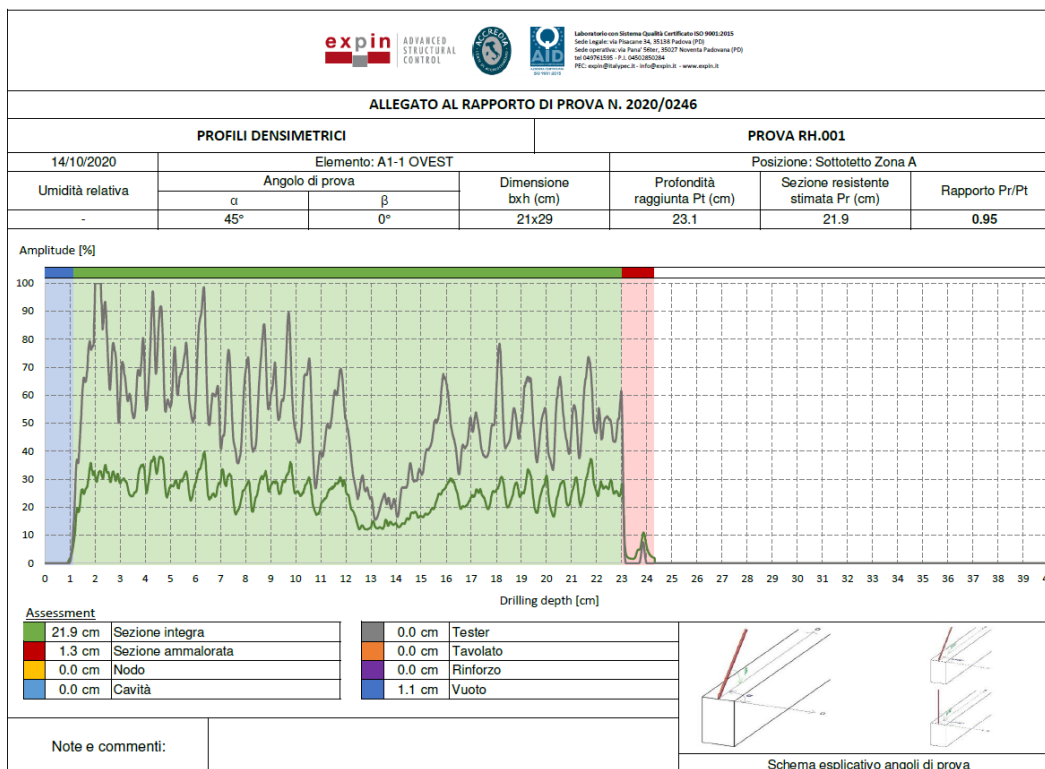
B7	4	22,5	27,5	RH.057	14,6	30°	0°	22,5	21,3	0,95	Base su N6 (T)
B7	4	22,5	27,5	RH.062	14,5	0°	0°	24,8	19,9	0,80	Su sostituzione (T)
B7	5	24	30	RH.111	12,9	0°	0°	13,4	13,4	1,00	Testa puntone su N8
B8	1	26	30	RH.058	13,7	0°	90°	31,1	30,4	0,98	Pross. dardo Giove
B8	1	26	30	RH.059	13,0	0°	90°	30,0	26,6	0,89	Su dardo Giove (T)
B8	1	25	30	RH.177	10,4	0°	45°	39,4	19,4	0,49	Testa catena su N1
B8	1	23	32	RH.117	14,4	45°	0°	35,4	35,4	1,00	Testa catena su N8
B8	2	22	30	RH.178	14,9	0°	0°	23,9	23,3	0,97	Testa puntone su N1
B8	4	22	29	RH.061	15,2	0°	0°	21,8	21,8	1,00	Monaco su N7 (T)
B8	5	24	35	RH.118	14,7	0°	0°	23,4	23,4	1,00	Testa puntone su N8
B8	7	23	29,5	RH.060	12,0	0°	-90°	30,5	28,8	0,94	Centro controcatena

Tab. A.3: Riepilogo delle prove resistografiche eseguite per le capriate della 'Zona C'.

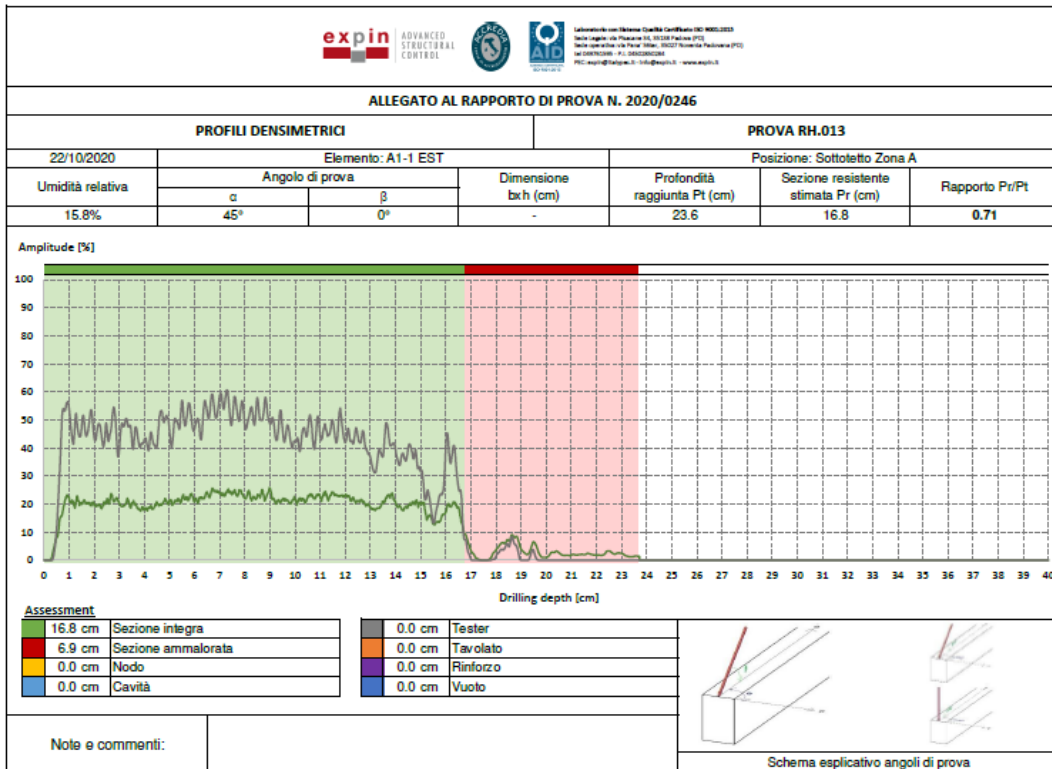
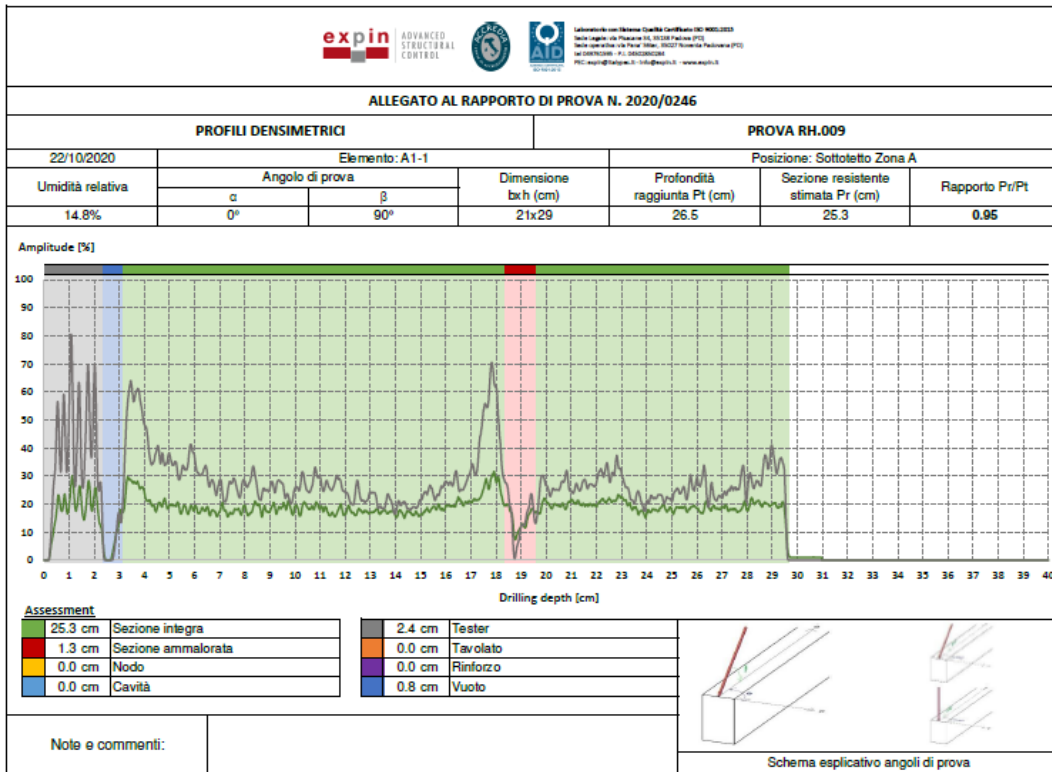
DATI CAPRIATA				DATI PROVA							NOTE
TIPO [-]	ASTA [#]	B [cm]	H [cm]	RIF. [-]	U [%]	α [°]	β [°]	Pt [cm]	Pr [cm]	Pr/Pt [-]	
C1	4	22	30	RH.249	15,1	0°	0°	22,0	21,0	0,95	Base su N5 (T)
C1	9	20,5	29	RH.219	16,6	0°	-90°	32,0	28,4	0,89	Sotto N9
C2	1	23	30	RH.192	8,7	0°	90°	30,1	30,1	1,00	Ispezione N5 (T)
C2	1	23	30	RH.183	14,4	45°	0°	23,5	20,0	0,85	Testa catena su N10
C2	2	20	26	RH.214	15,6	0°	-90°	26,4	26,4	1,00	Mezzeria N2-N3
C2	9	22	29	RH.224	16,3	0°	-90°	29,5	22,0	0,75	Sotto N9
C3	1	22	27	RH.195	12,2	0°	90°	27,6	27,6	1,00	Ispezione N5 (T)
C3	1	22	27	RH.184	13,2	45°	0°	22,5	18,6	0,83	Testa catena su N10
C3	2	20	26,5	RH.246	16,8	0°	0°	21,0	17,4	0,83	Testa su N10 (T)
C3	9	20	29	RH.223	16,8	0°	-90°	24,9	24,9	1,00	Mezzeria N8-N9
C4	1	22	27	RH.198	12,1	0°	90°	22,8	22,3	0,98	Ispezione N5 (T)
C4	2	22	28	RH.245	16,0	0°	0°	20,5	15,9	0,78	Testa su N1 (T)
C4	7	20	29	RH.250	13,0	0°	0°	14,5	11,8	0,81	Base su N7 (T)
C4	9	20,5	27,5	RH.222	17,5	0°	-90°	29,4	29,4	1,00	Mezzeria tra N8-N9
C5	1	22	30,5	RH.225	16,2	45°	45°	28,8	28,3	0,98	Testa catena su N10
C5	9	19	23	RH.253	14,9	0°	0°	18,0	16,3	0,91	Testa su N10 (T)
C6	1	24	28	RH.201	13,7	0°	90°	31,1	30,3	0,97	Ispezione N7 (T)
C6	1	24	28	RH.226	12,7	45°	-45°	27,0	26,3	0,97	Testa catena su N10
C6	1	24	28	RH.186	NR	45°	0°	15,3	2,3	0,15	Testa catena su N1
C6	2	22	26	RH.216	15,6	0°	-90°	30,6	30,6	1,00	Mezzeria N2-N3
C6	9	19,5	28	RH.220	11,8	0°	-90°	28,5	28,5	1,00	Sotto N9
C6	9	19,5	28	RH.221	10,3	90°	0°	19,4	16,5	0,85	Prossimità N9
C7	1	NR	NR	RH.204	13,6	0°	90°	35,9	35,1	0,98	Ispezione N7 (T)
C7	1	NR	NR	RH.227	15,9	45°	45°	29,1	28,6	0,98	Testa catena su N10

APPENDICE

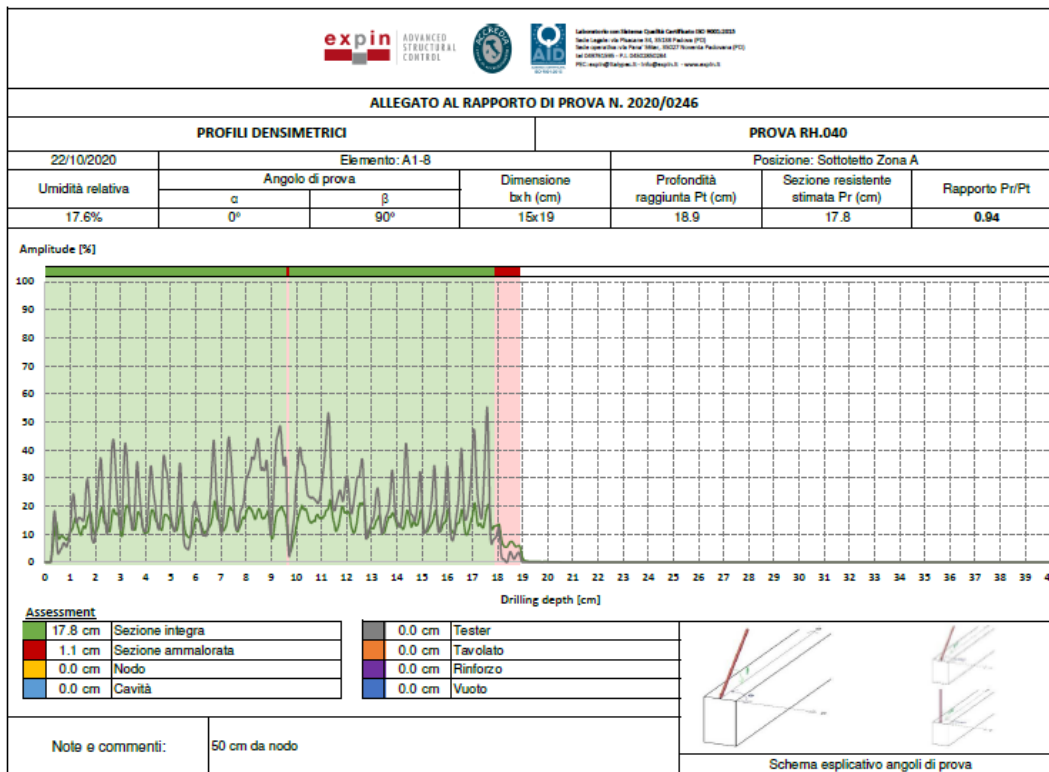
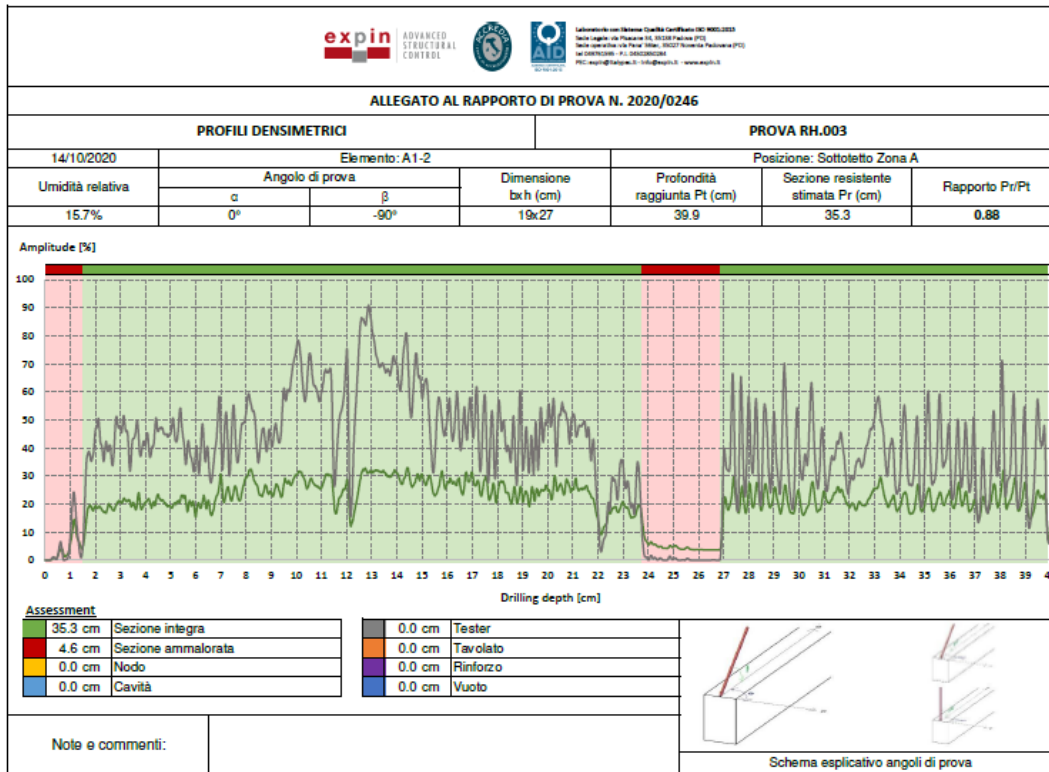
C7	2	21	28	RH.243	13,8	0°	0°	21,9	21,9	1,00	Testa puntone su N1
C7	2	21,5	29	RH.208	18,4	0°	-90°	30,1	30,1	1,00	Prossimità N2
C7	7	19,5	26	RH.205	18,1	0°	90°	30,3	27,8	0,92	Ispezione N7
C7	9	20	29	RH.238	15,6	0°	0°	20,9	20,9	1,00	Testa su N10 (T)
C8	1	NR	NR	RH.228	17,3	45°	-45°	26,0	25,8	0,99	Testa catena su N10
C8	4	19	26	RH.248	15,3	0°	0°	19,5	19,5	1,00	Testa monaco su N3
C8	7	20	29	RH.251	15,3	0°	0°	19,3	18,8	0,97	Base su N7 (T)
C9	1	NR	NR	RH.185	NR	45°	0°	24,5	14,5	0,59	Testa catena su N1
C9	1	NR	NR	RH.230	16,4	45°	45°	24,9	23,6	0,95	Testa catena su N10
C9	2	19	25	RH.217	16,0	0°	-90°	26,8	17,8	0,66	Mezzeria N2-N3
C9	2	19	28	RH.242	13,5	0°	0°	18,6	18,6	1,00	Prossimità N2 (T)
C9	9	20	28,5	RH.218	16,2	0°	-90°	28,1	28,1	1,00	Mezzeria N8-N9
C10	1	NR	NR	RH.231	16,1	45°	-45°	24,1	21,3	0,88	Testa catena su N10
C10	2	21,5	28	RH.233	20,4	90°	0°	21,5	14,9	0,69	Testa puntone su N1
C10	2	21	27,5	RH.241	14,2	0°	0°	21,4	19,3	0,90	Prossimità N2
C10	9	23	28	RH.240	14,0	0°	0°	15,0	15,0	1,00	Su fettonatura N10
C11	1	21,5	28	RH.209	12,2	0°	90°	27,9	27,9	1,00	Ispezione N7 (T)
C11	4	19	27	RH.247	14,1	0°	0°	17,5	16,1	0,92	Prossimità N5 (T)
C11	7	23	28	RH.252	15,0	0°	0°	22,9	22,9	1,00	Prossimità N8 (T)
C11	10	16	19	RH.187	12,5	0°	-90°	23,4	20,0	0,85	Su parte sup. N8



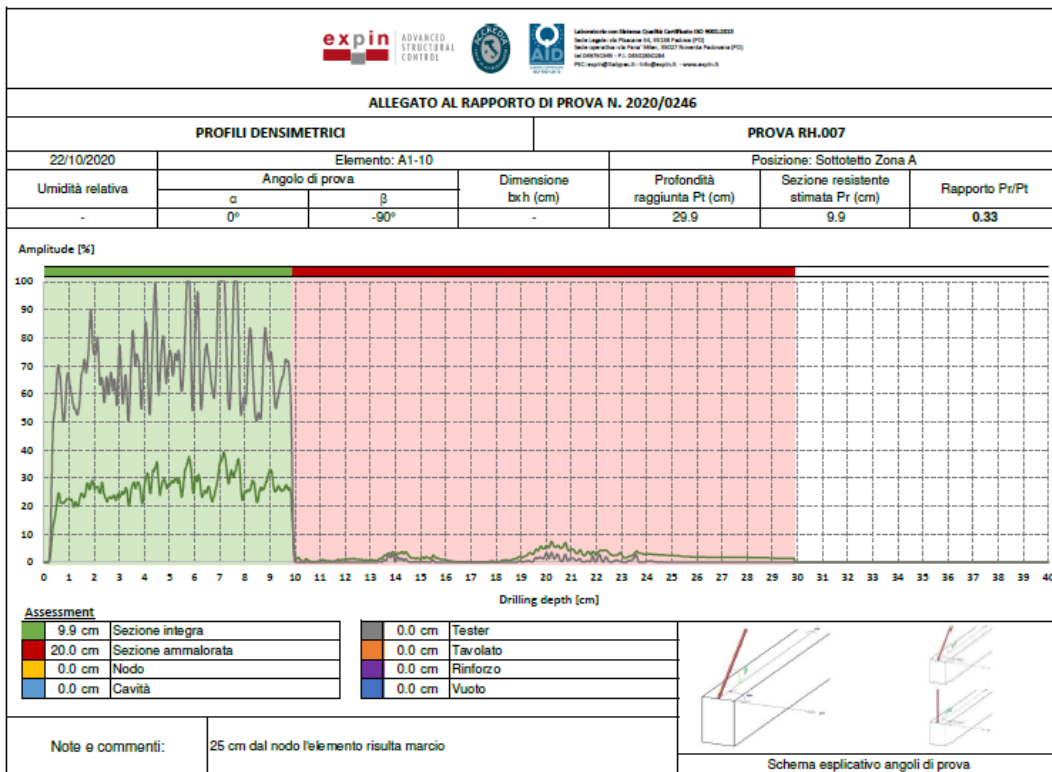
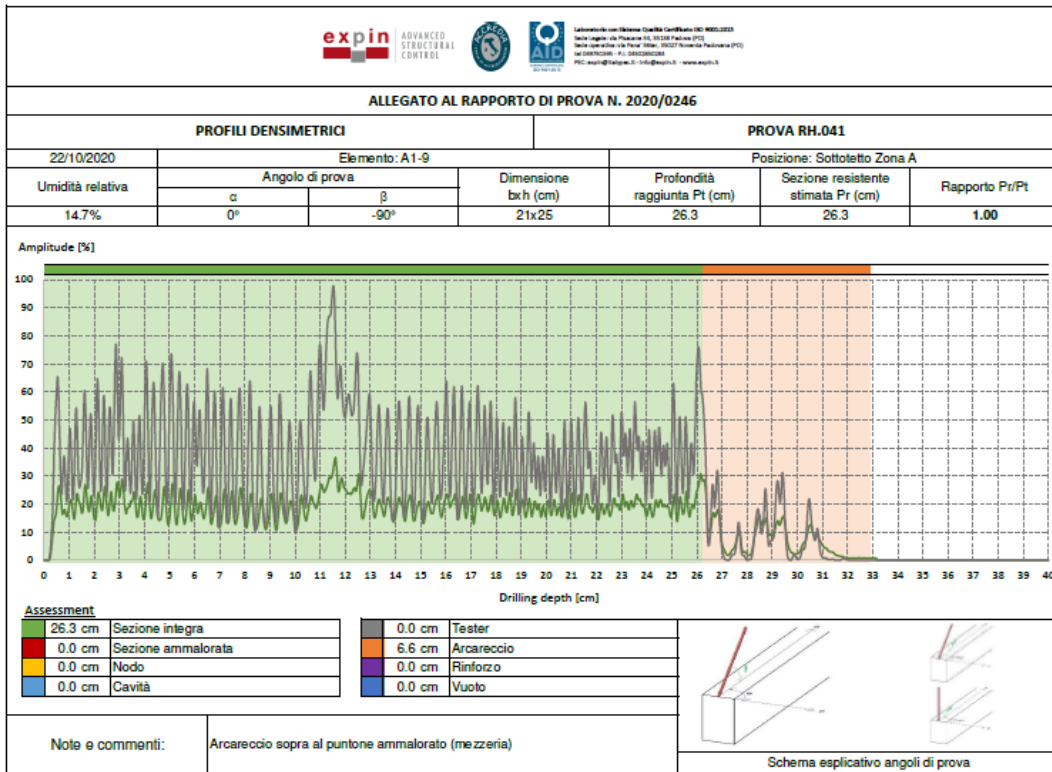
APPENDICE



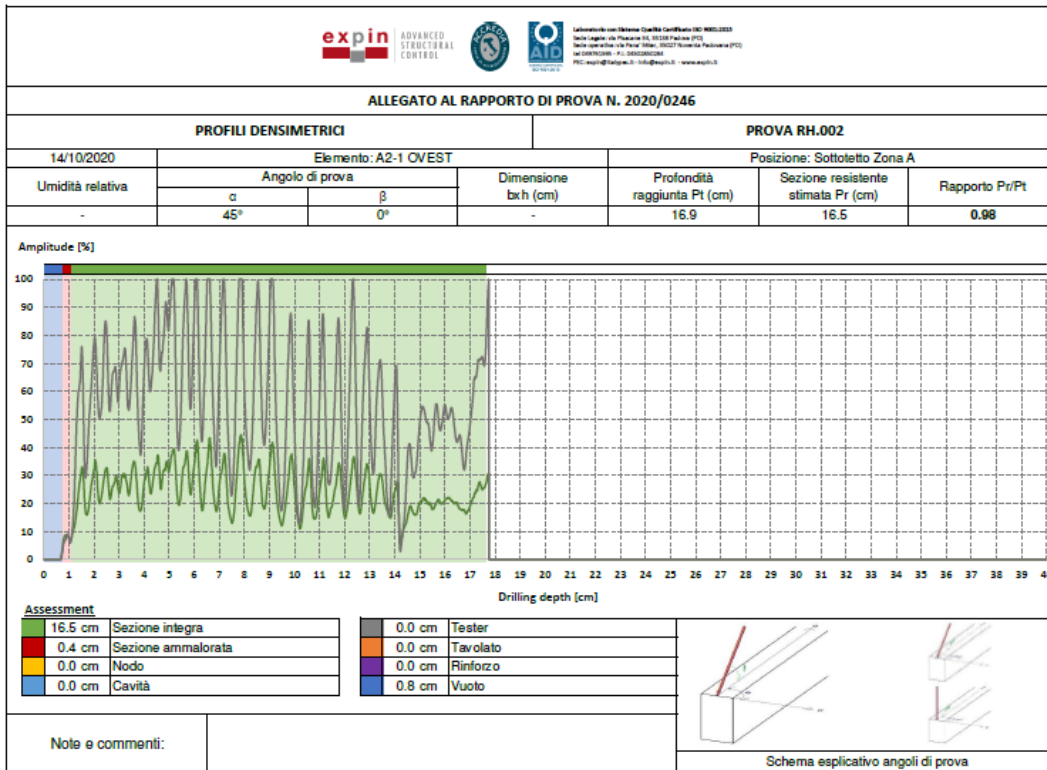
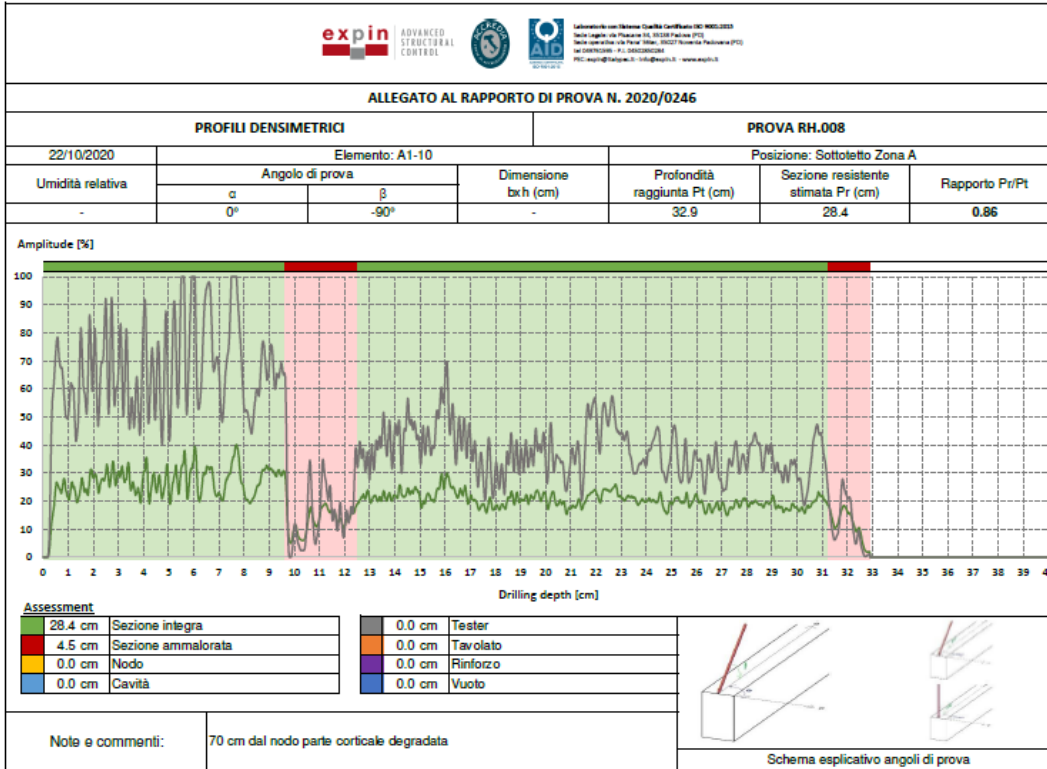
APPENDICE



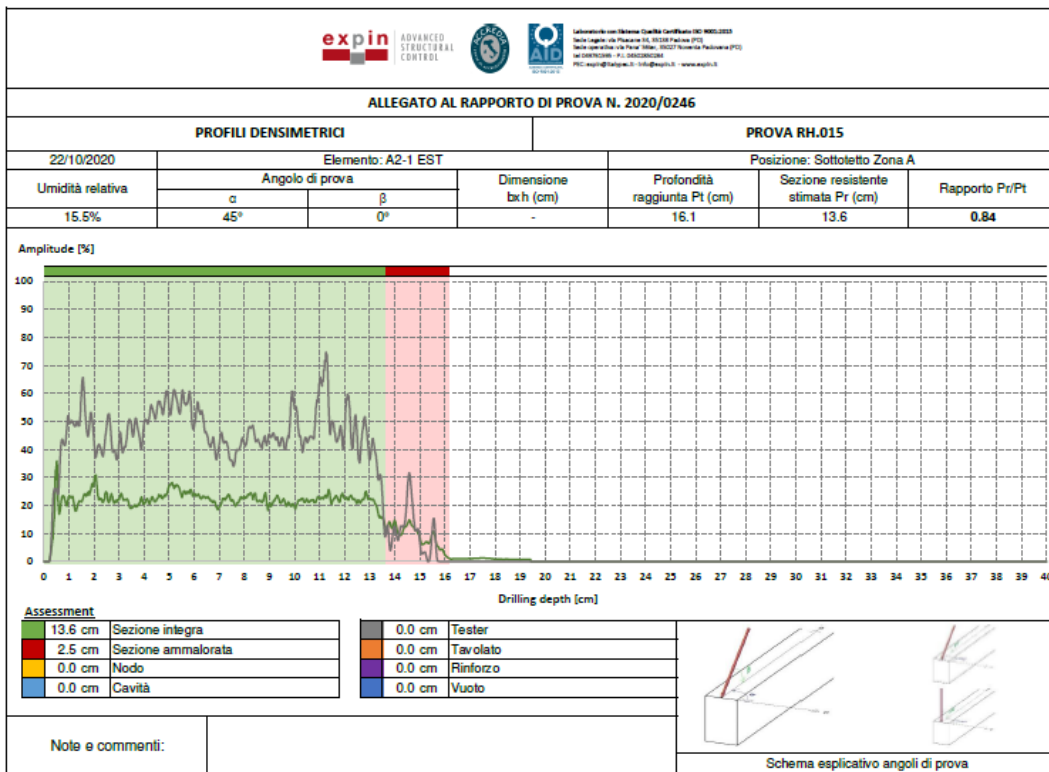
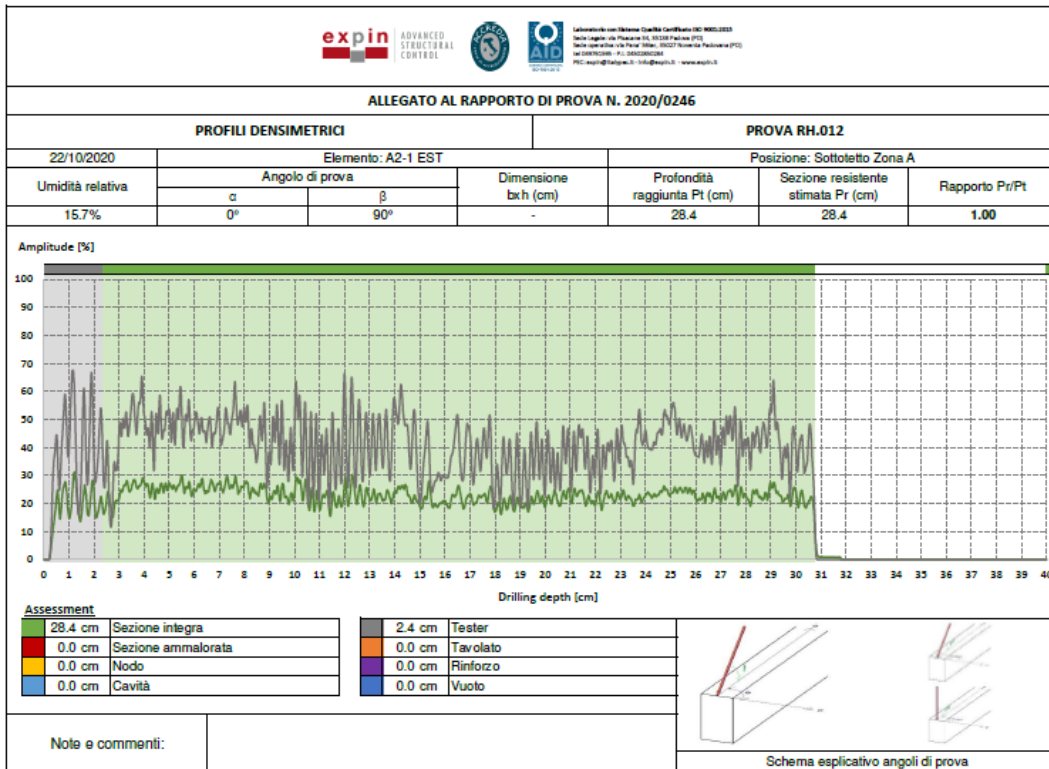
APPENDICE



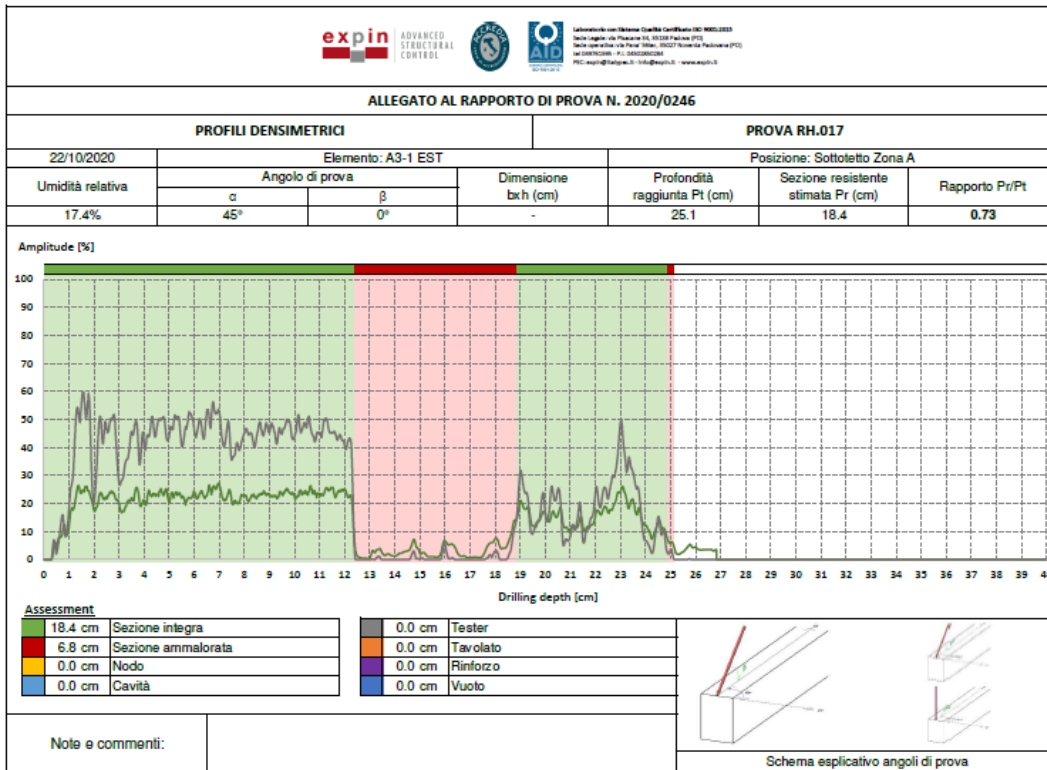
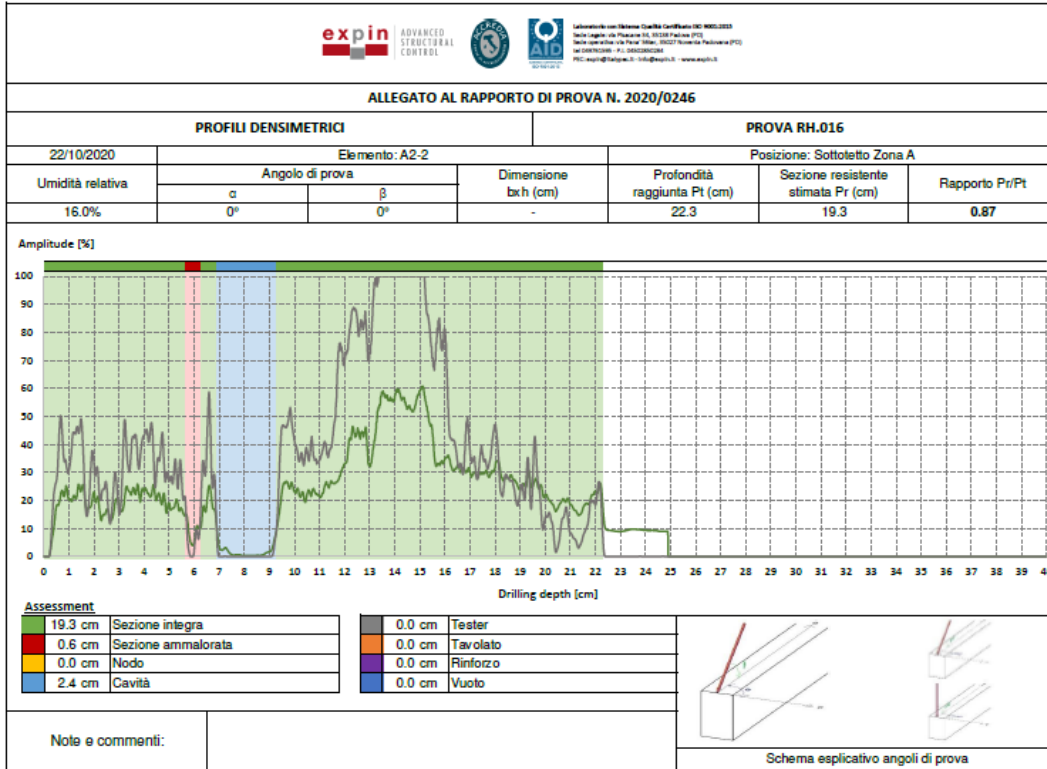
APPENDICE



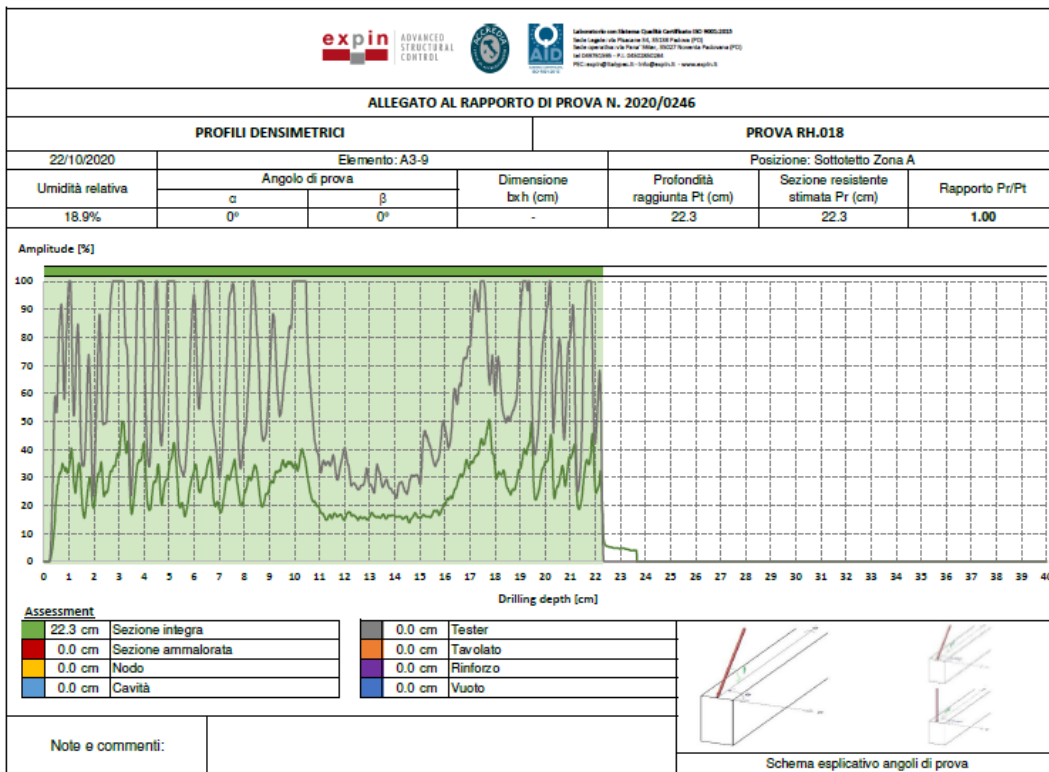
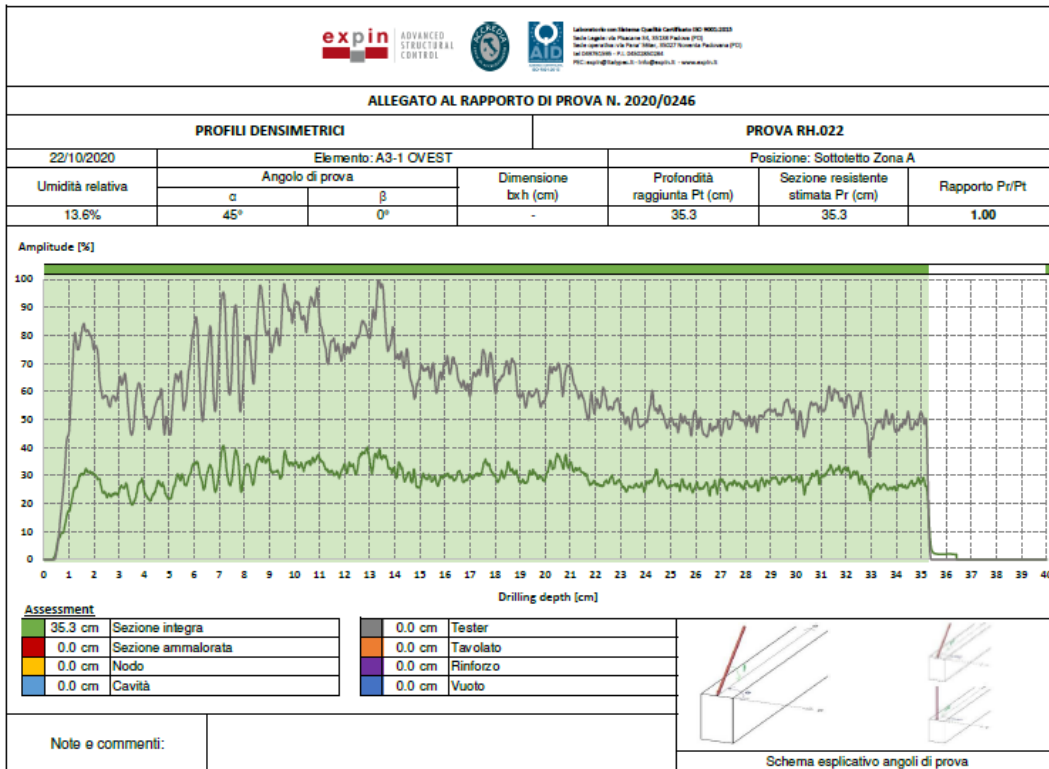
APPENDICE



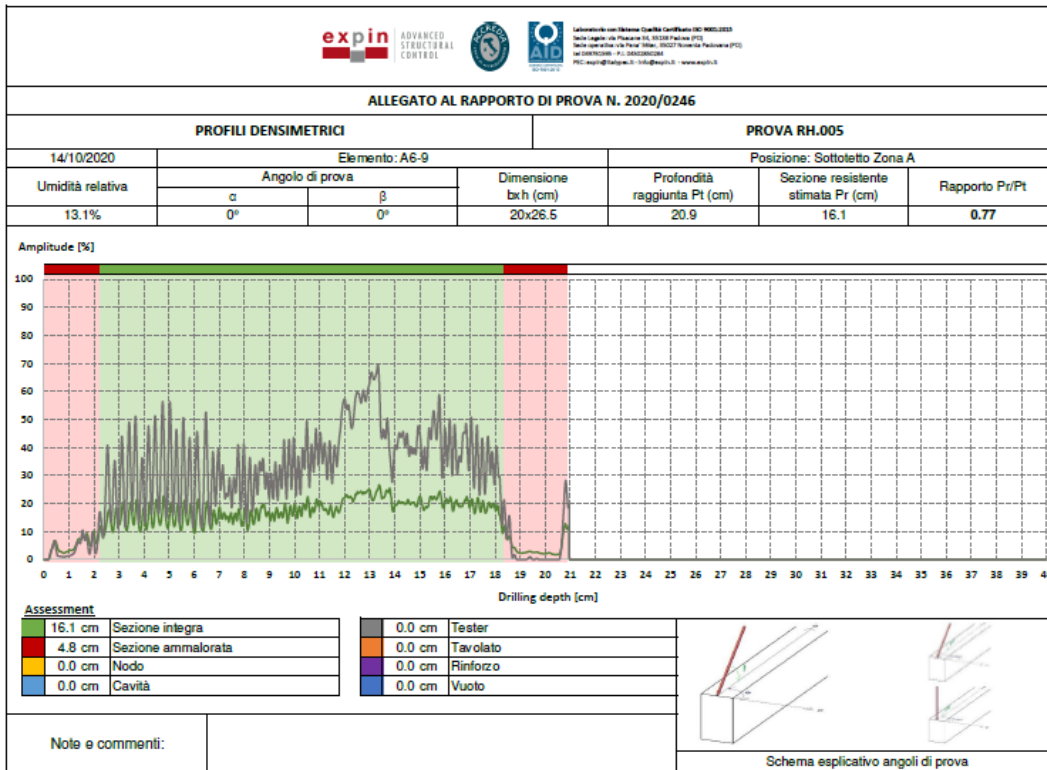
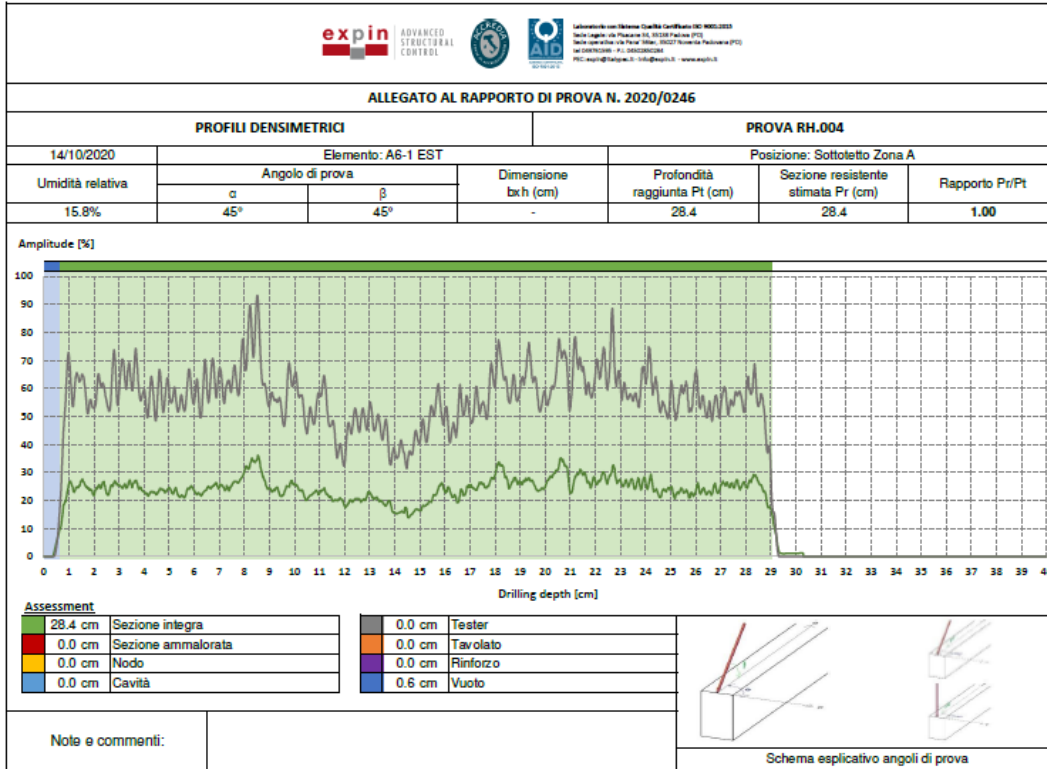
APPENDICE



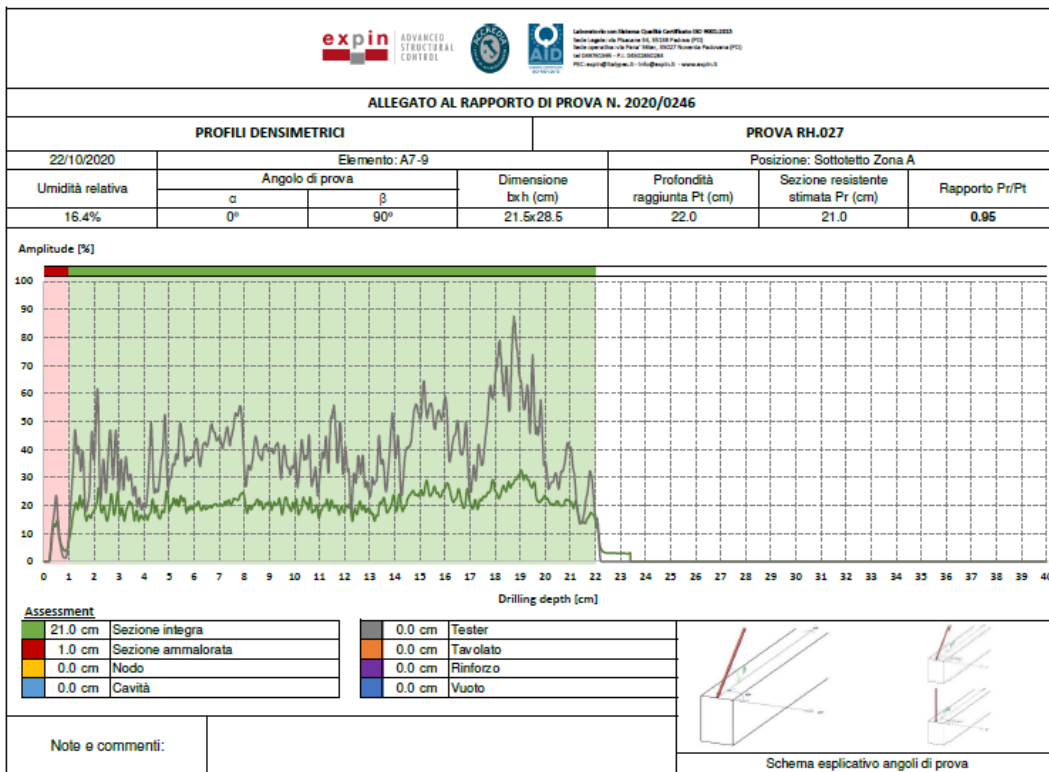
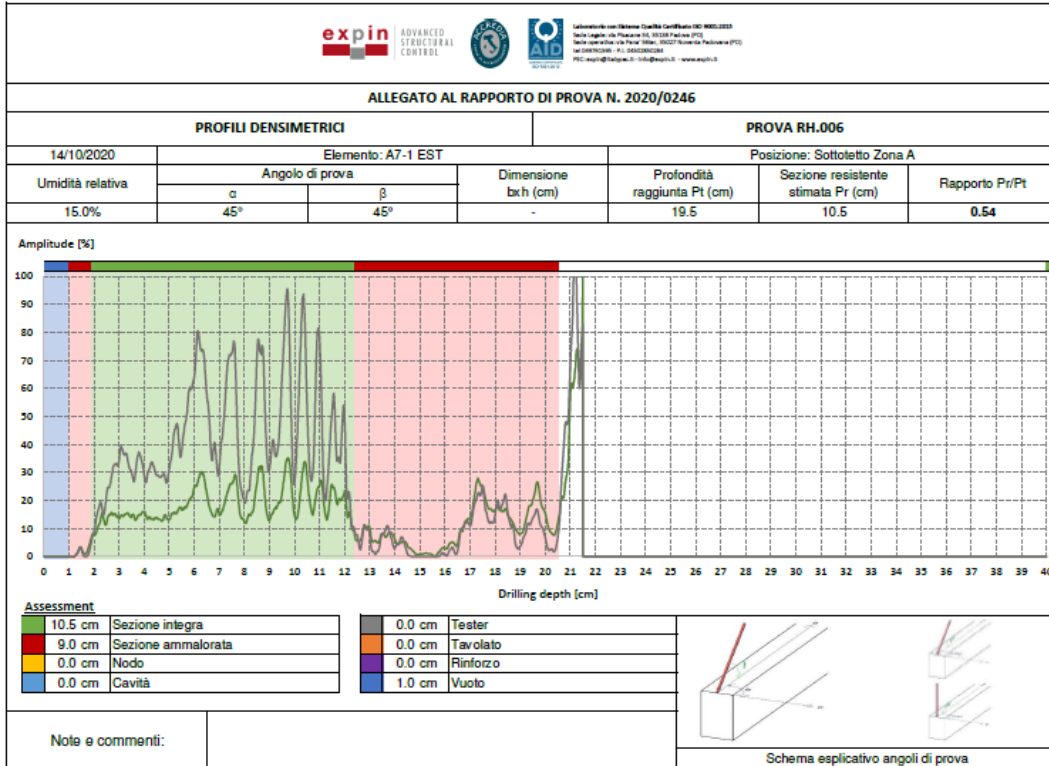
APPENDICE



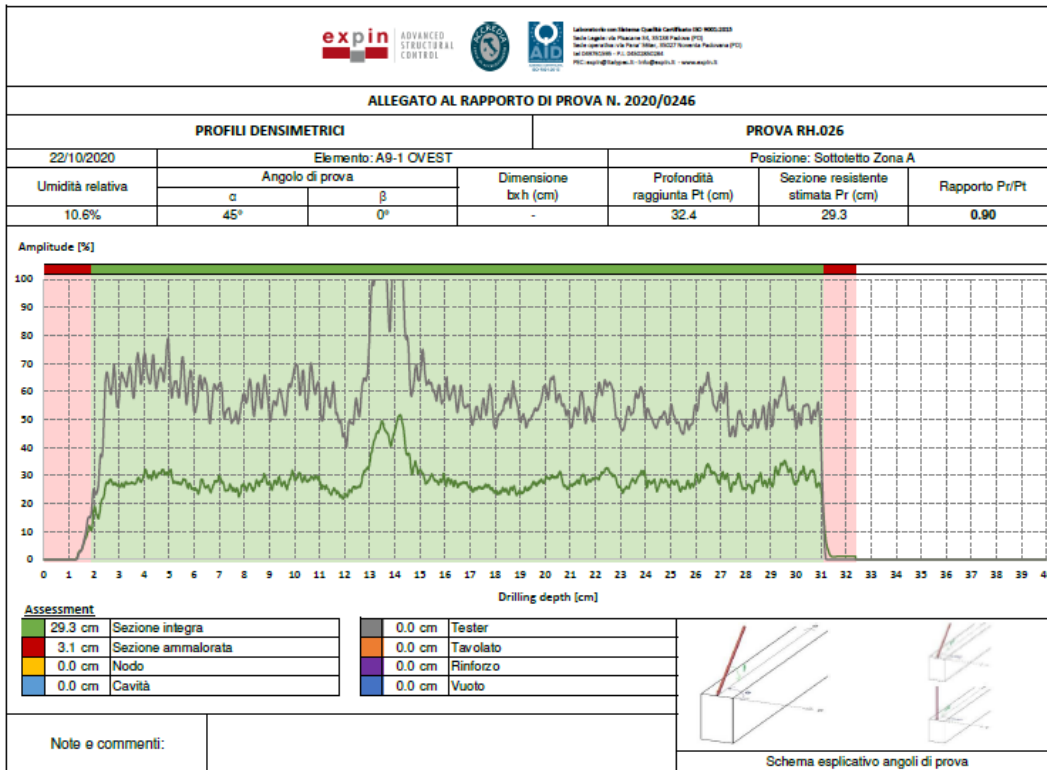
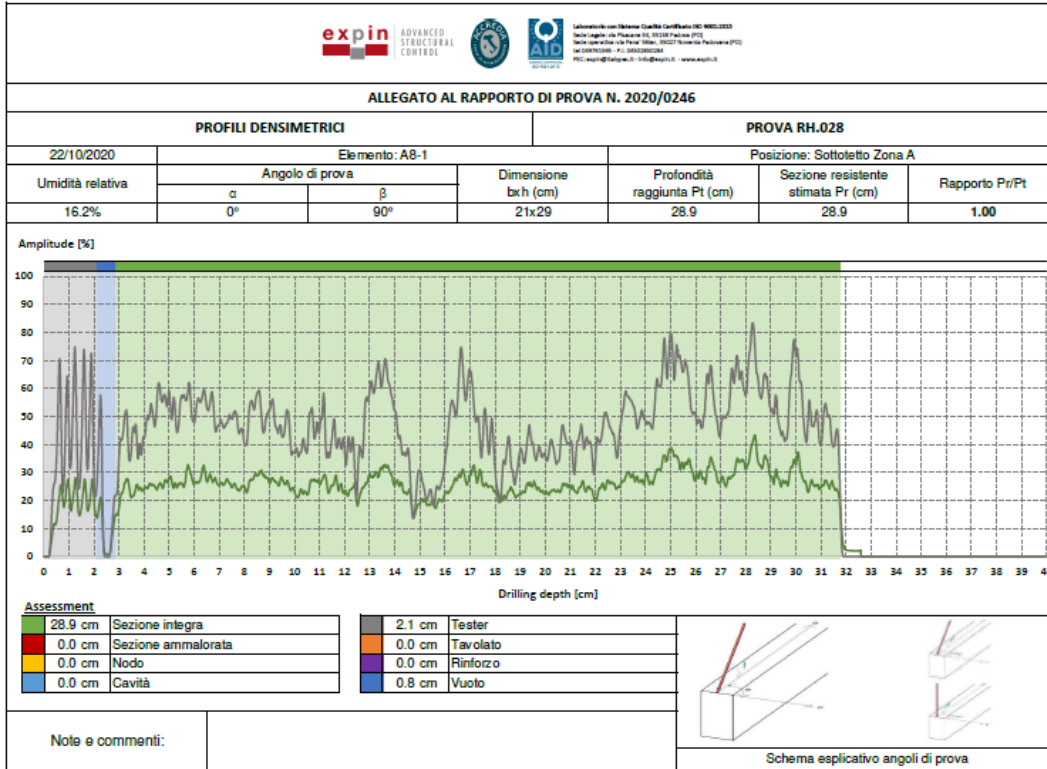
APPENDICE



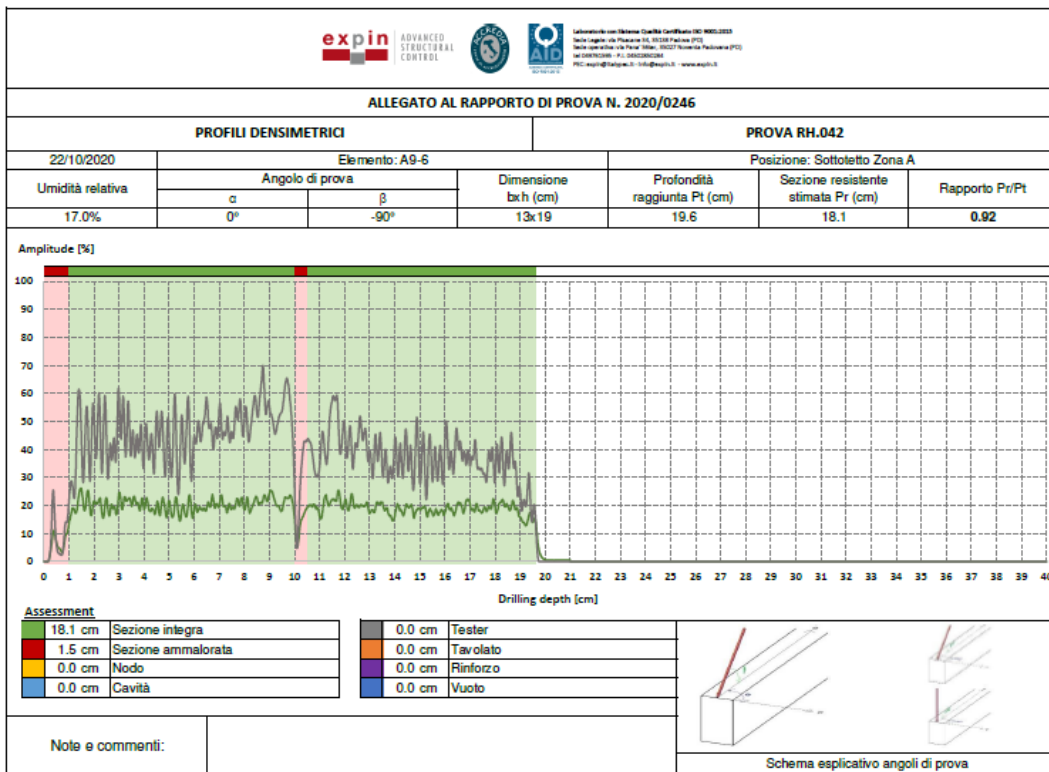
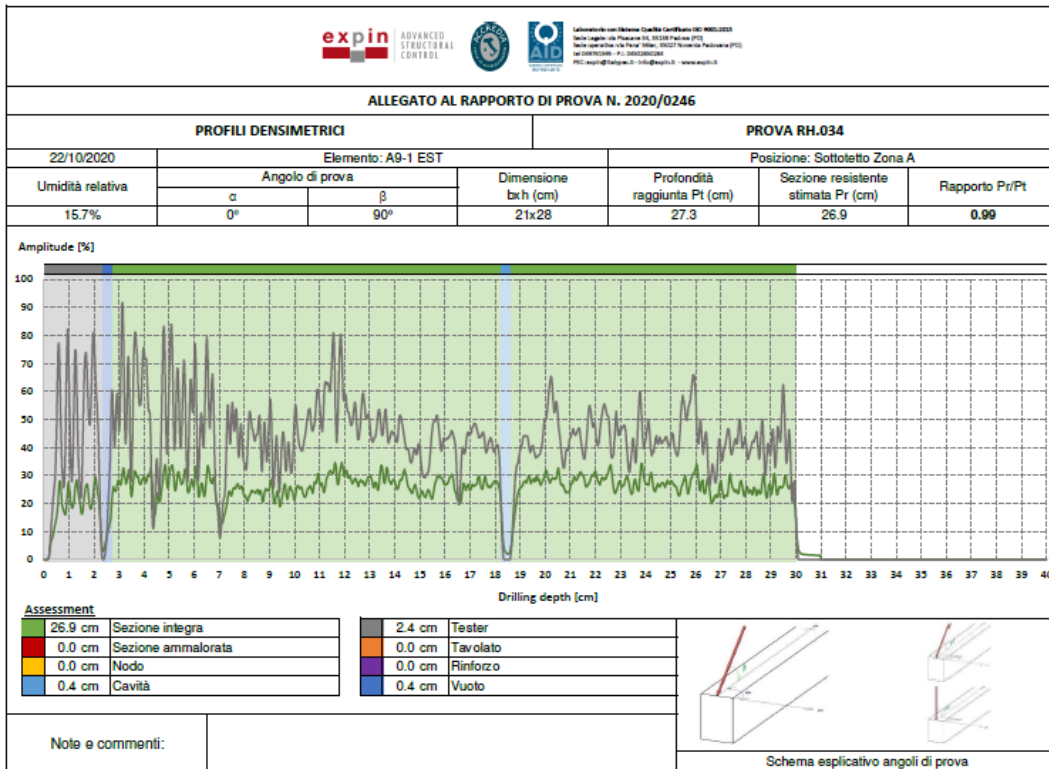
APPENDICE



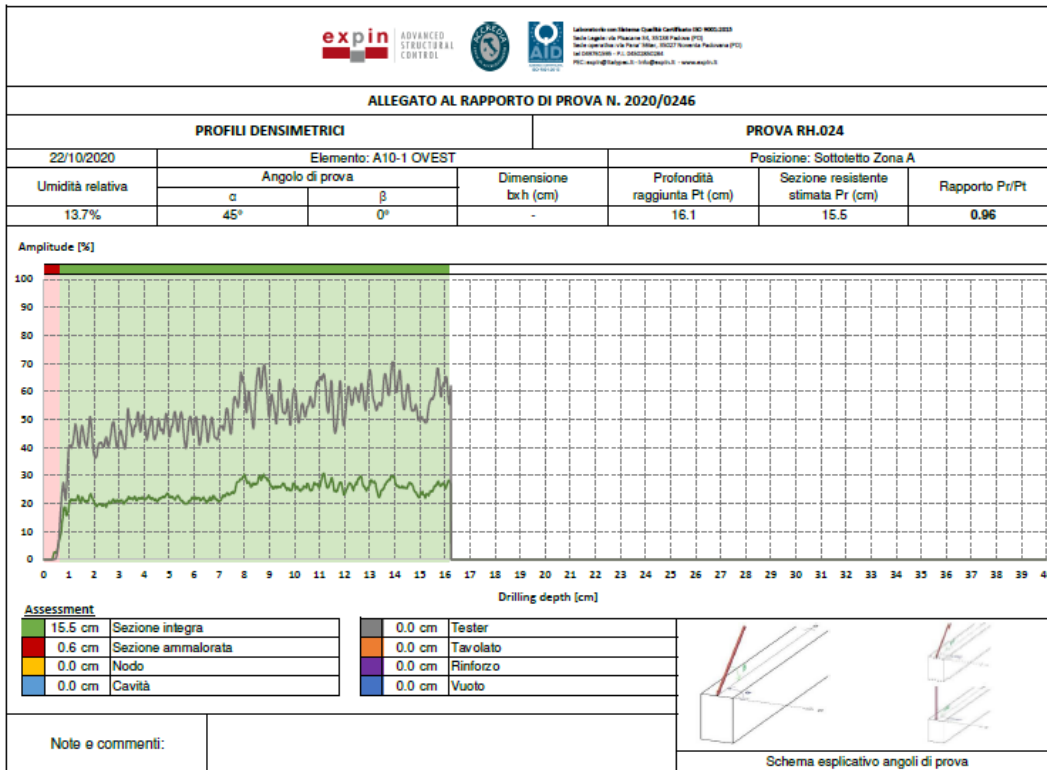
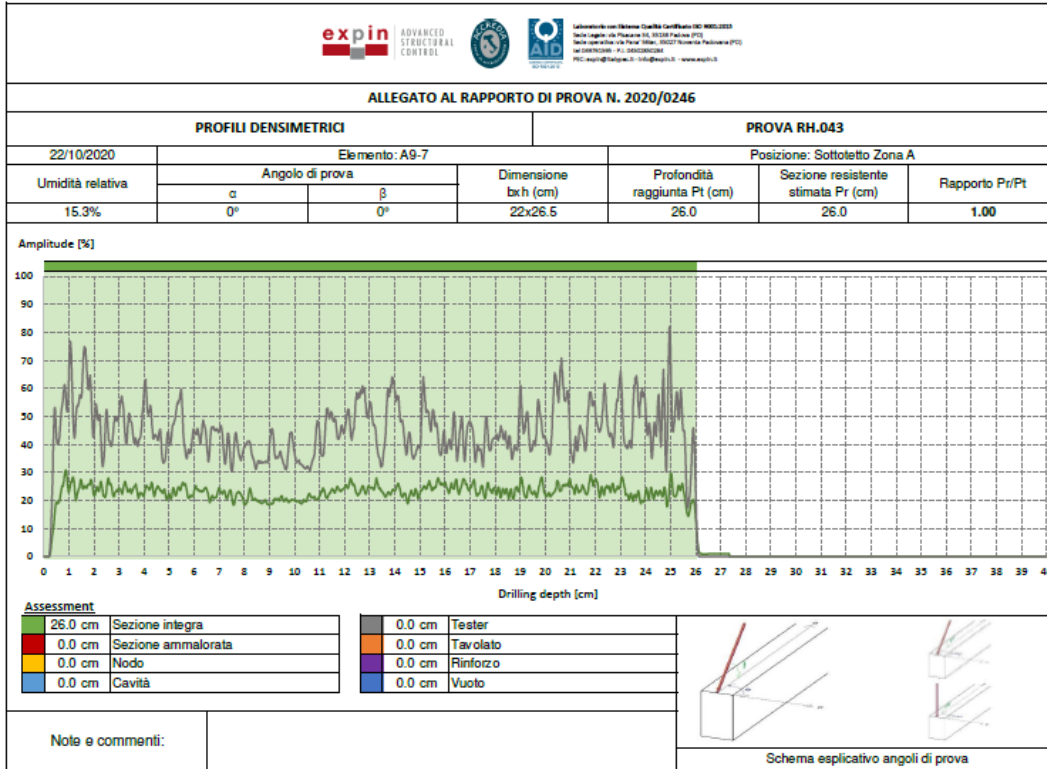
APPENDICE



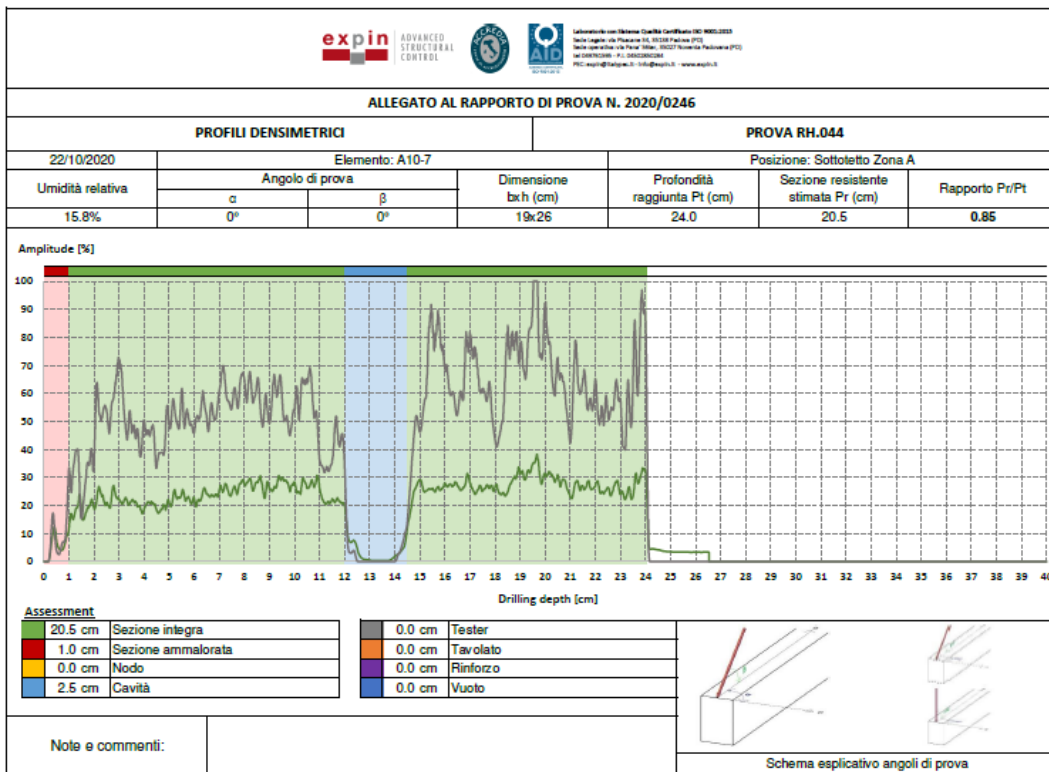
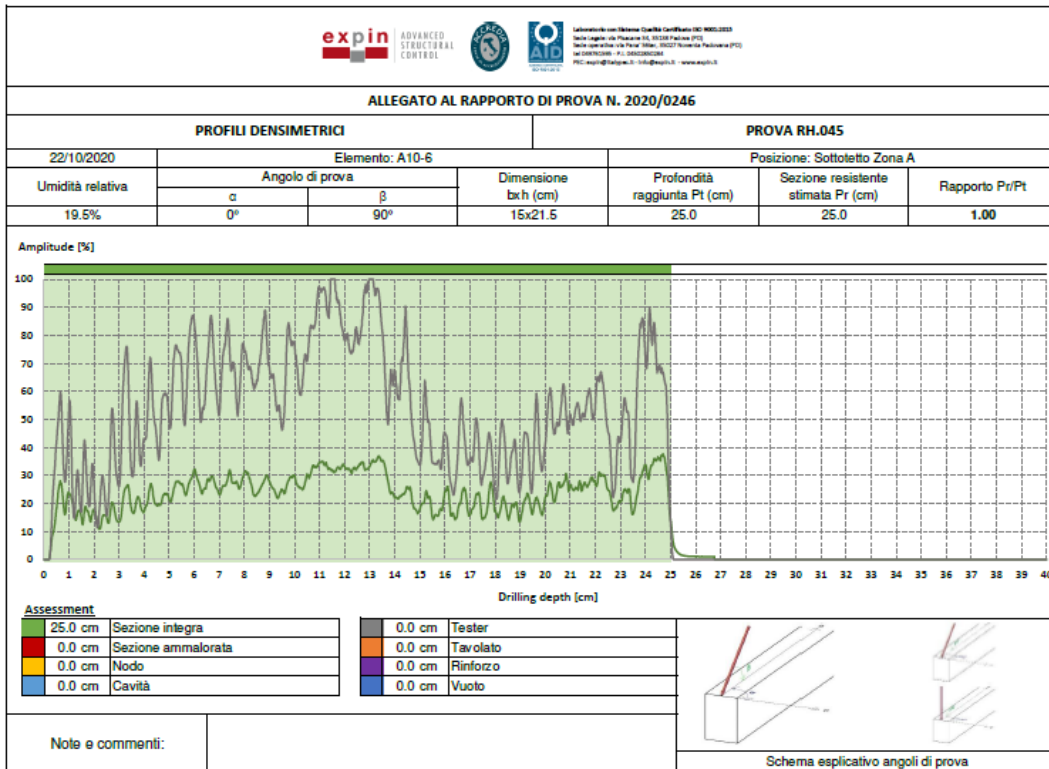
APPENDICE



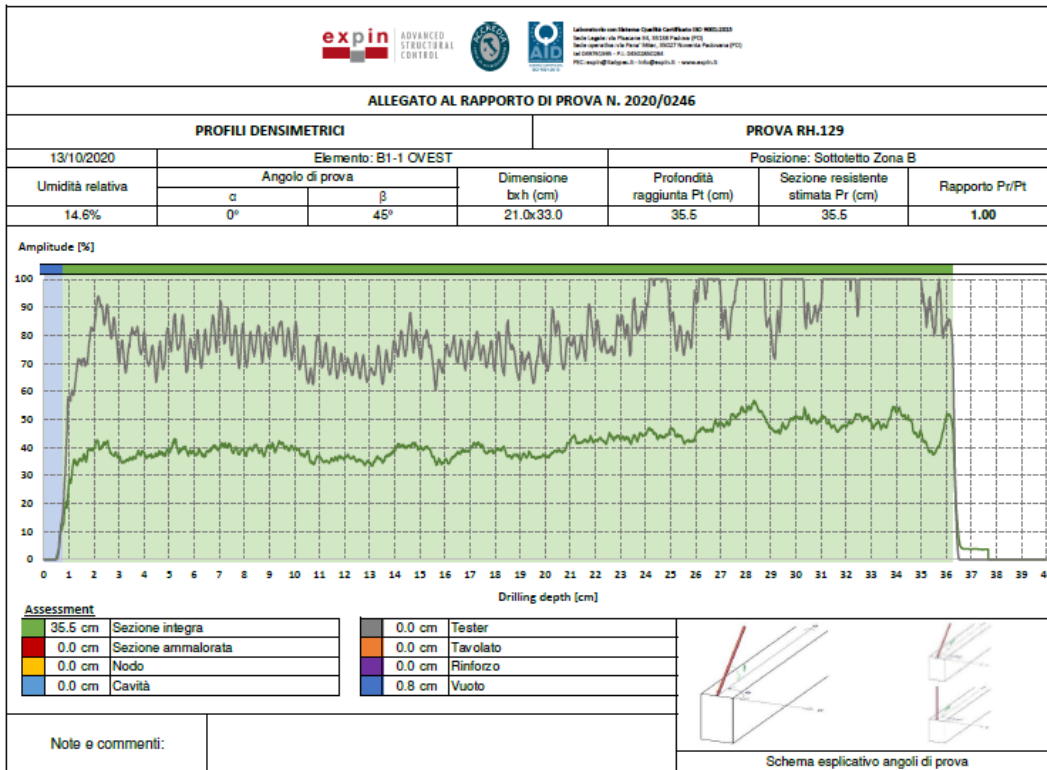
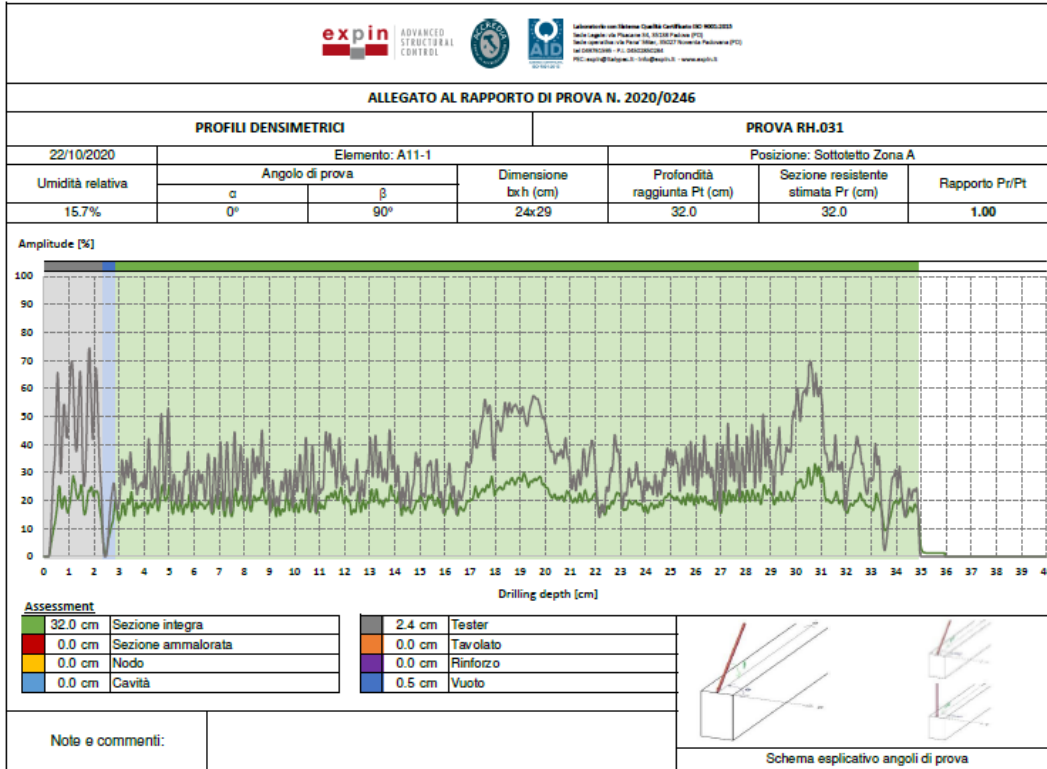
APPENDICE



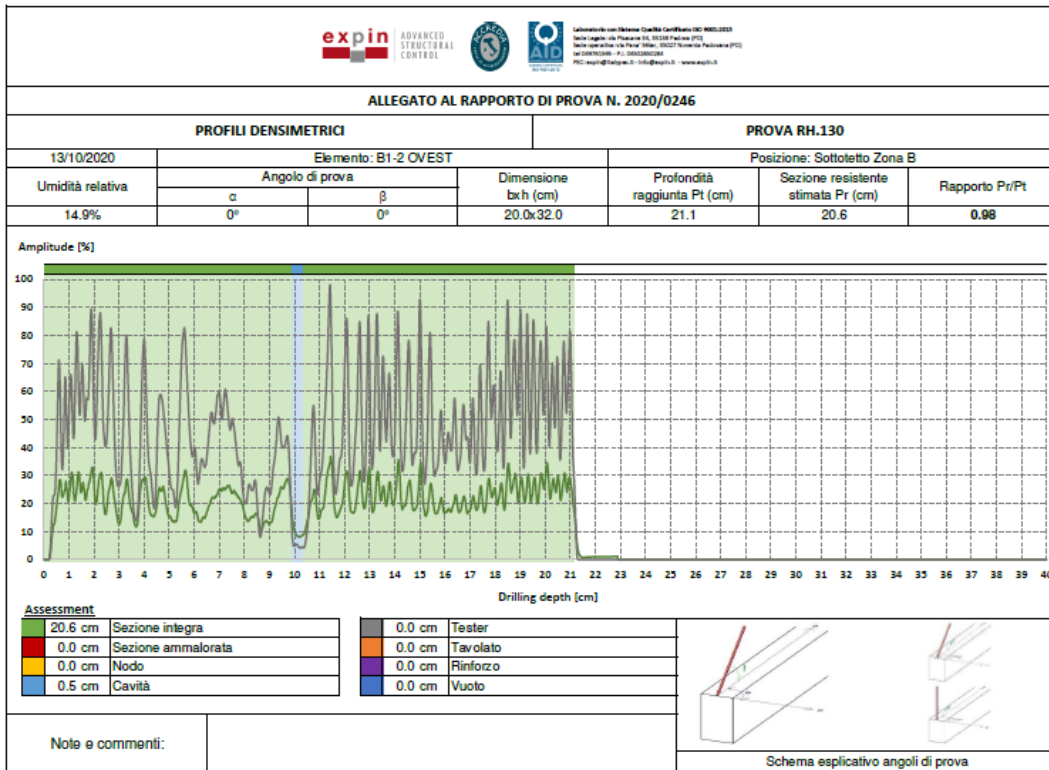
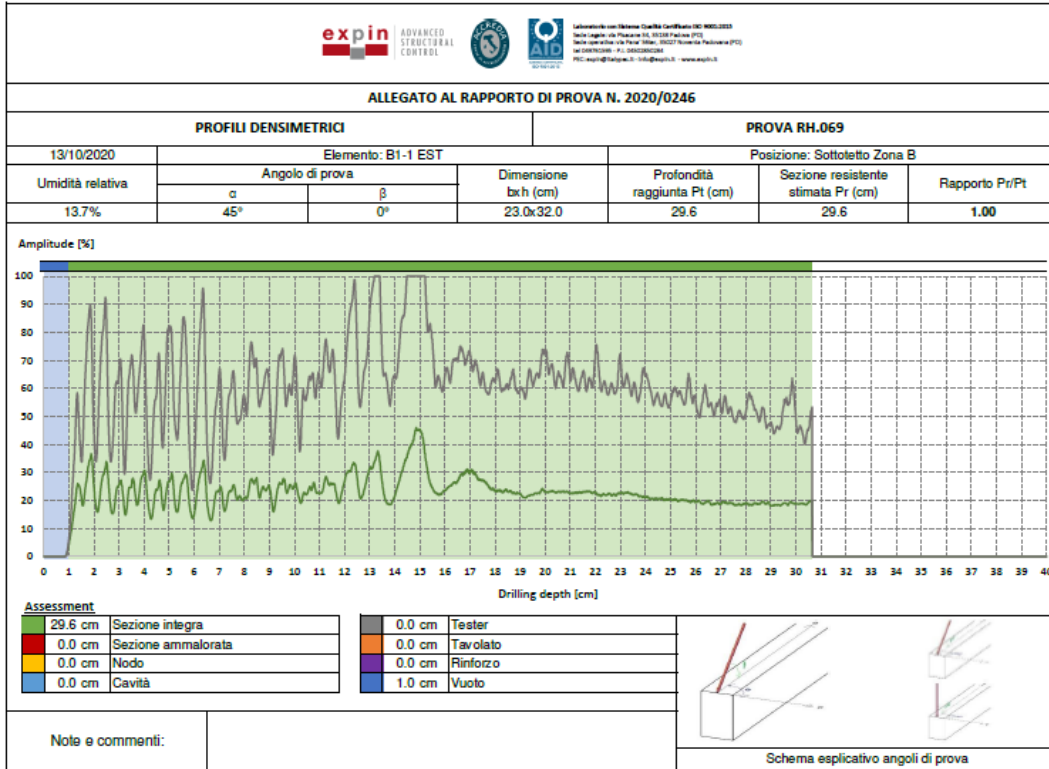
APPENDICE



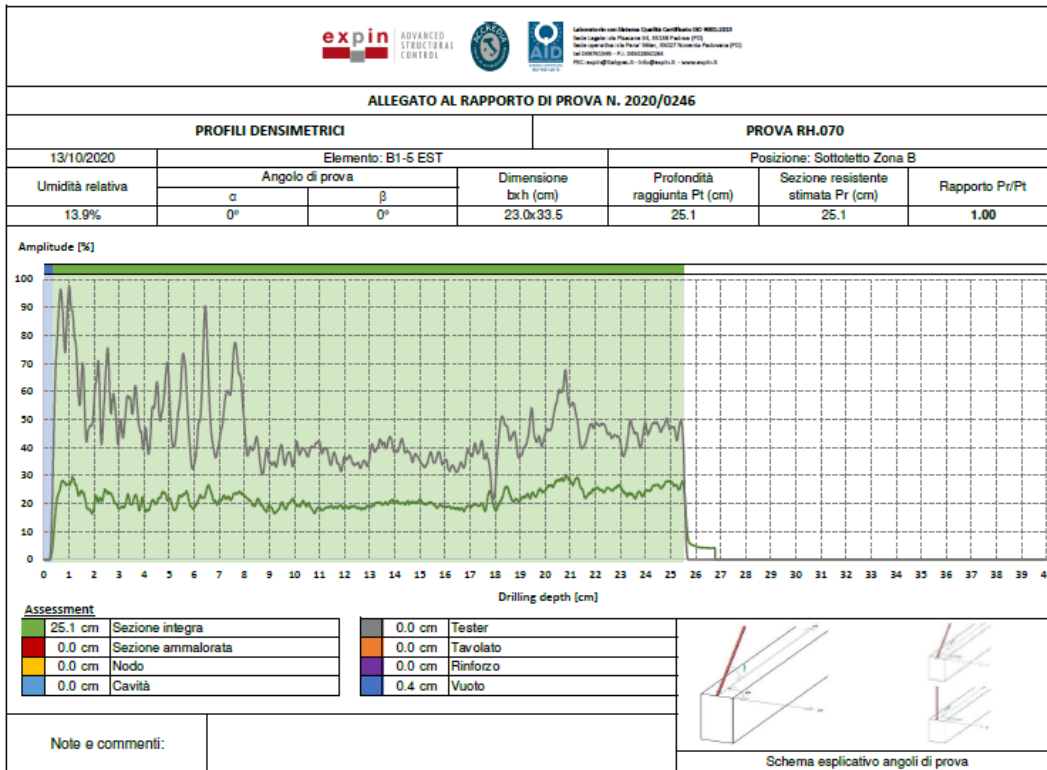
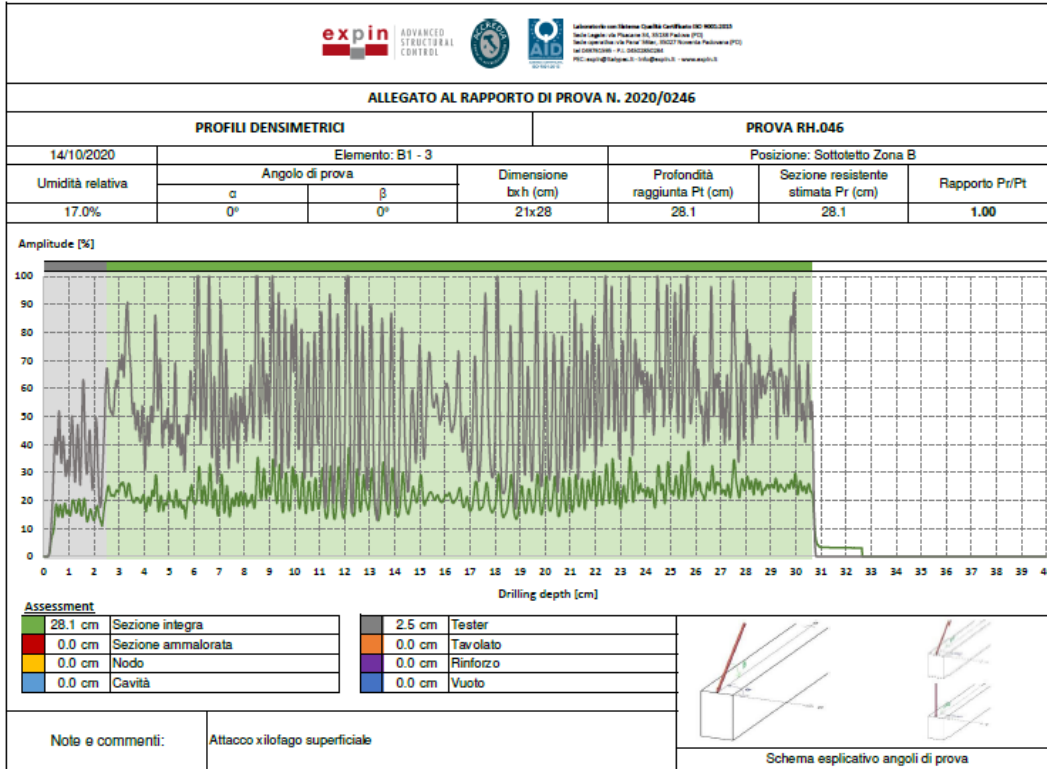
APPENDICE



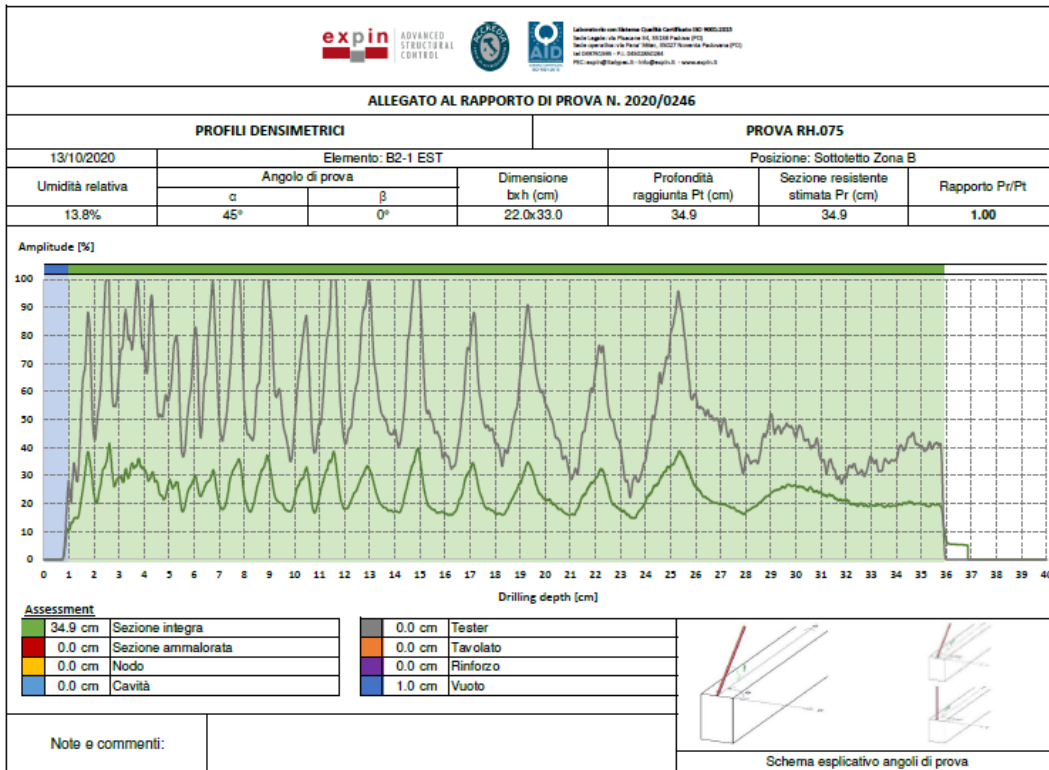
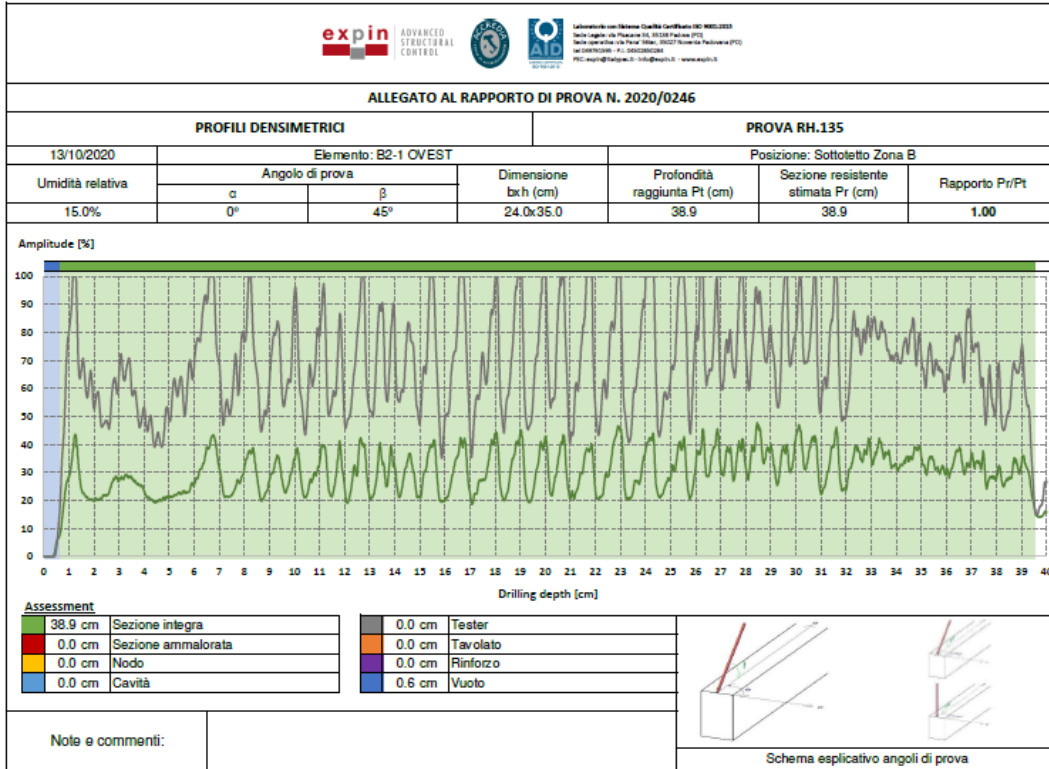
APPENDICE



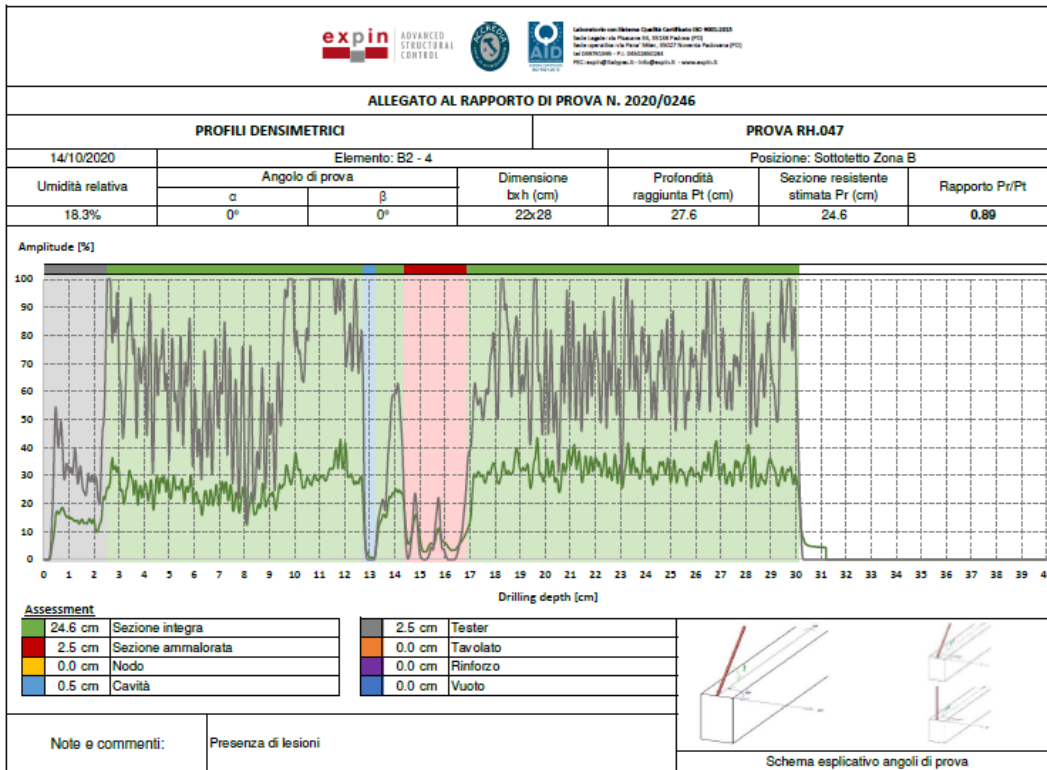
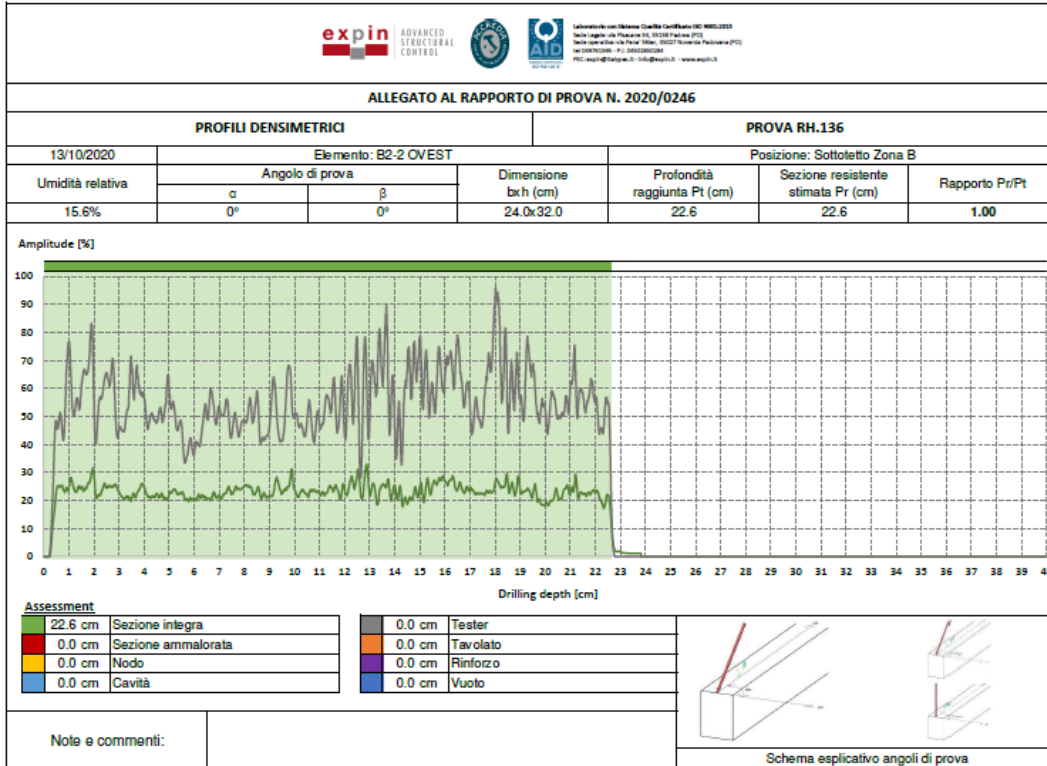
APPENDICE



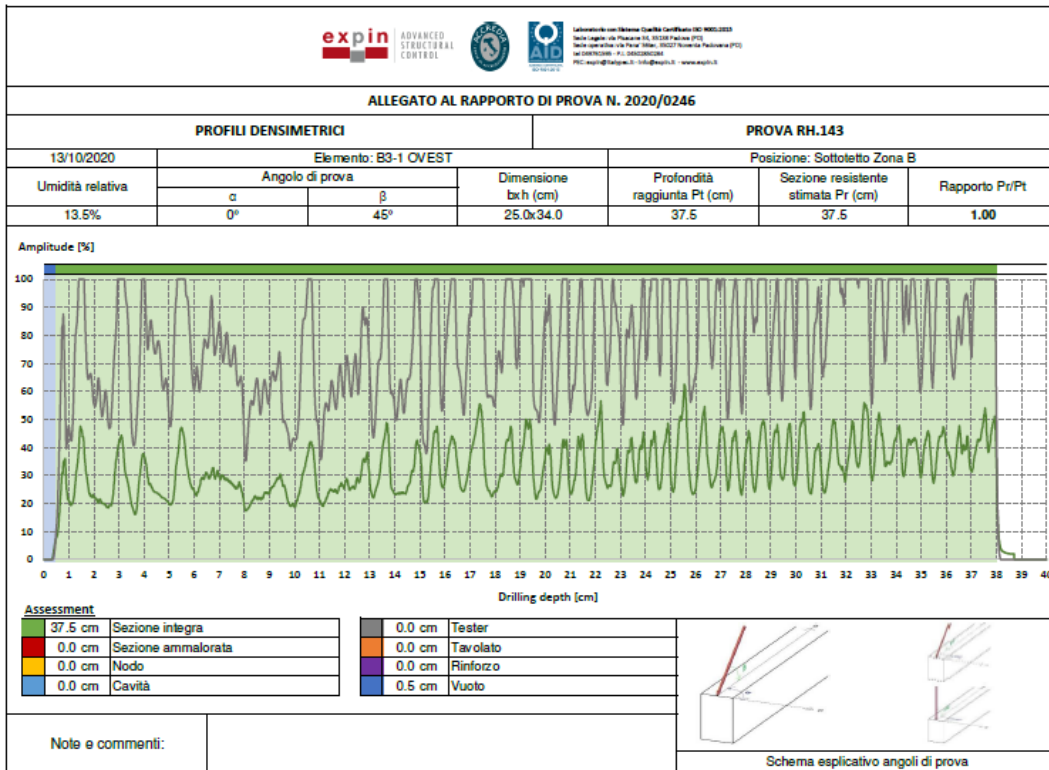
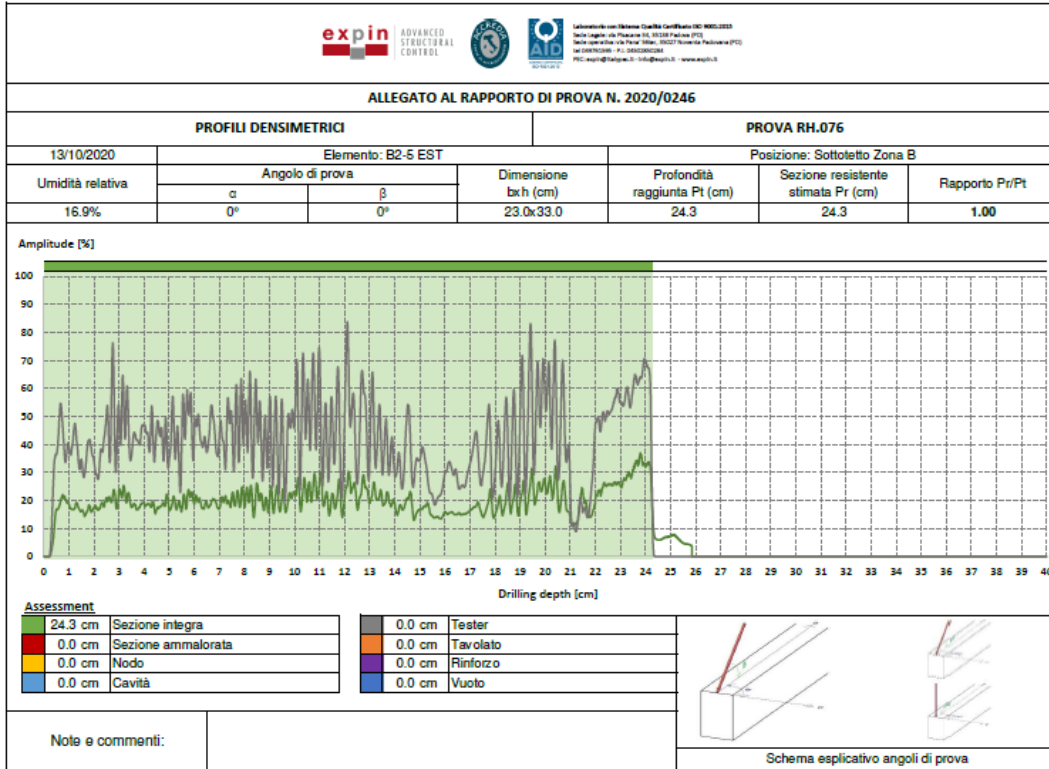
APPENDICE



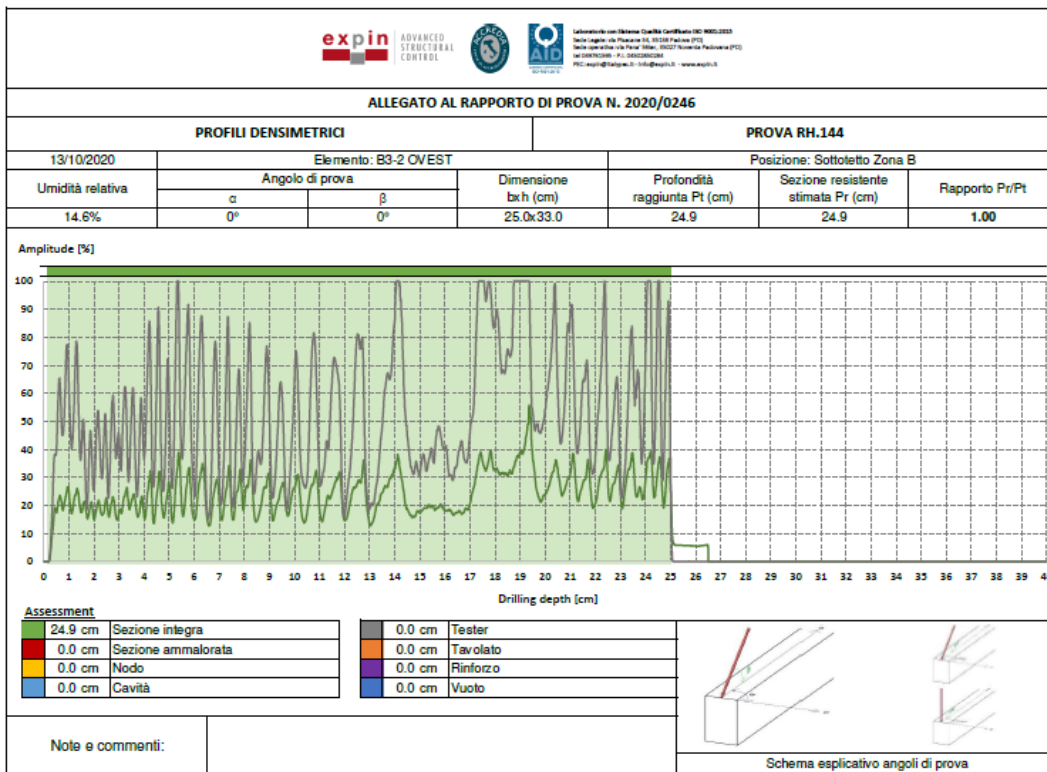
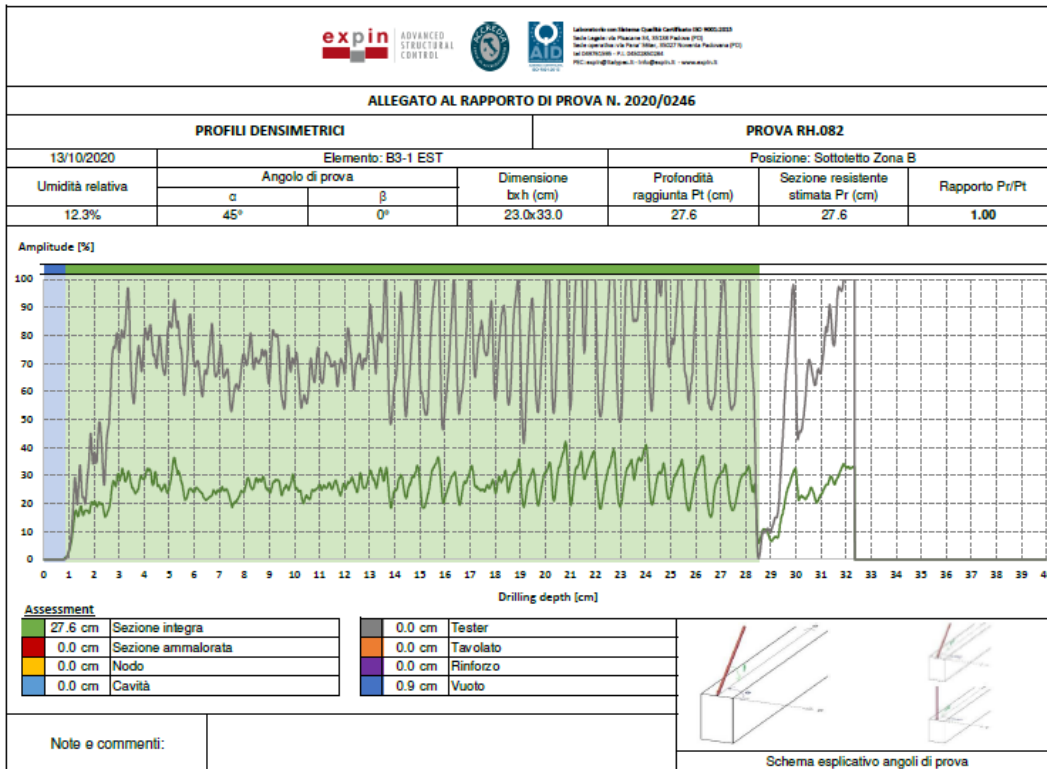
APPENDICE



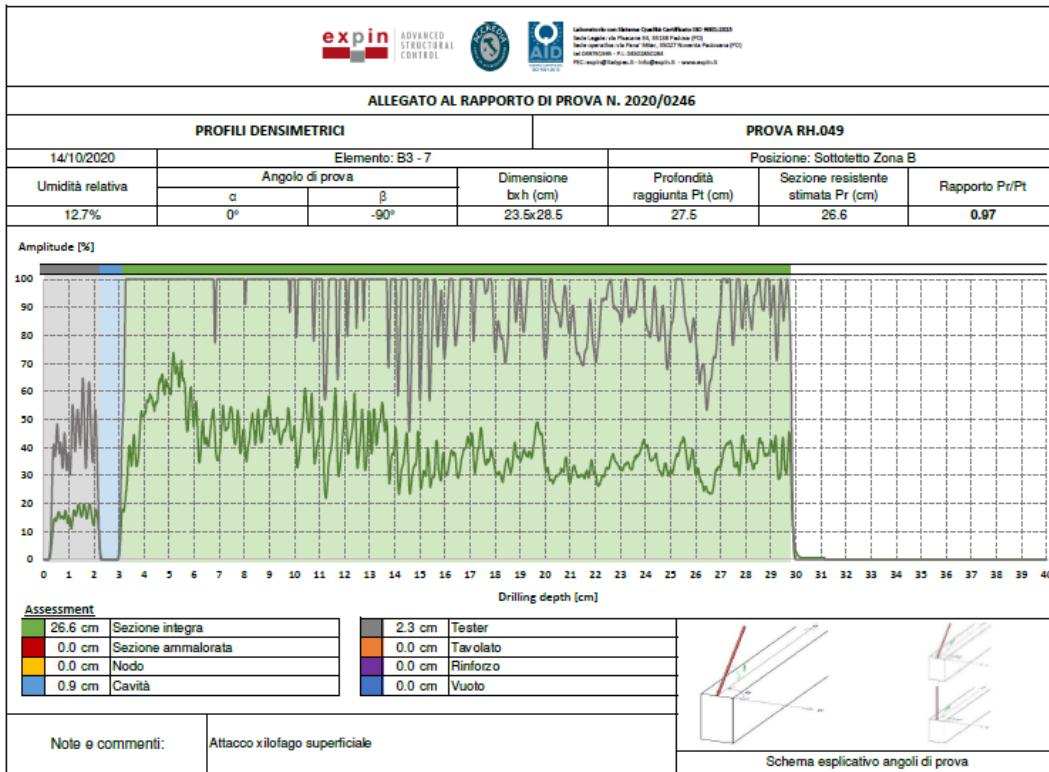
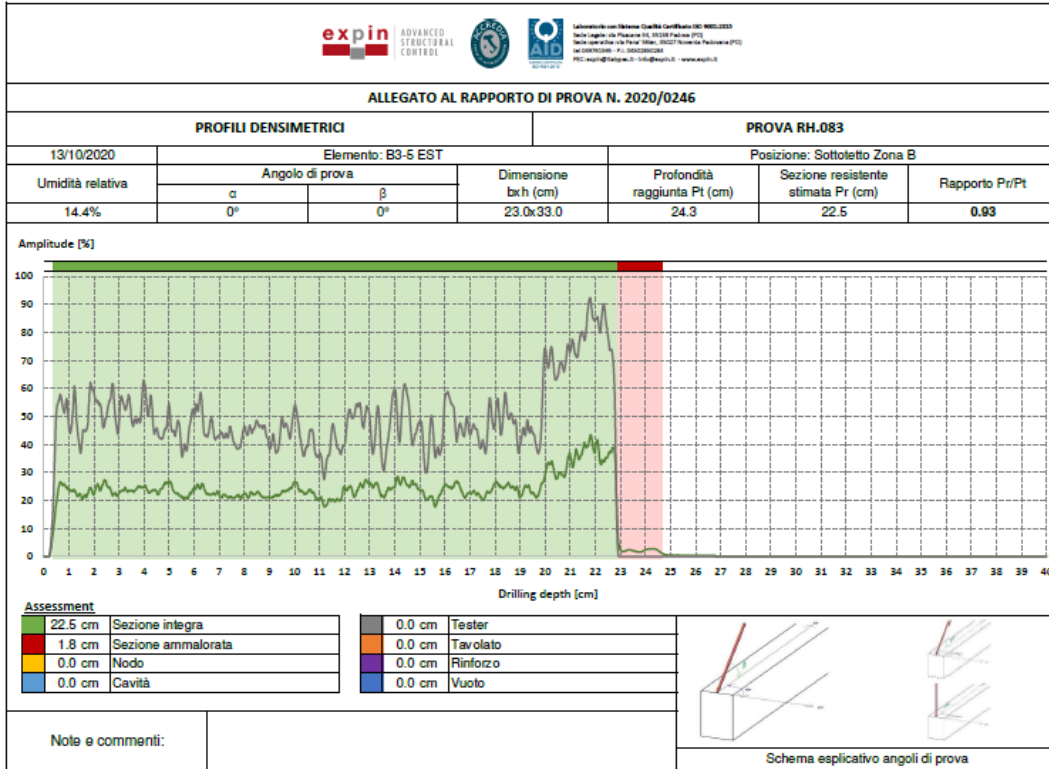
APPENDICE



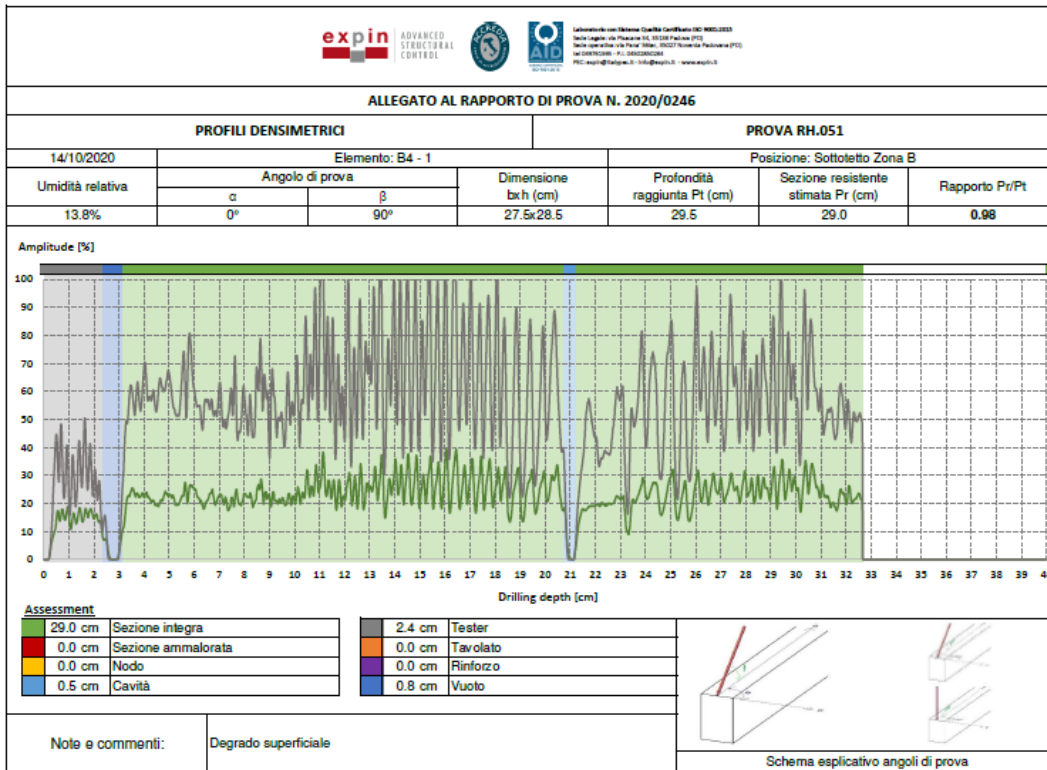
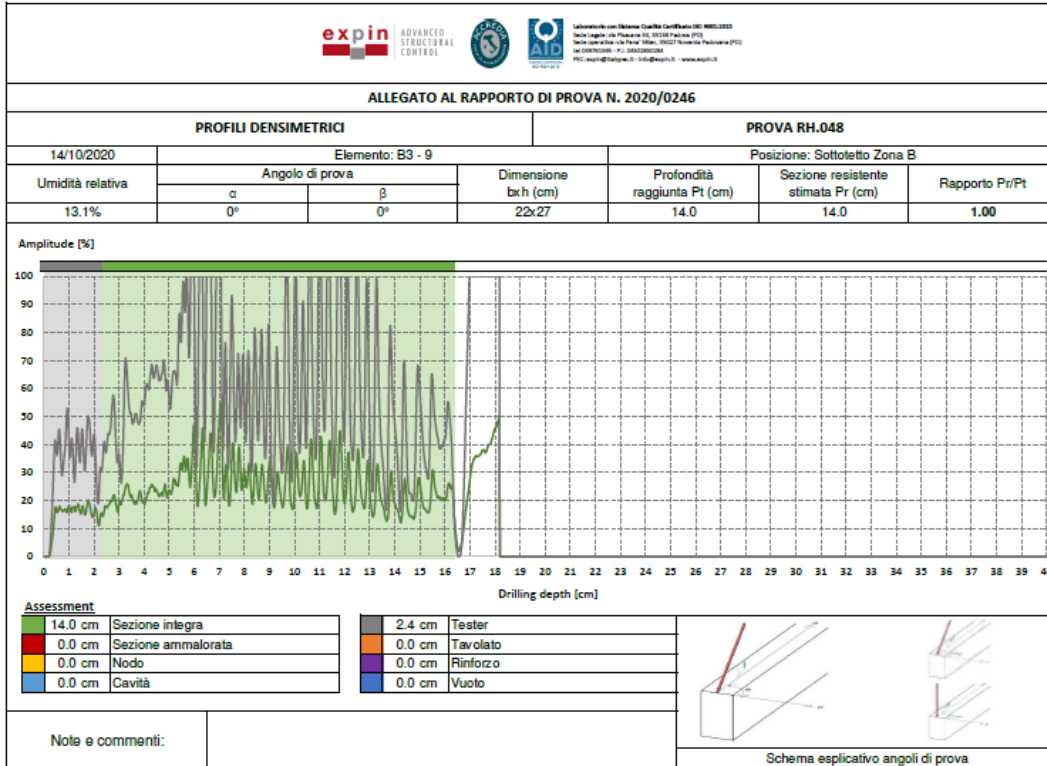
APPENDICE



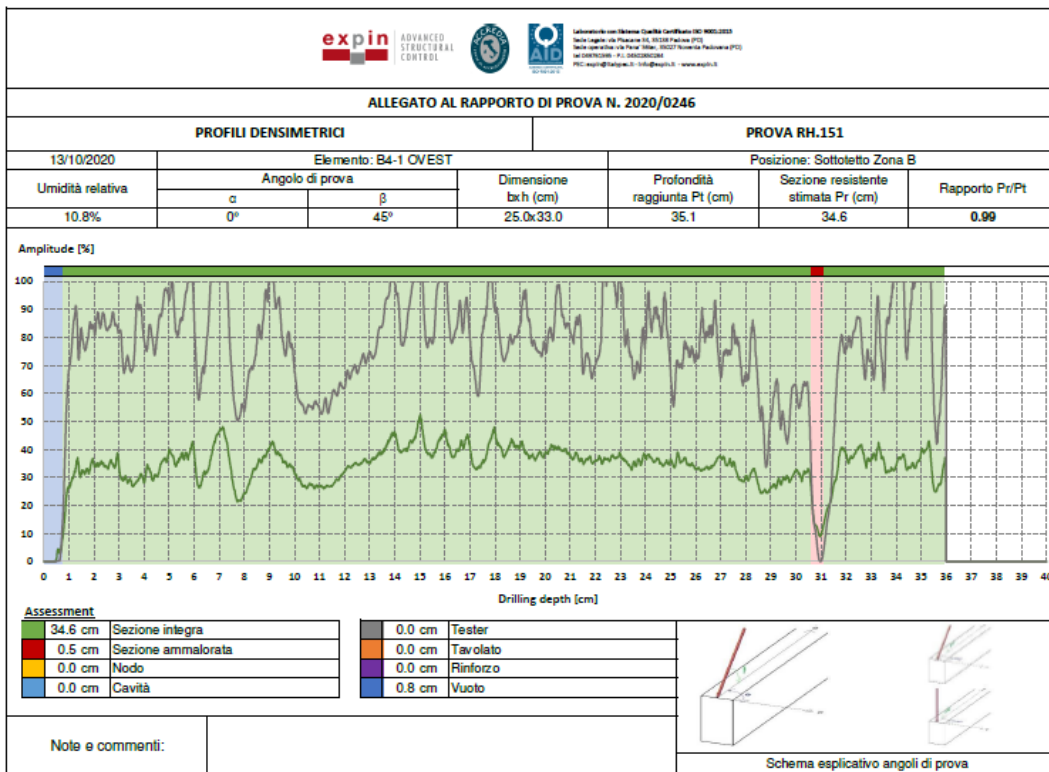
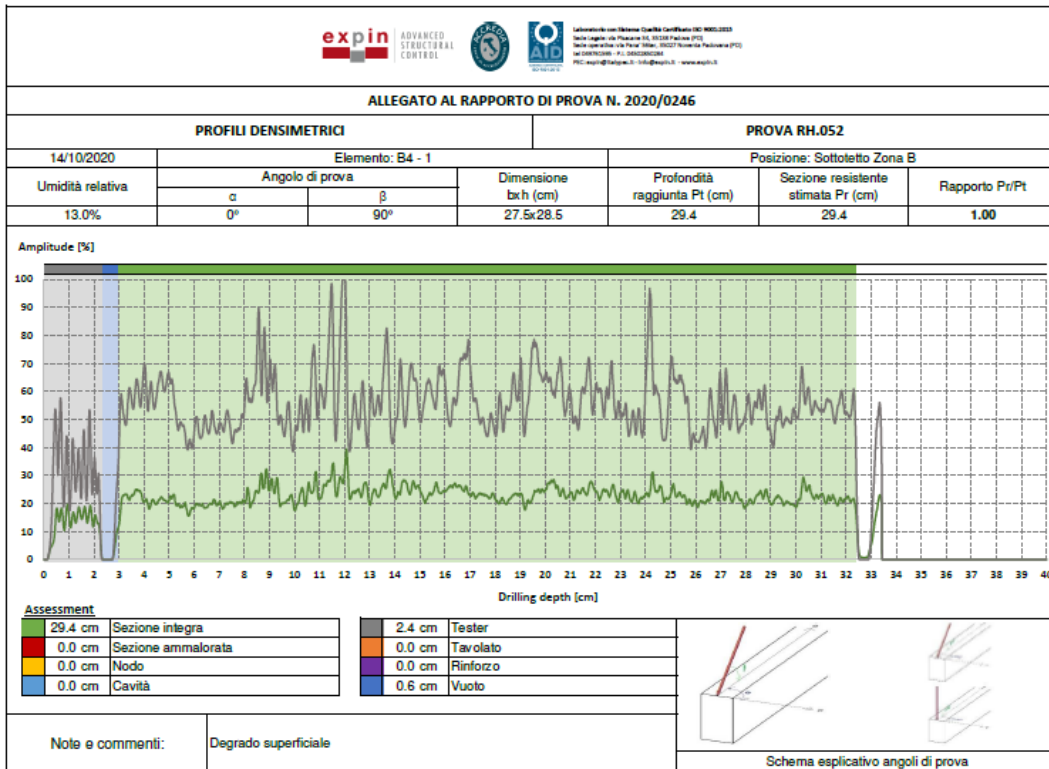
APPENDICE



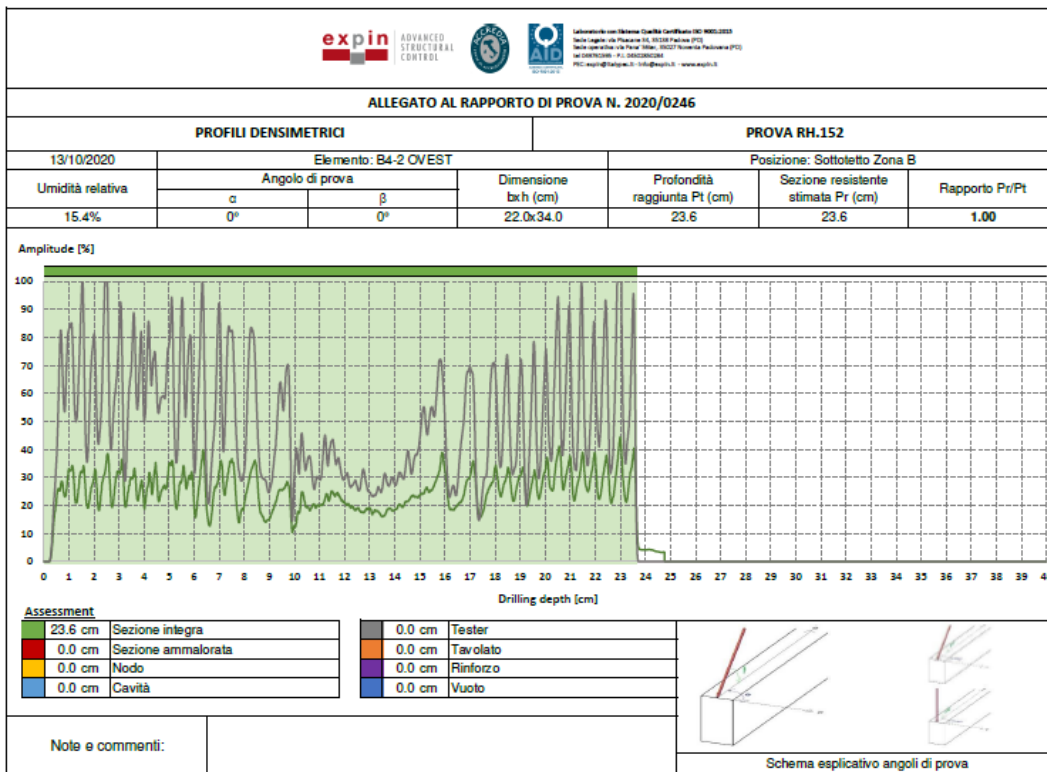
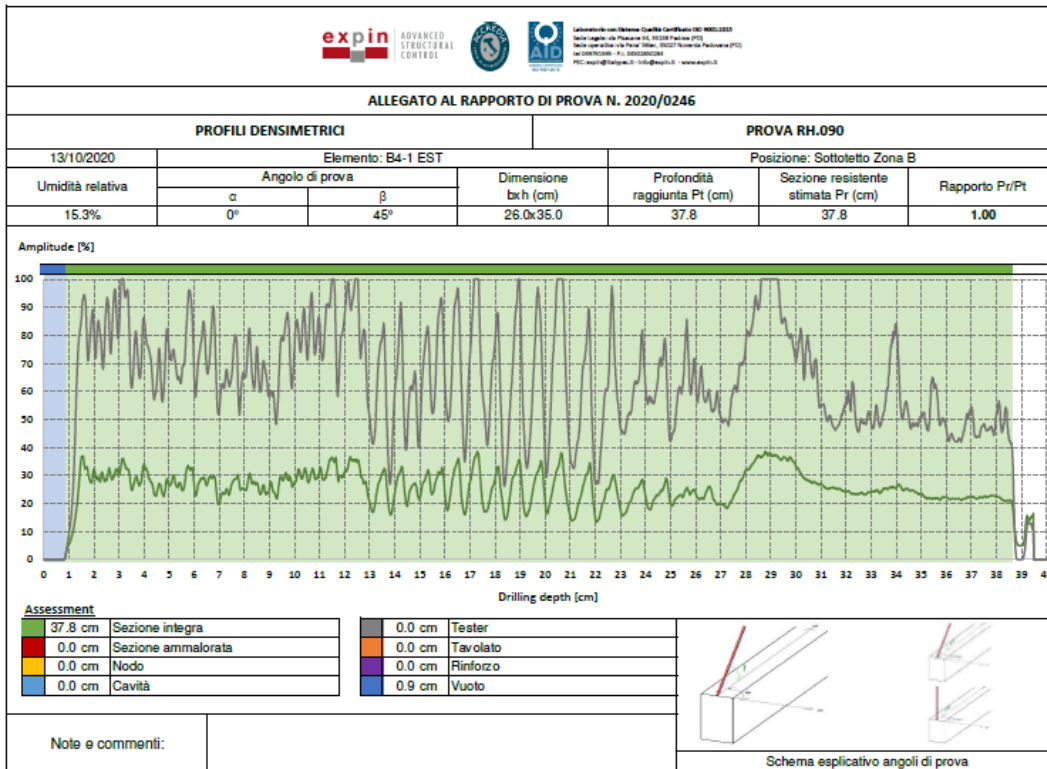
APPENDICE



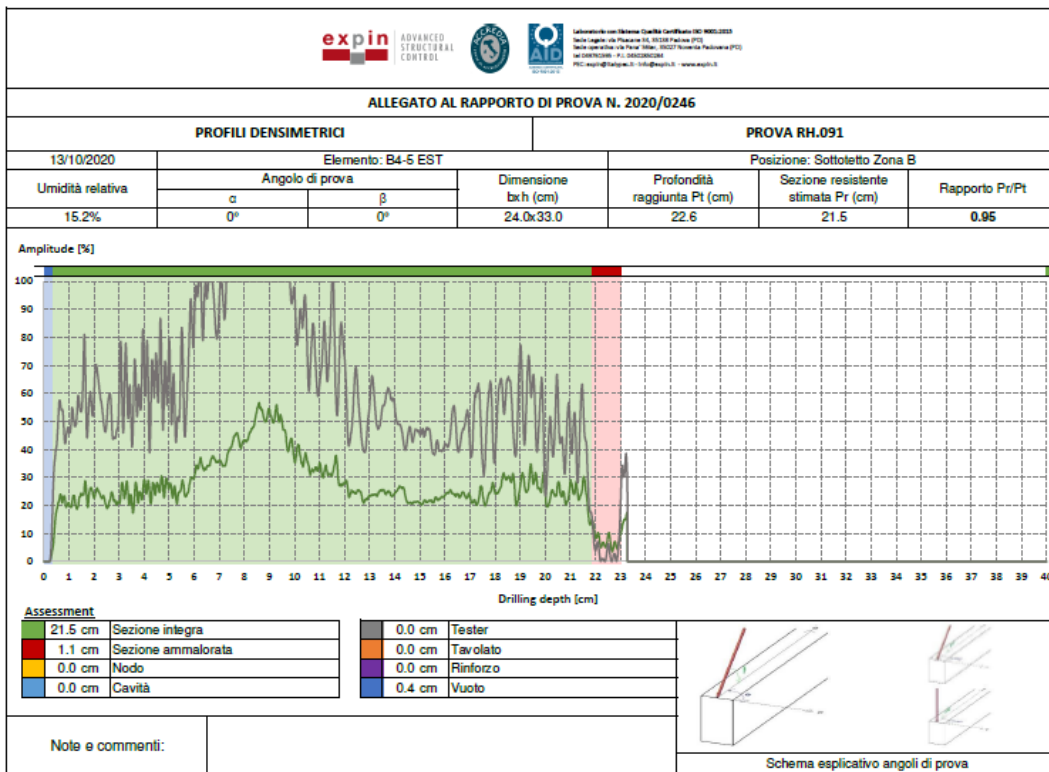
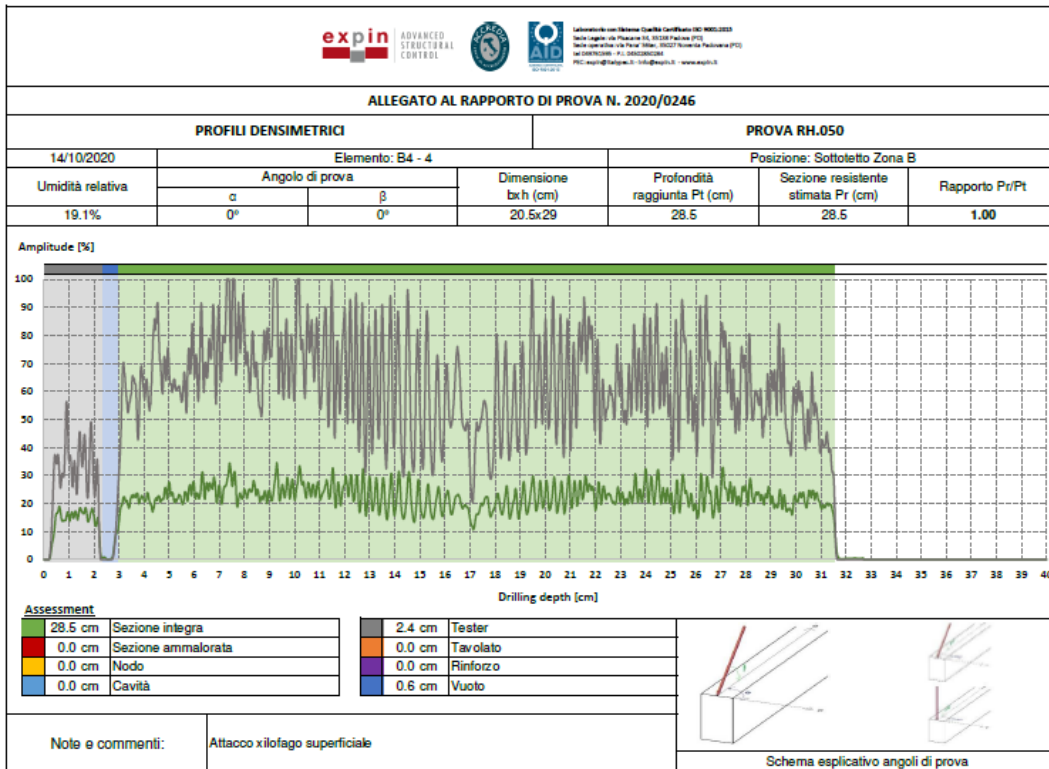
APPENDICE



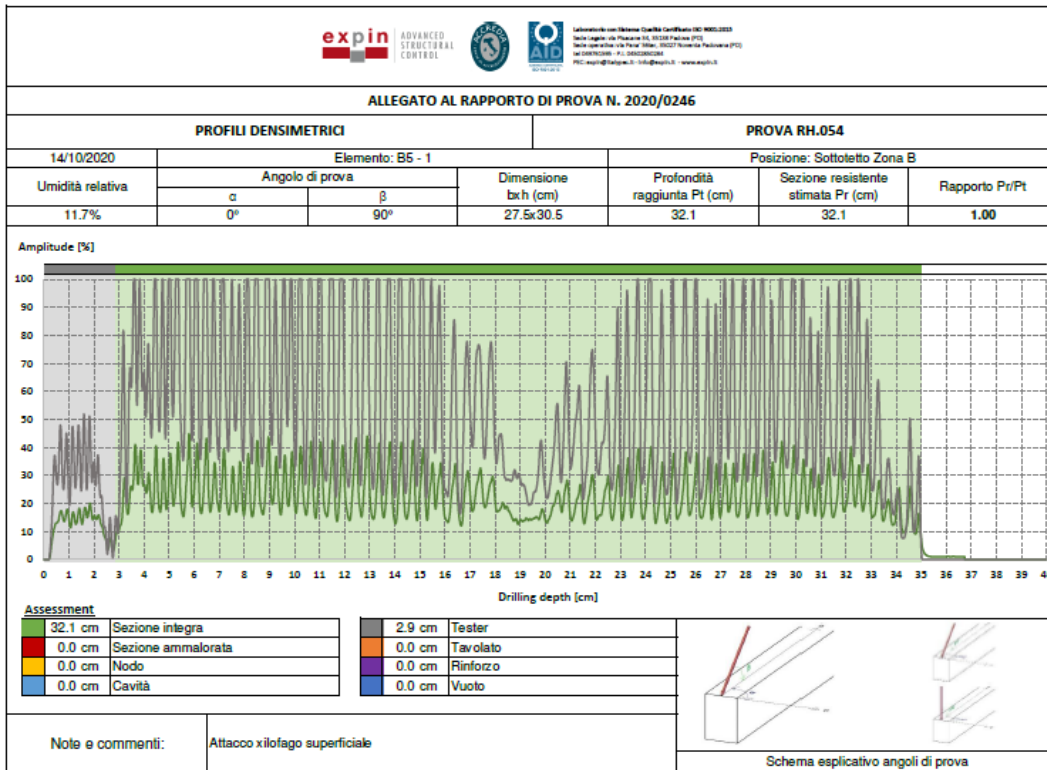
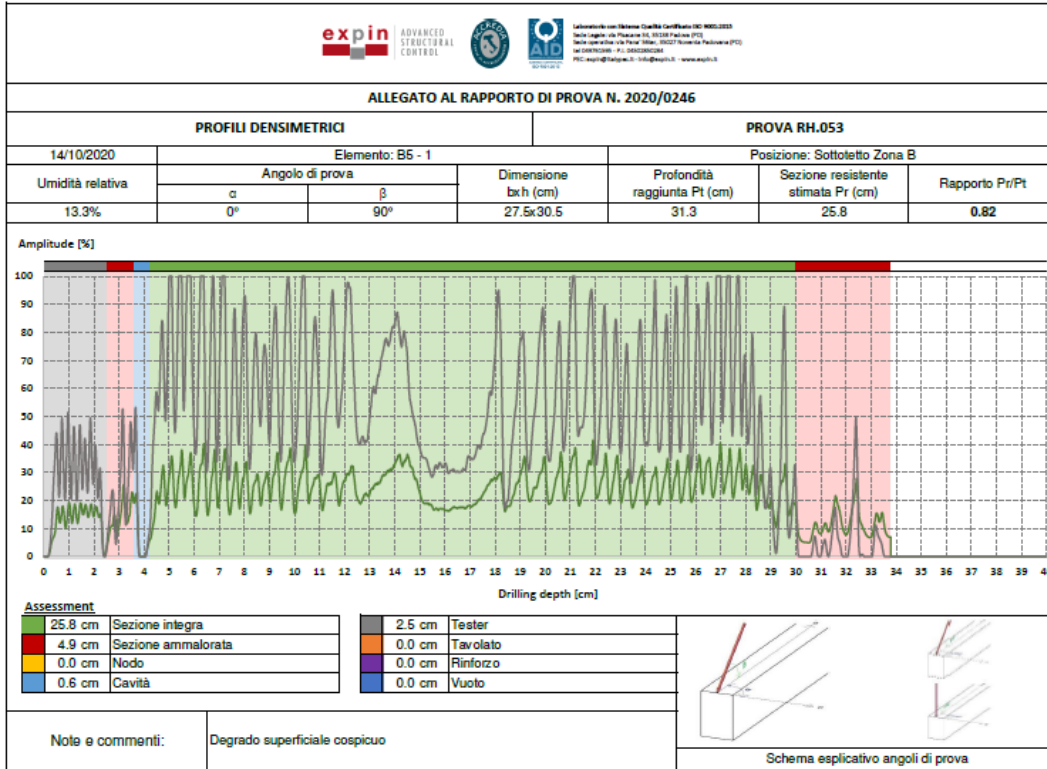
APPENDICE



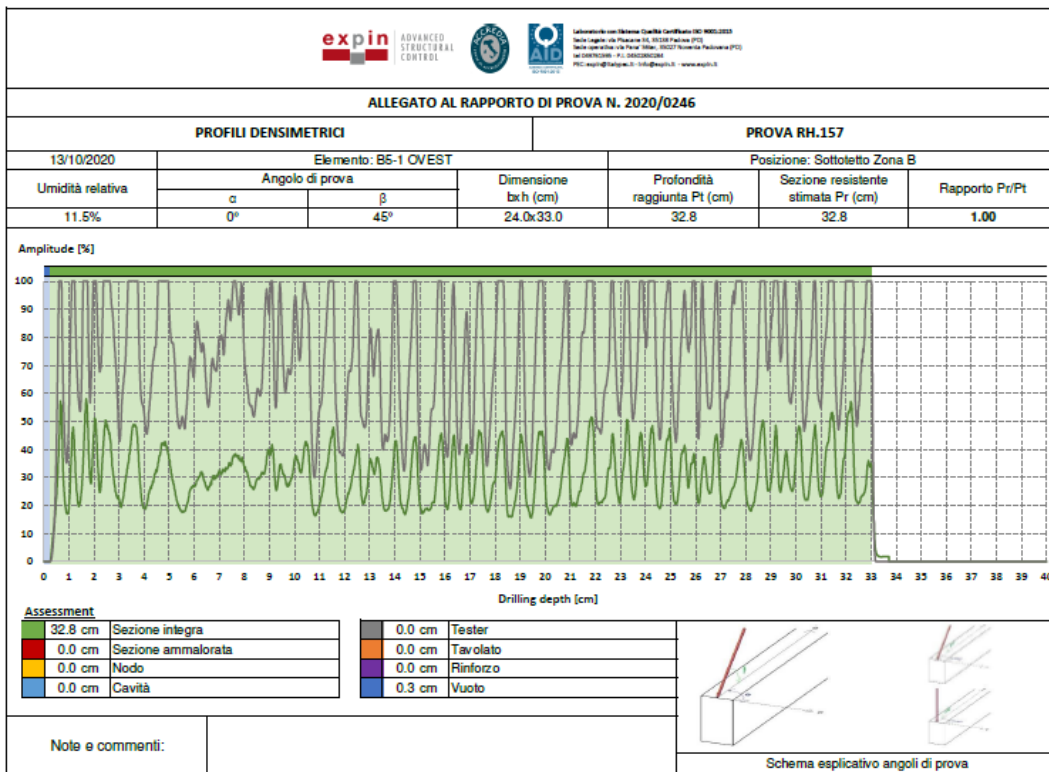
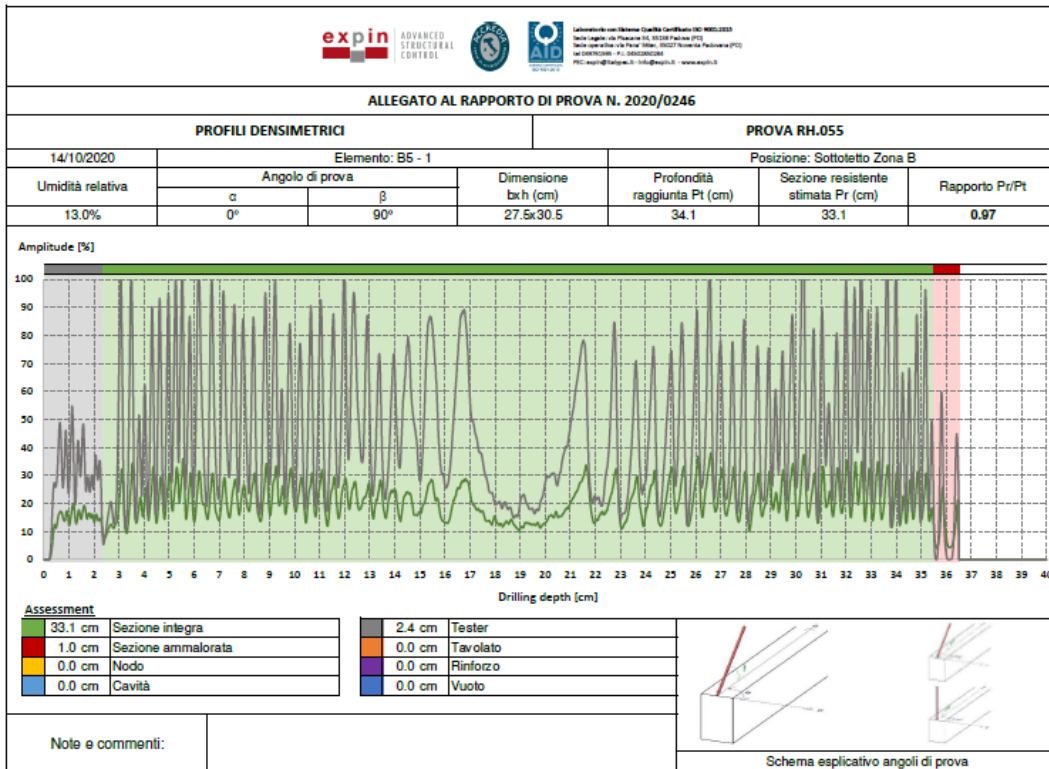
APPENDICE



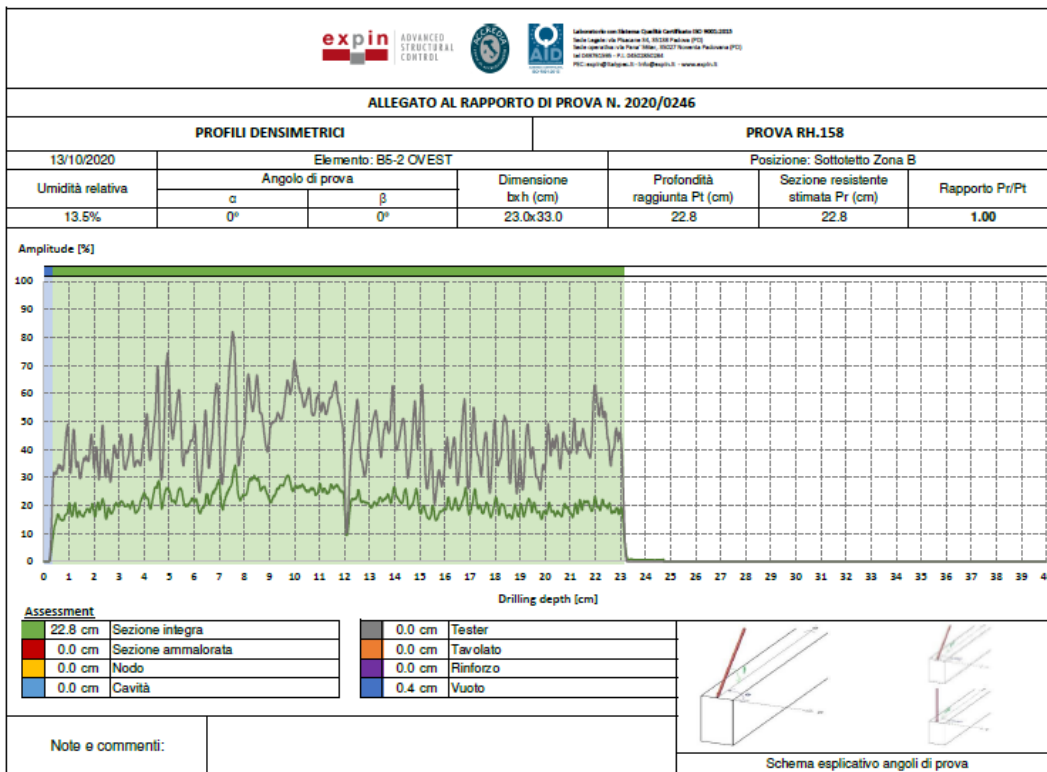
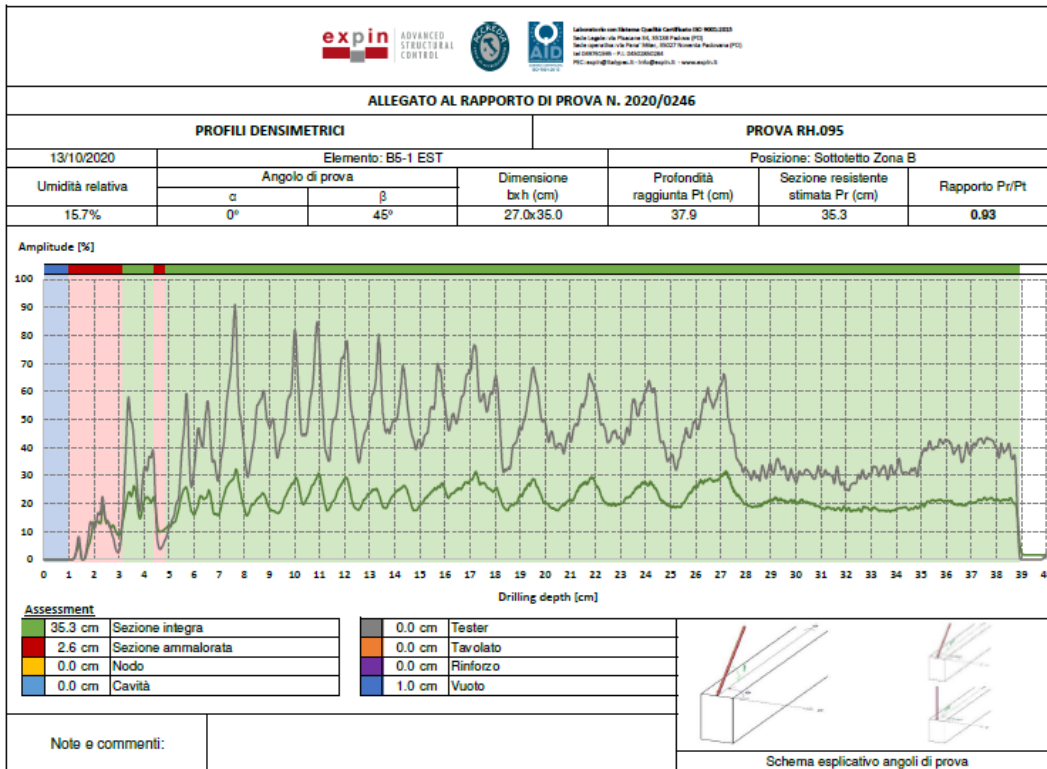
APPENDICE



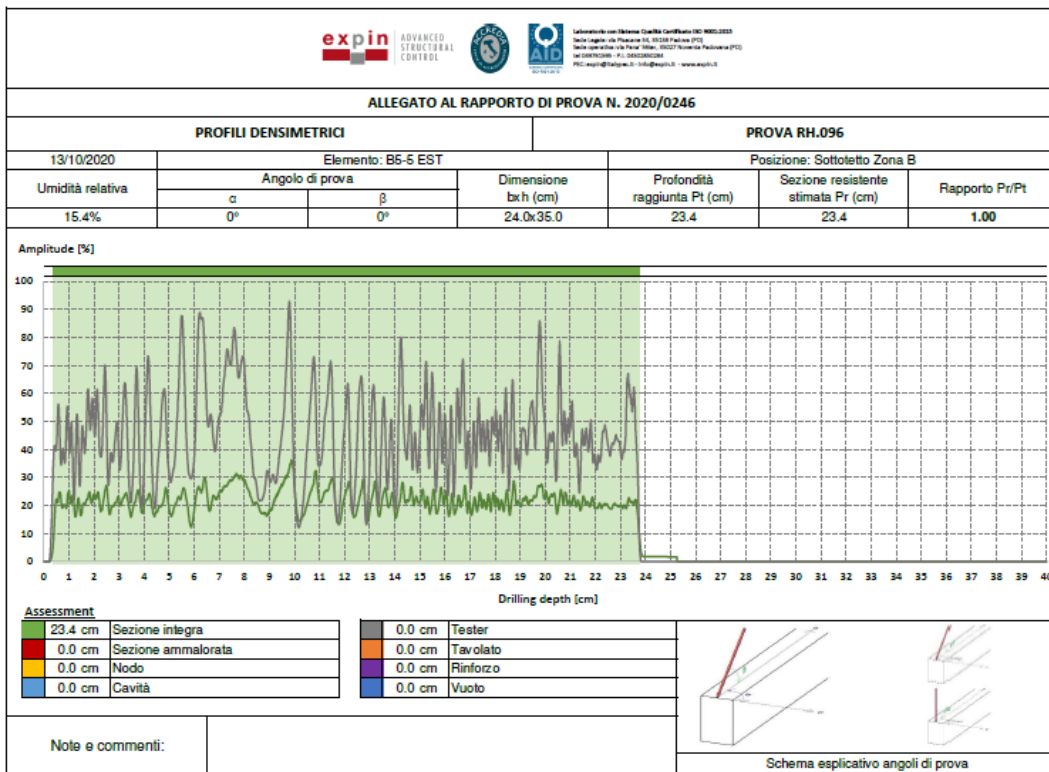
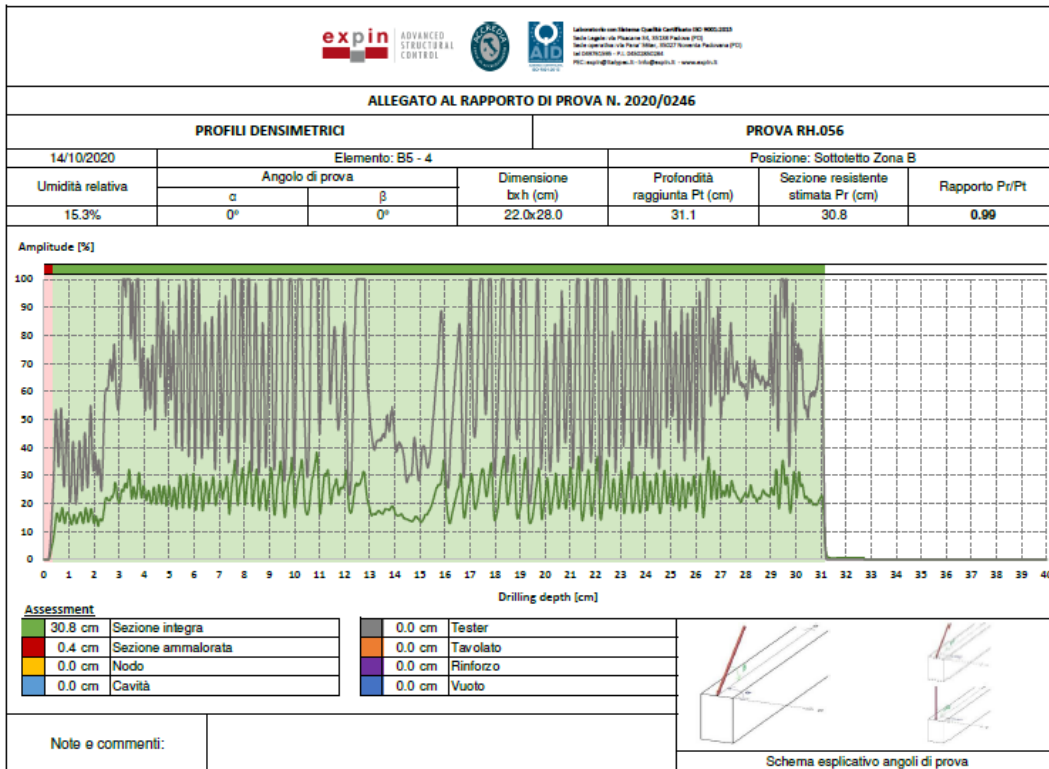
APPENDICE



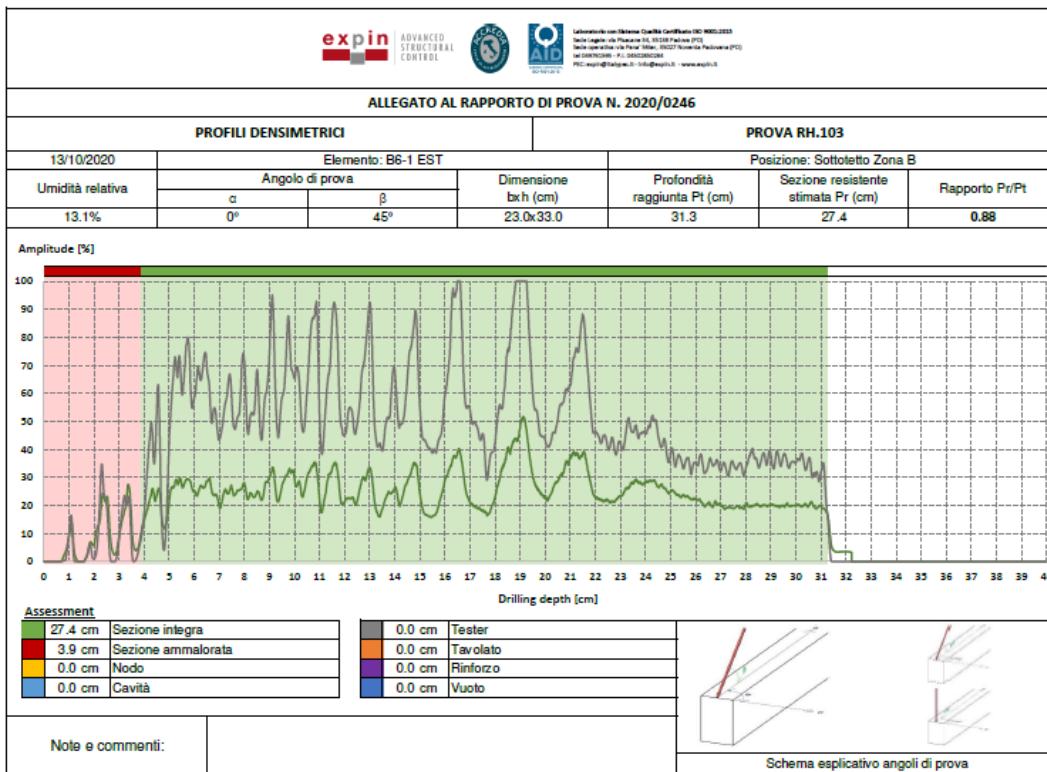
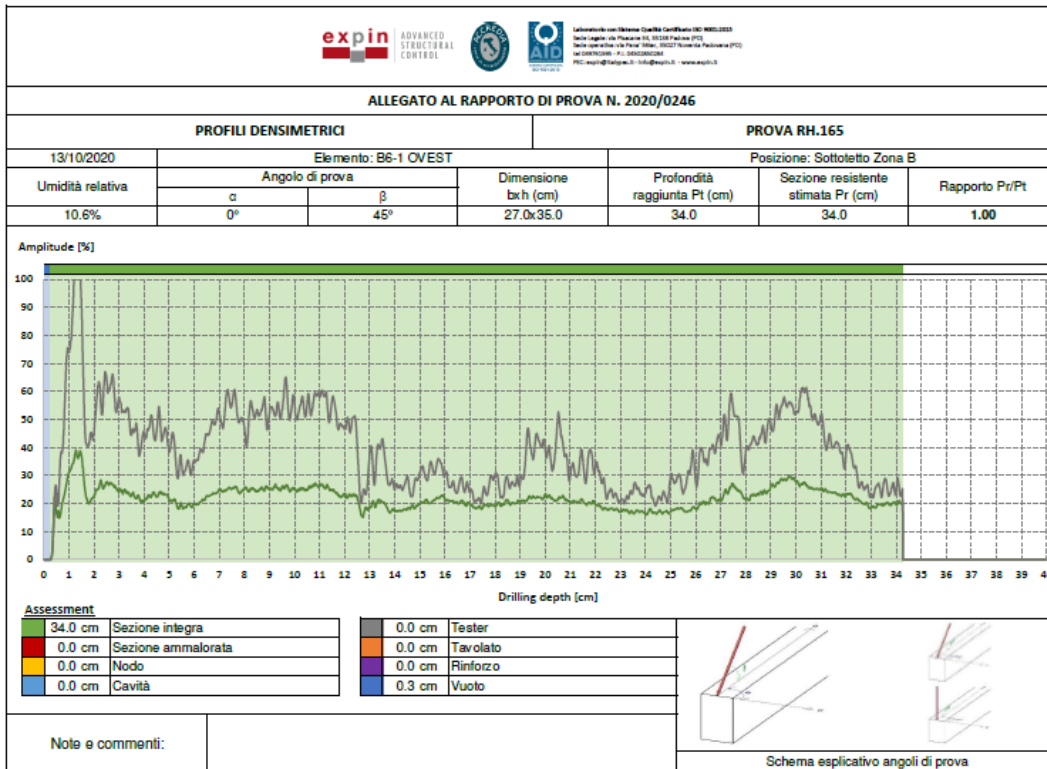
APPENDICE



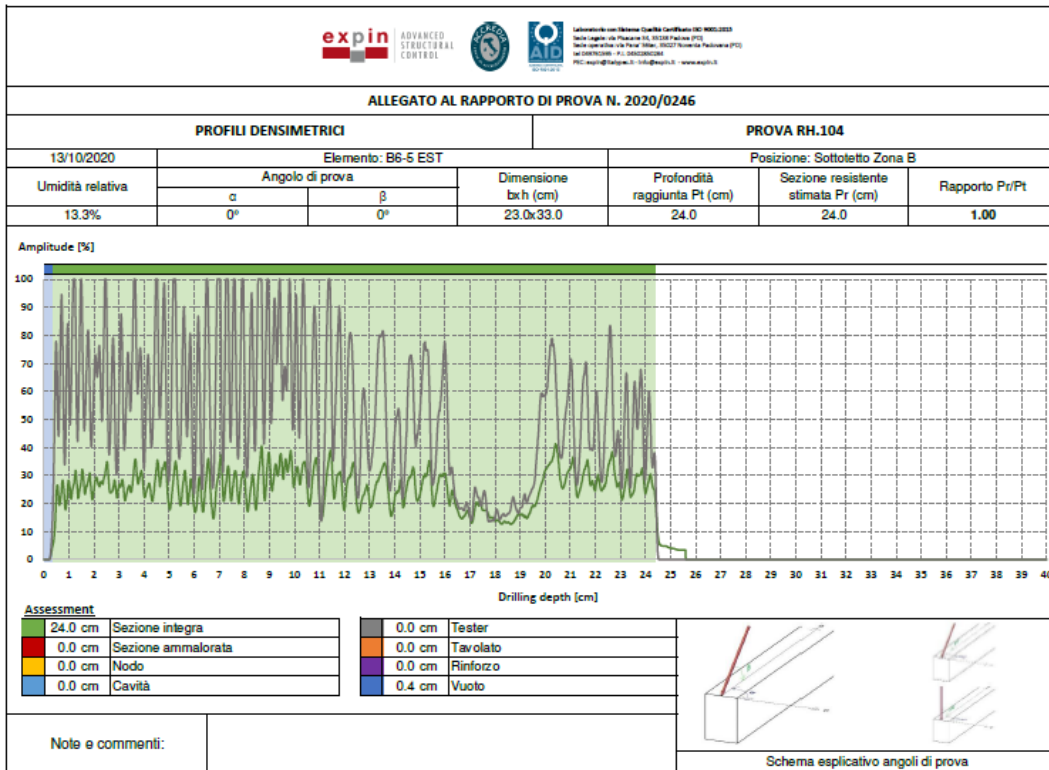
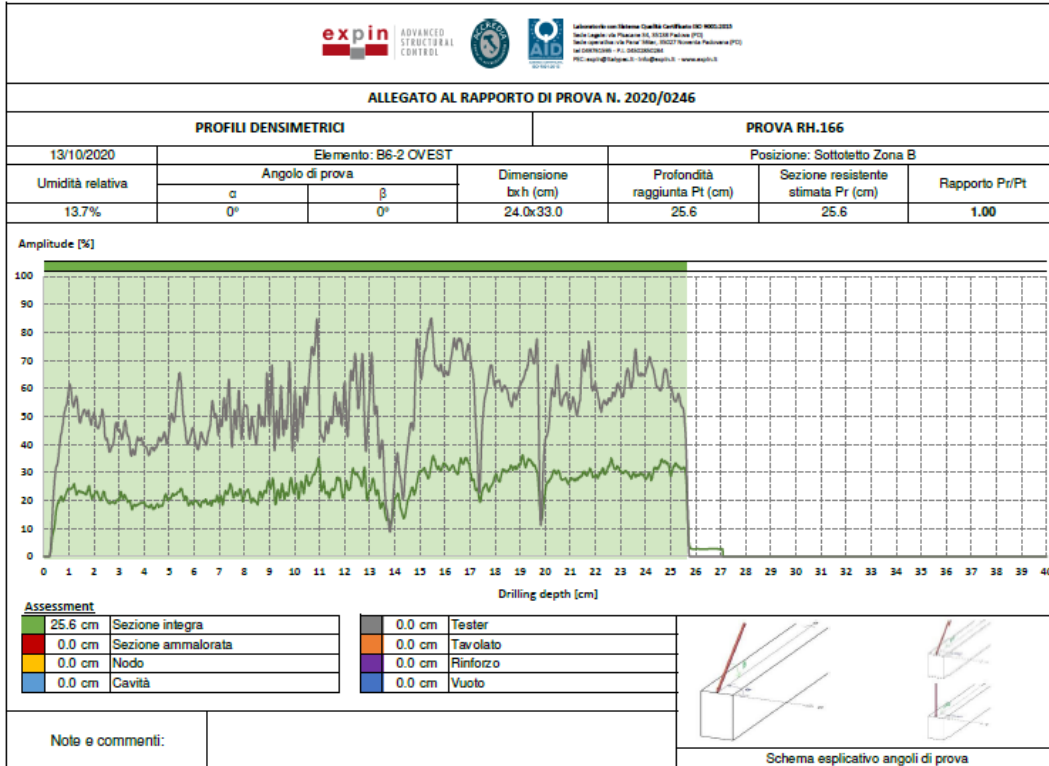
APPENDICE



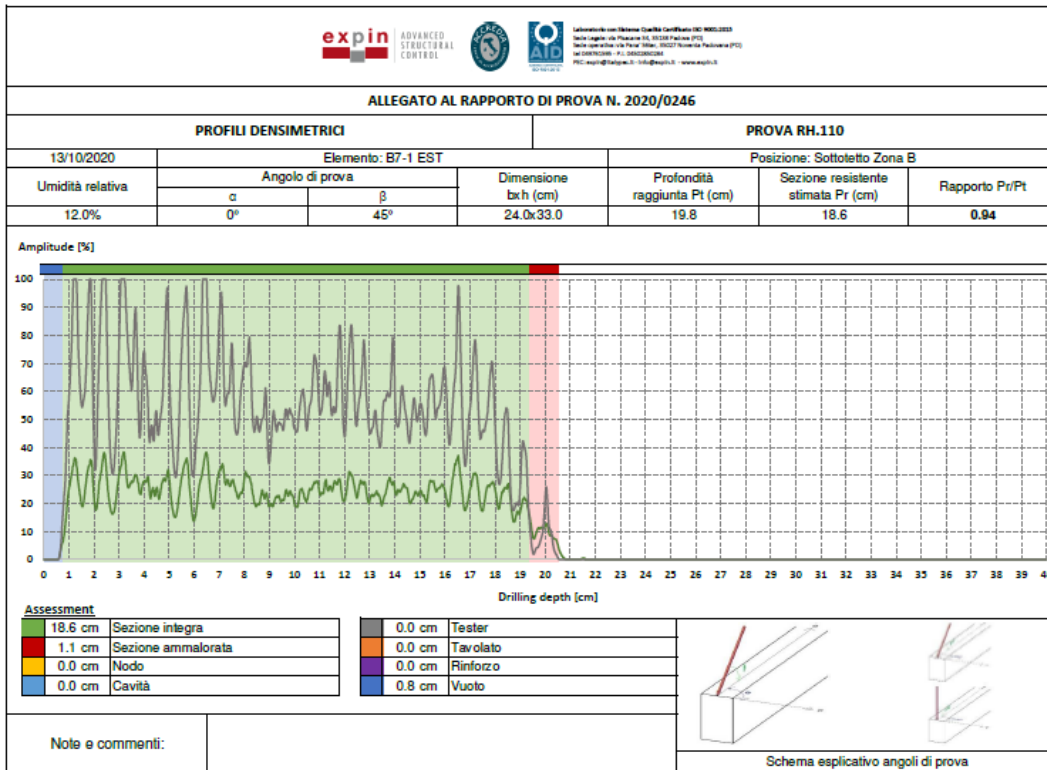
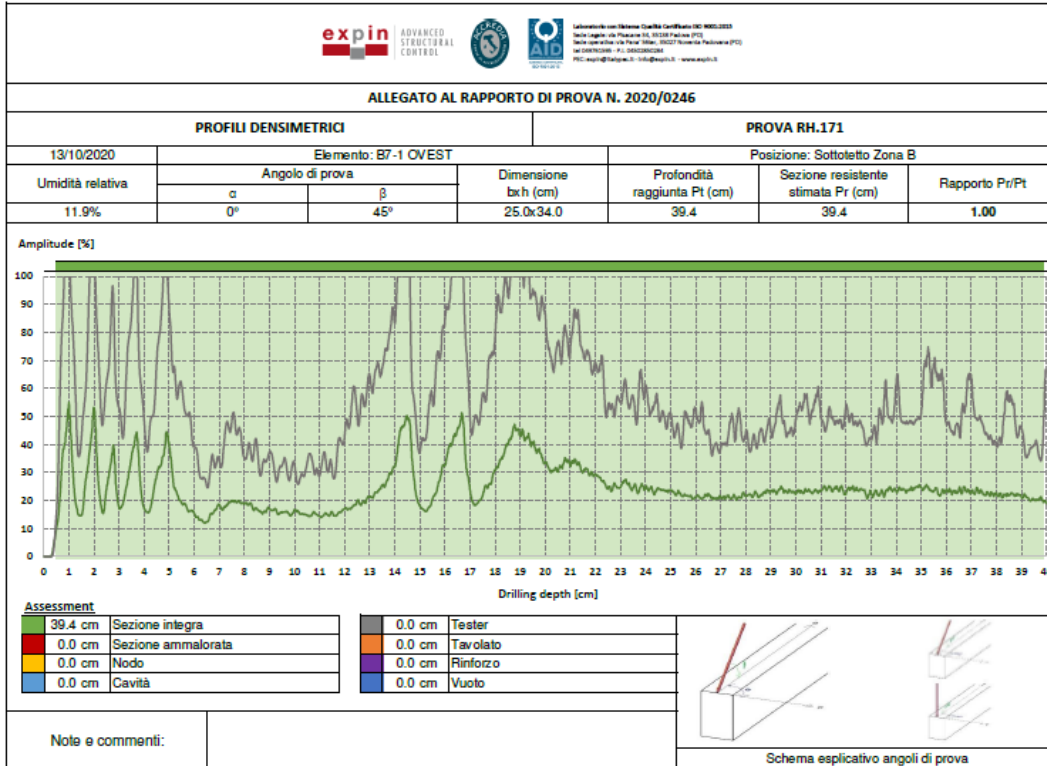
APPENDICE



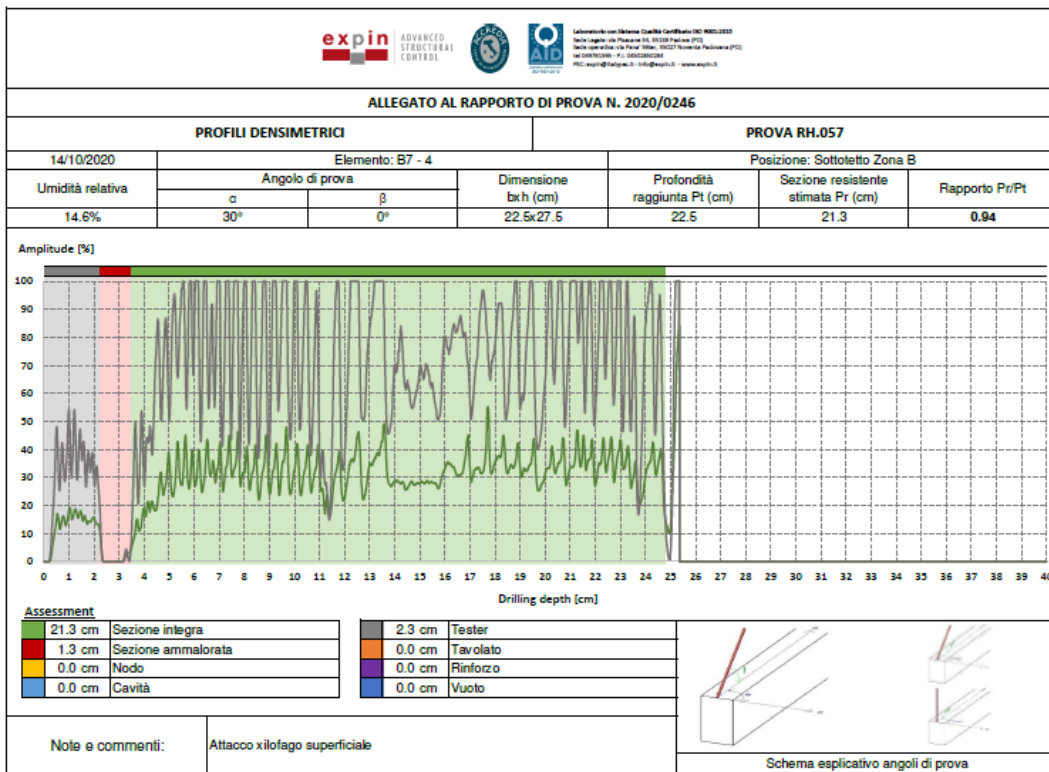
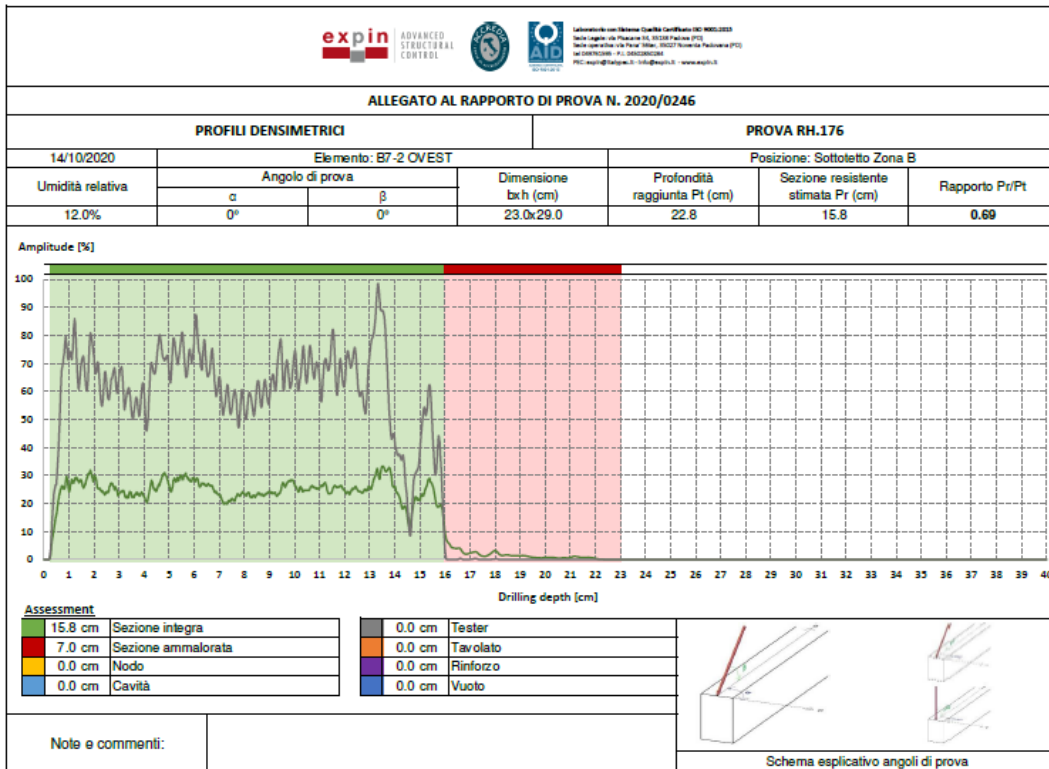
APPENDICE



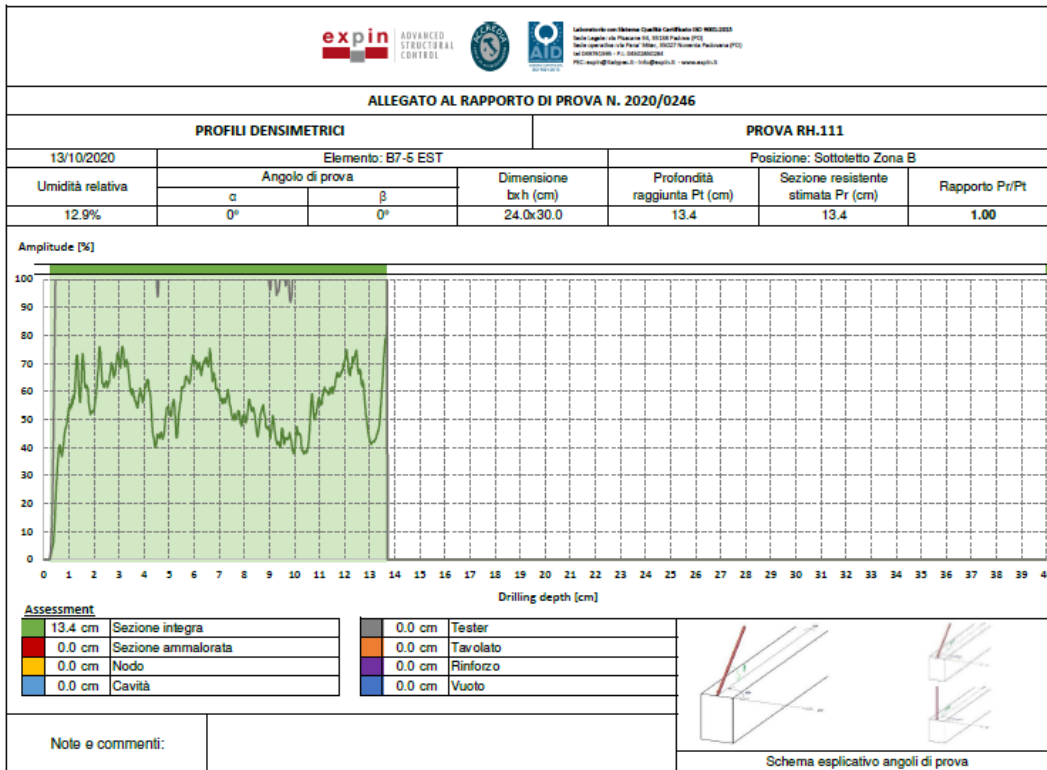
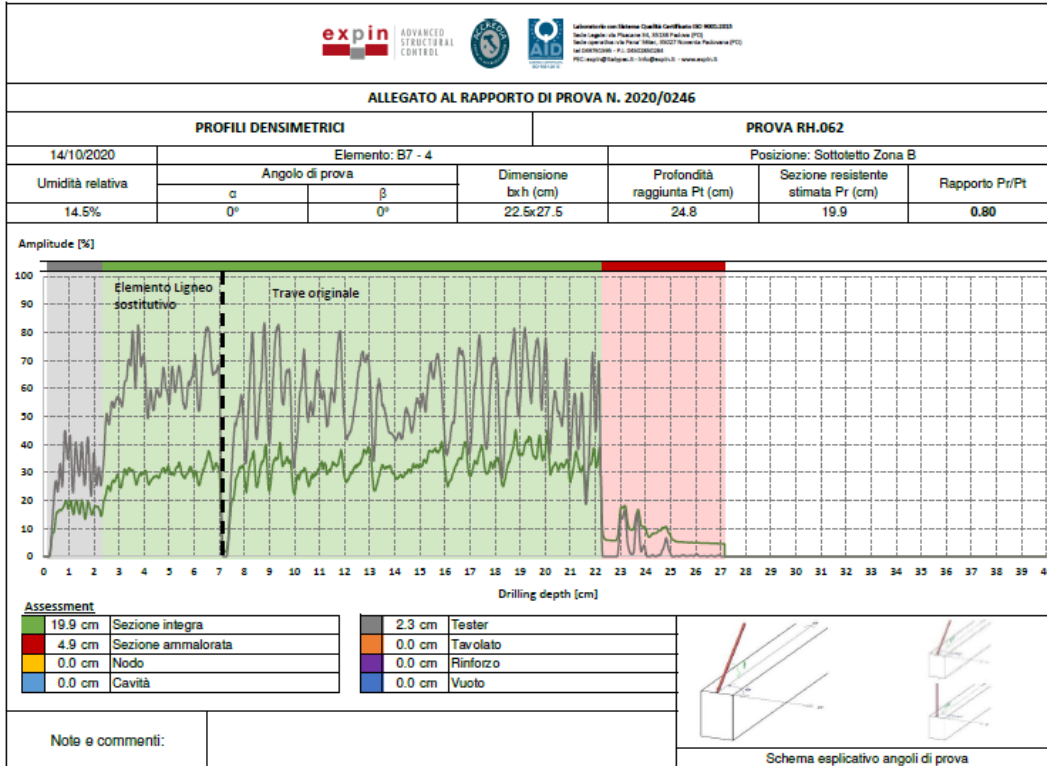
APPENDICE



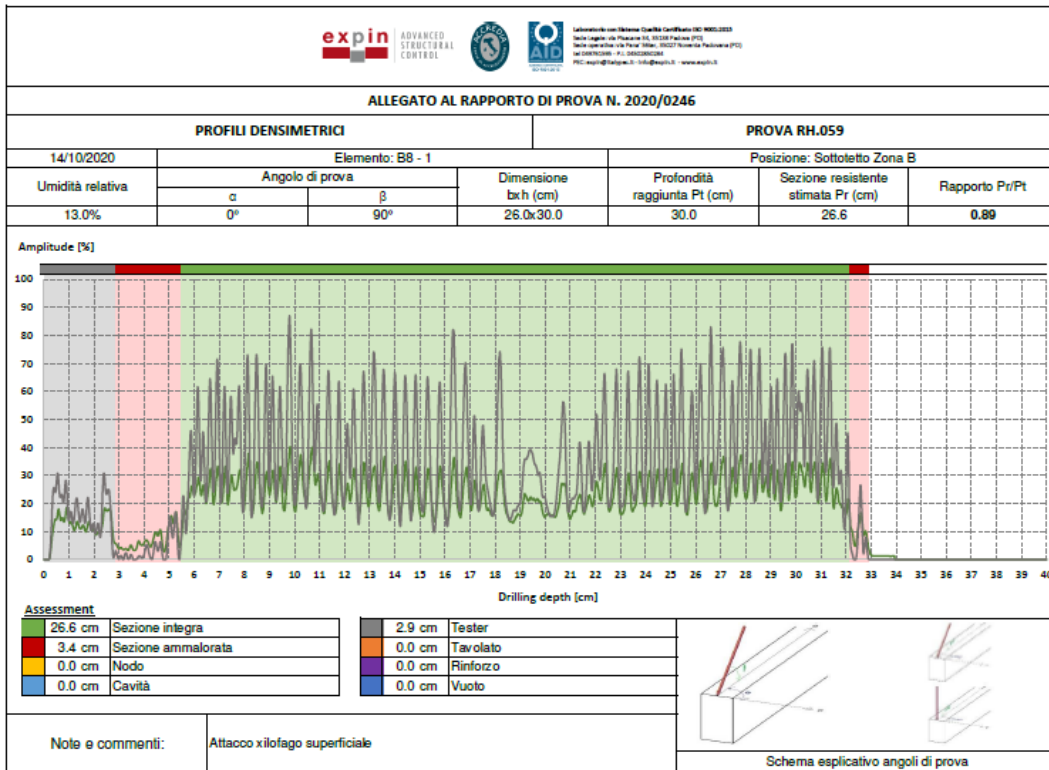
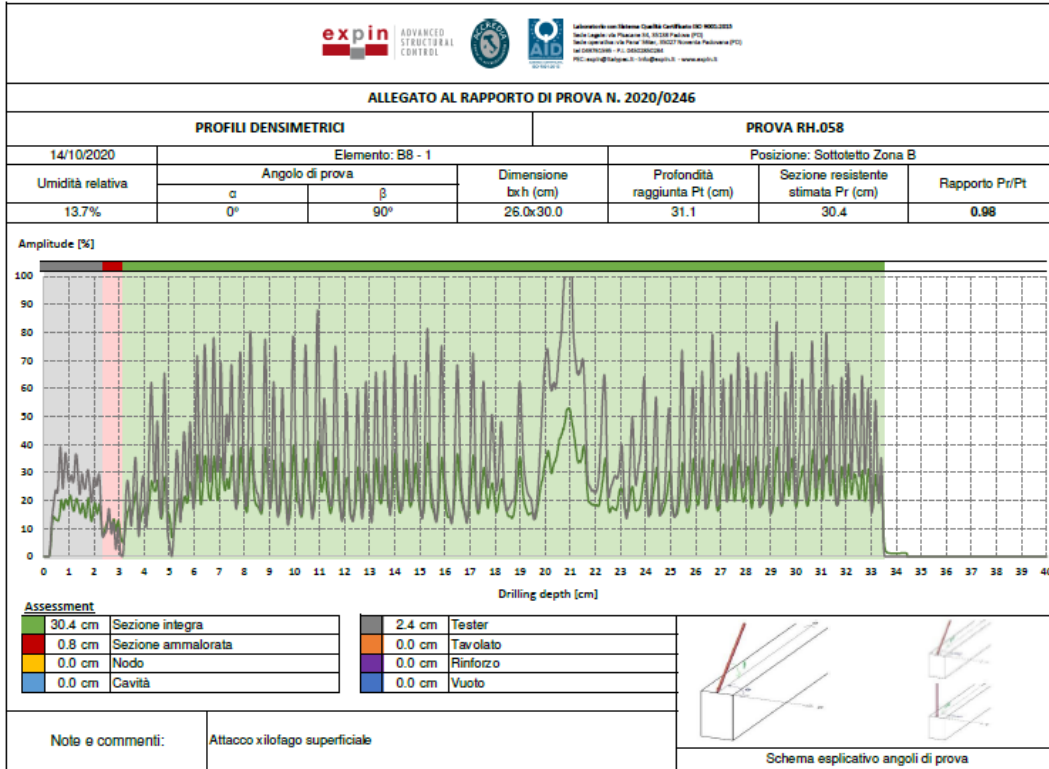
APPENDICE



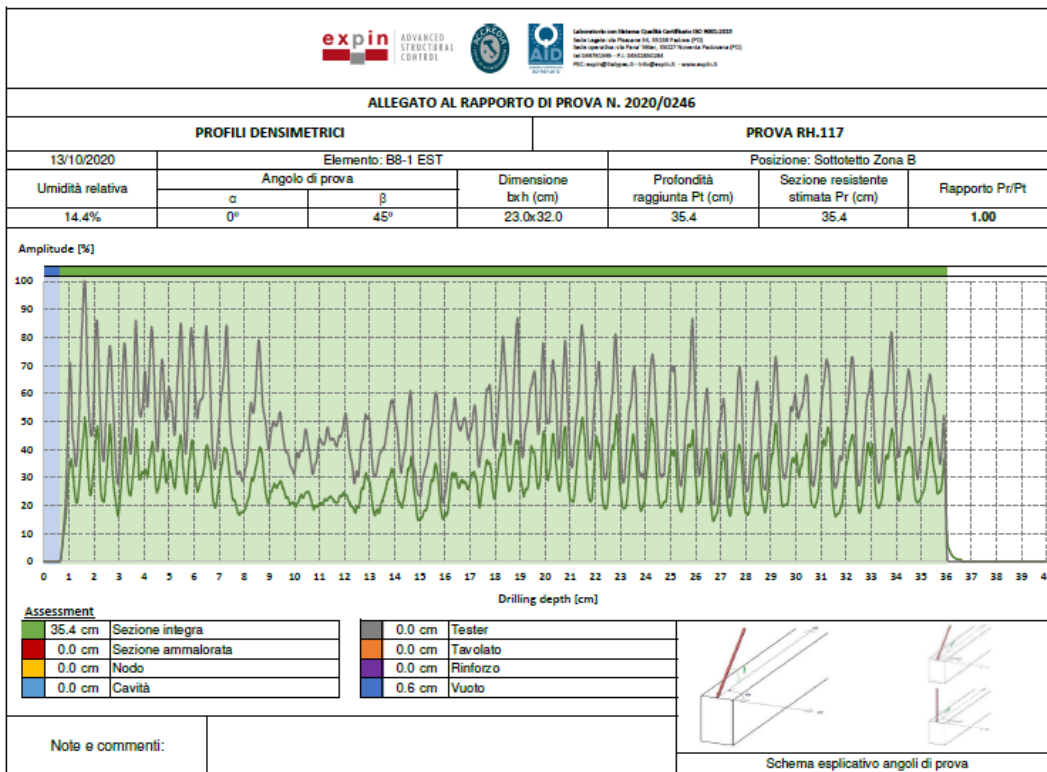
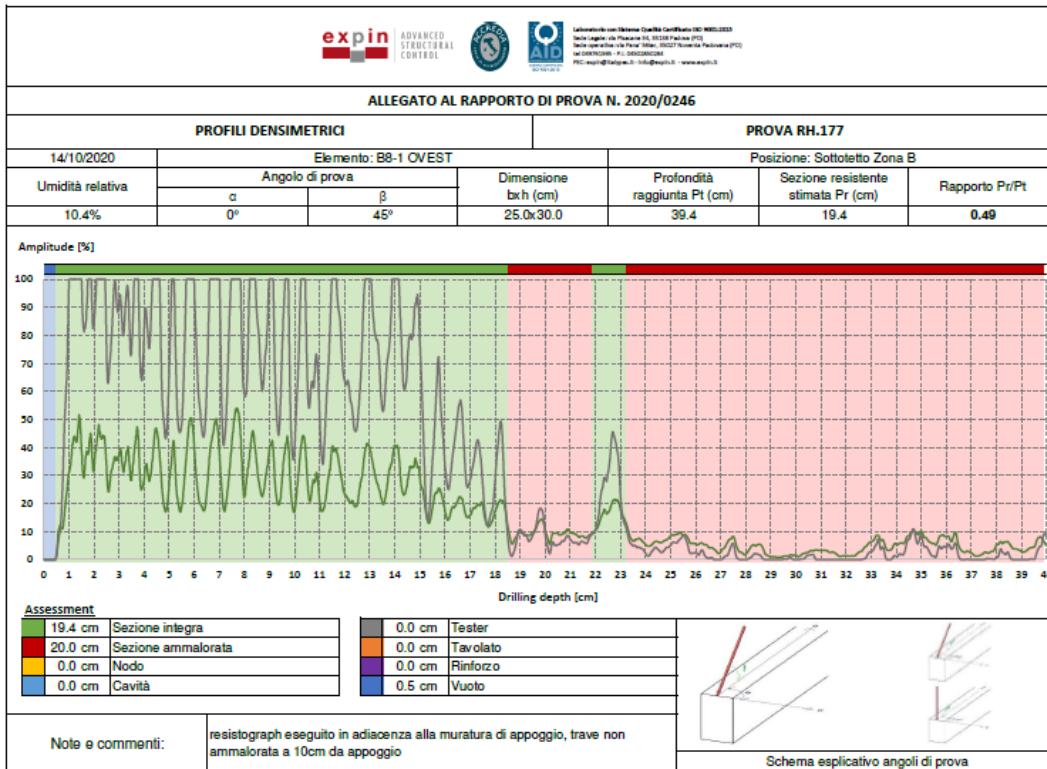
APPENDICE



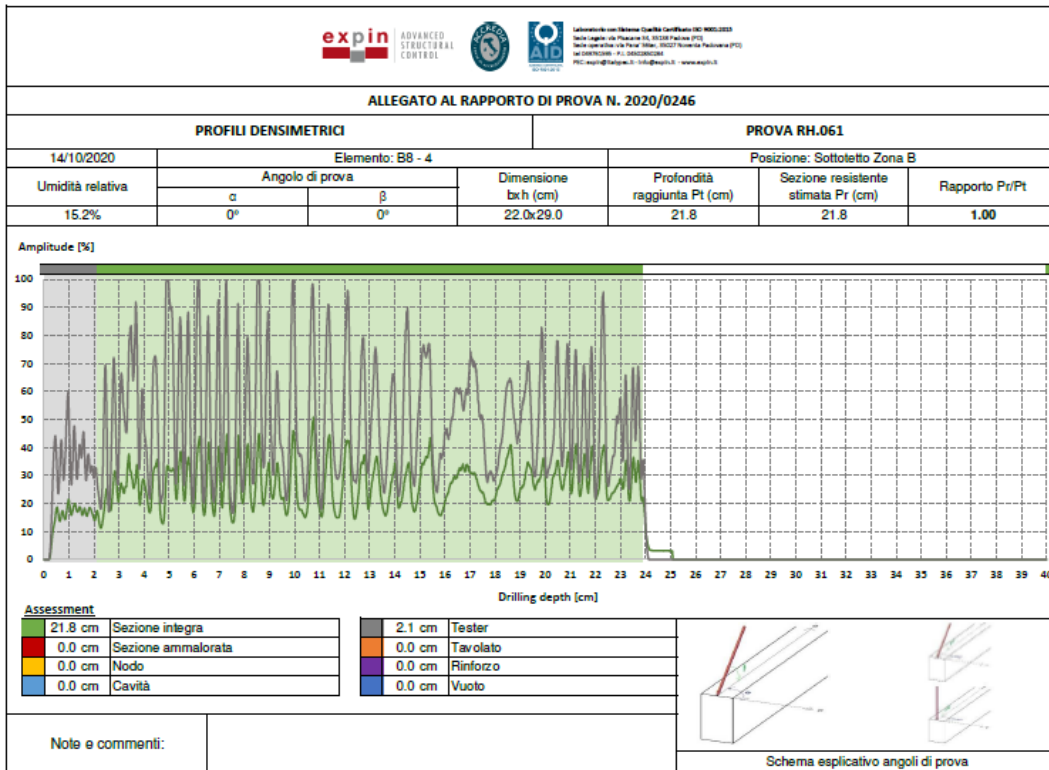
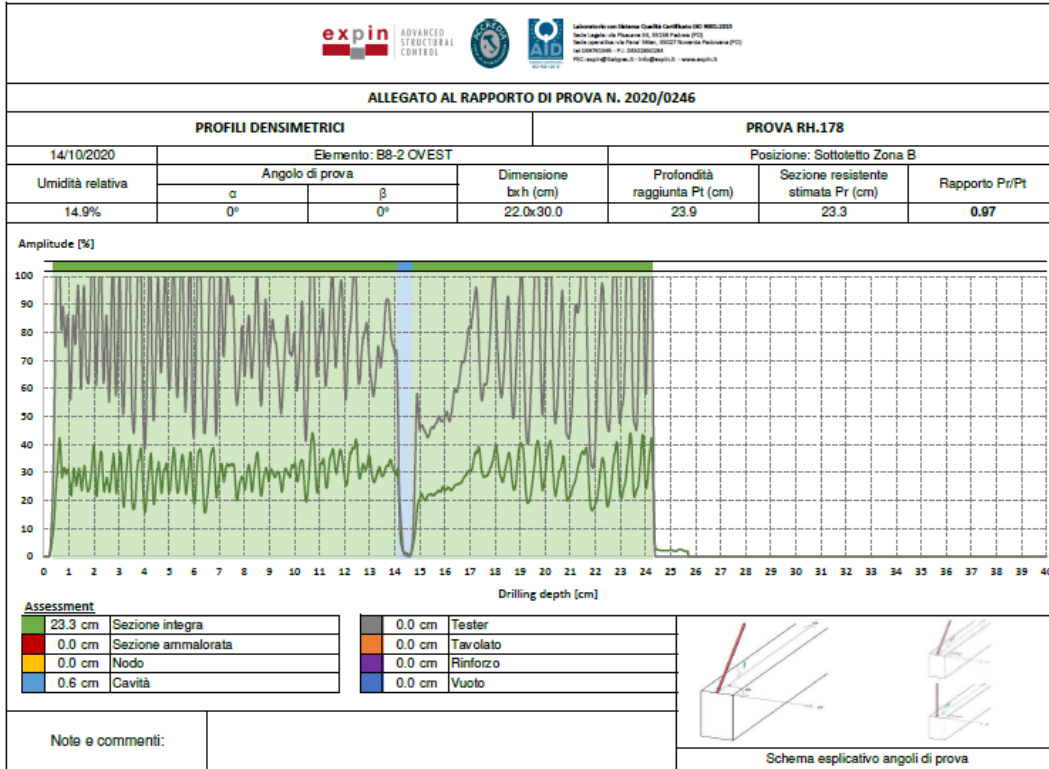
APPENDICE



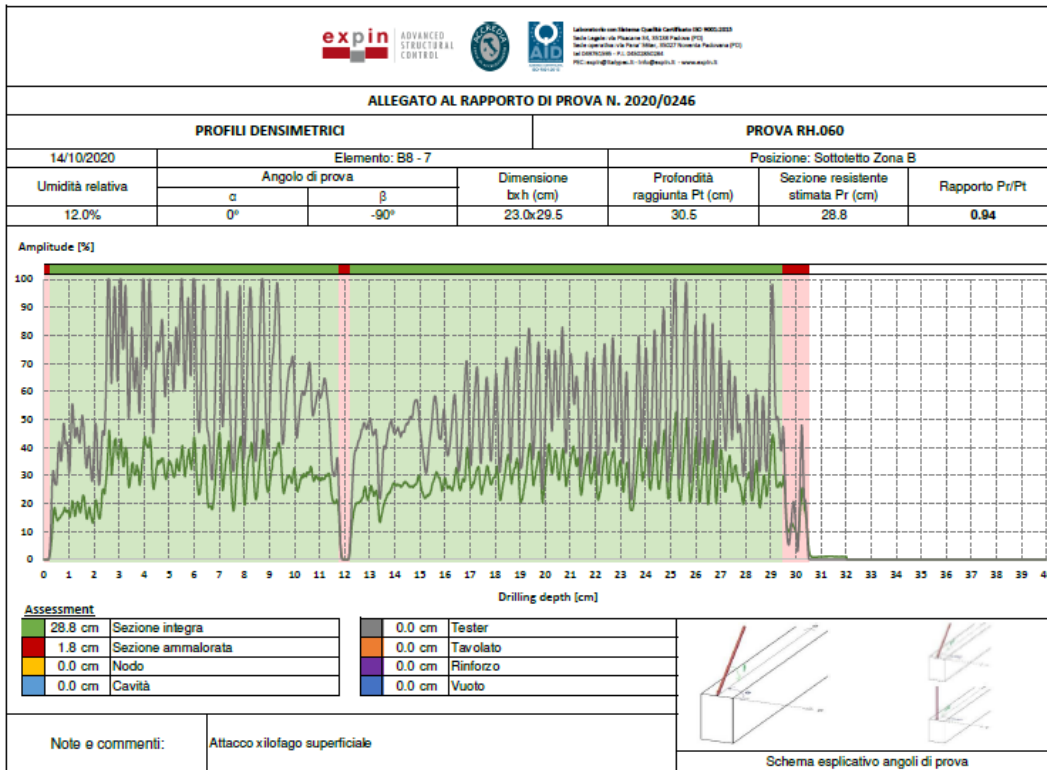
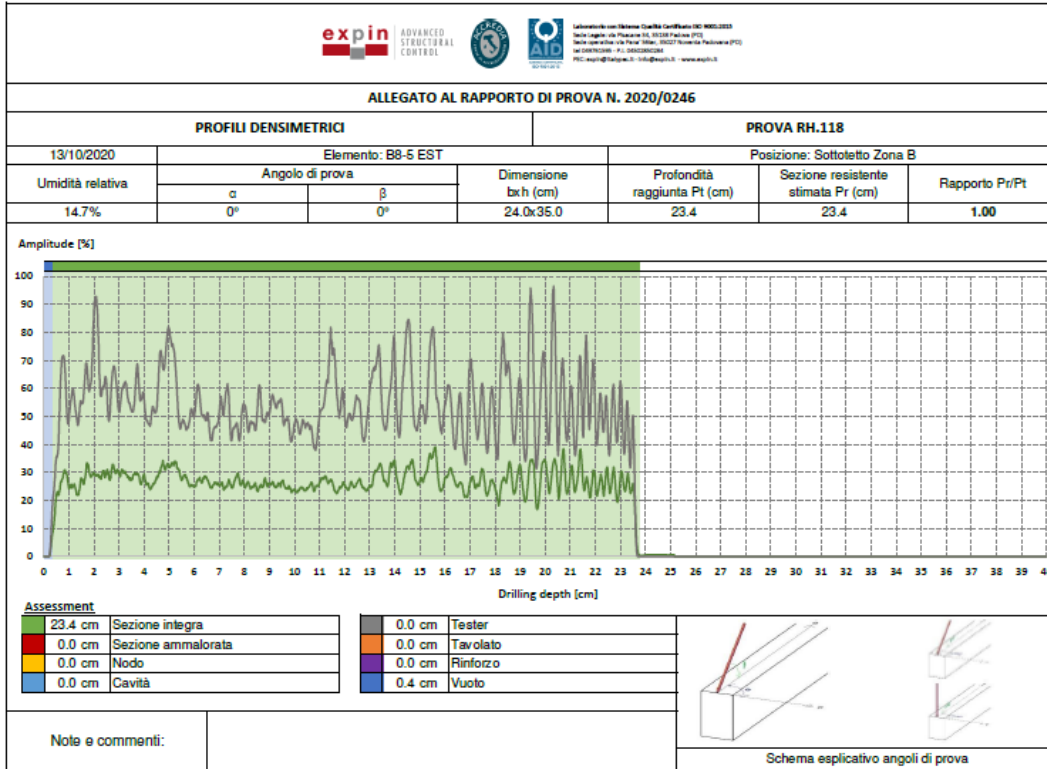
APPENDICE



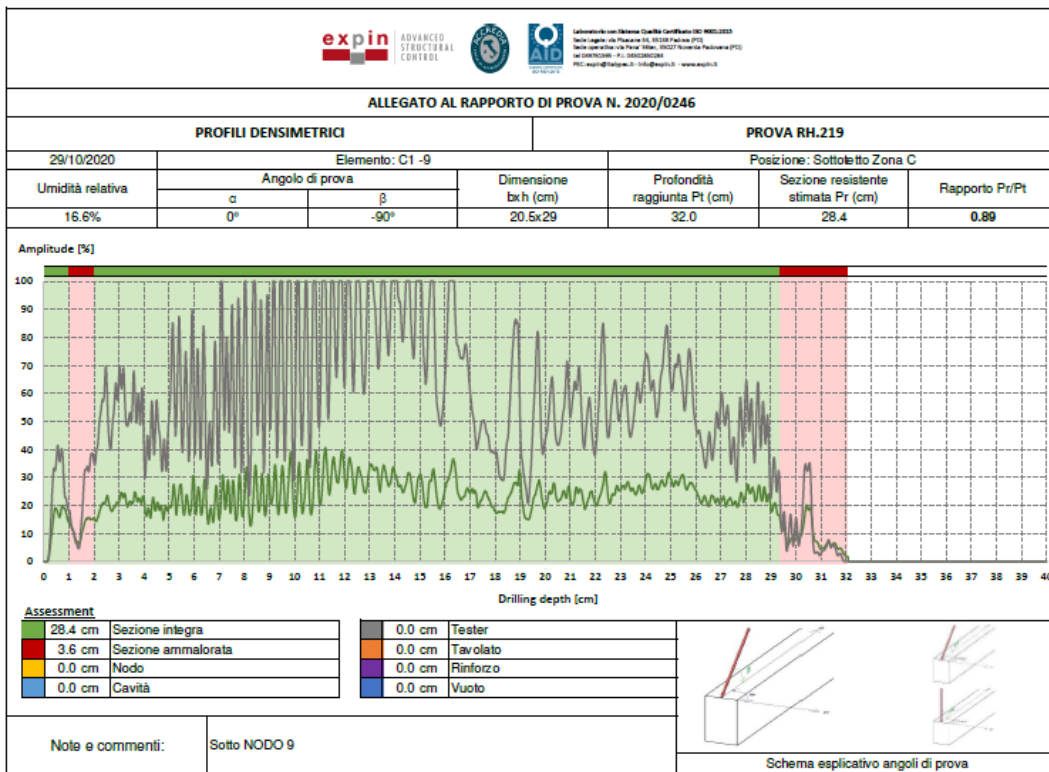
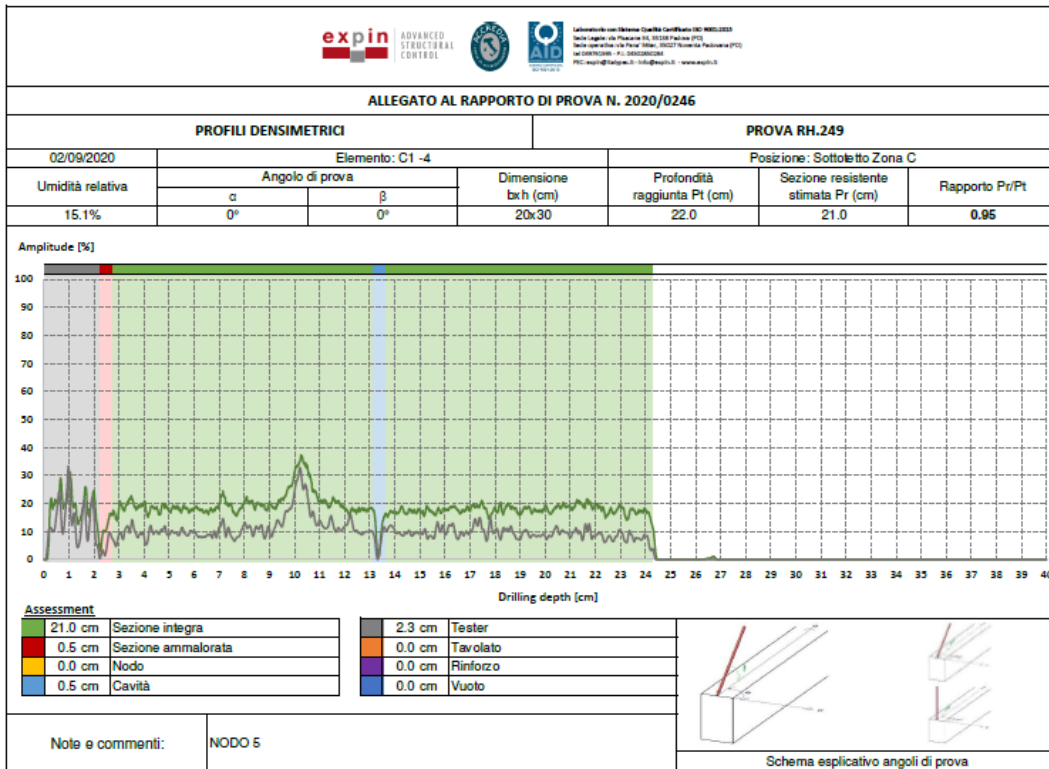
APPENDICE



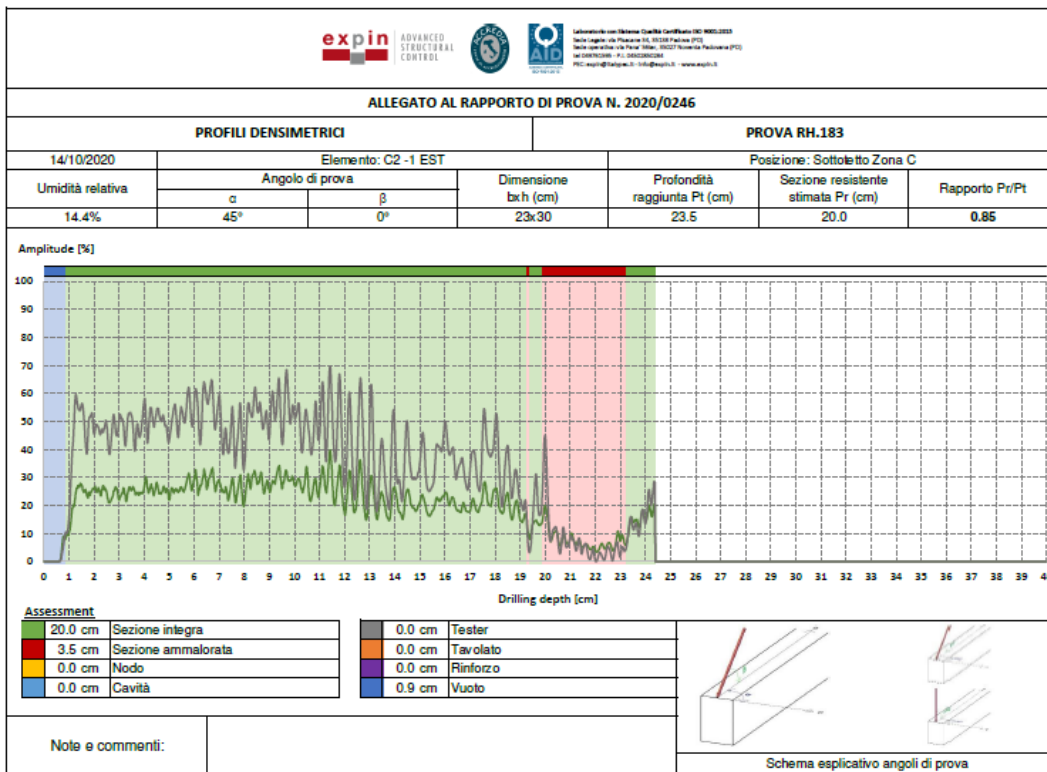
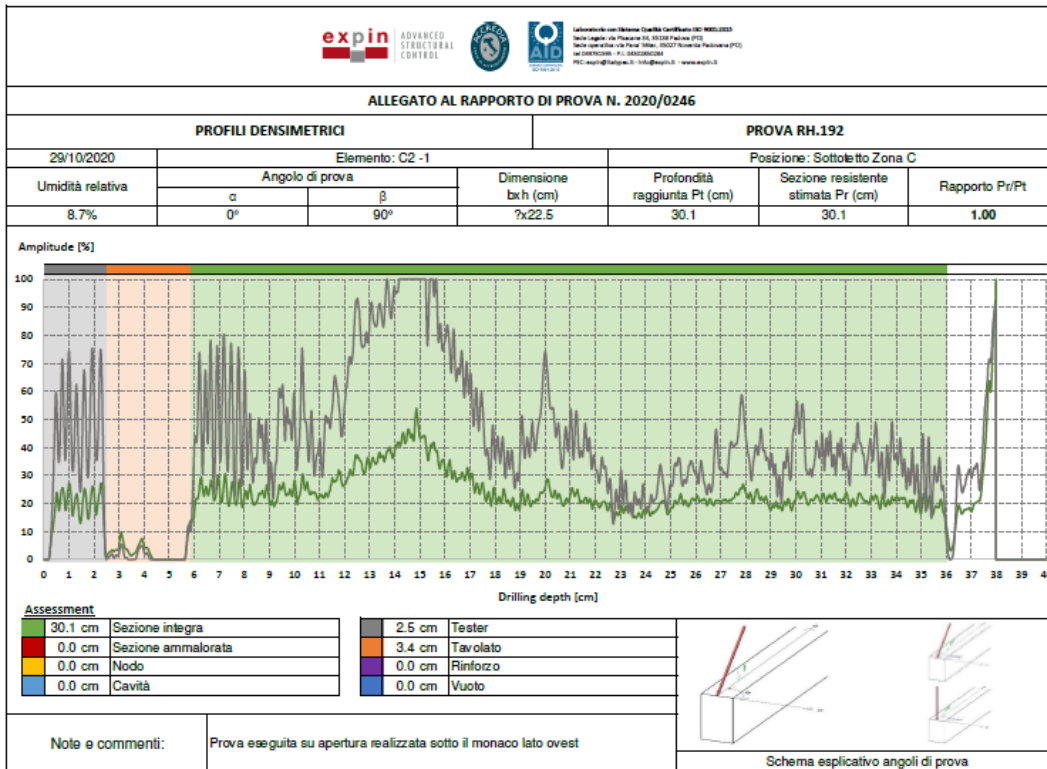
APPENDICE



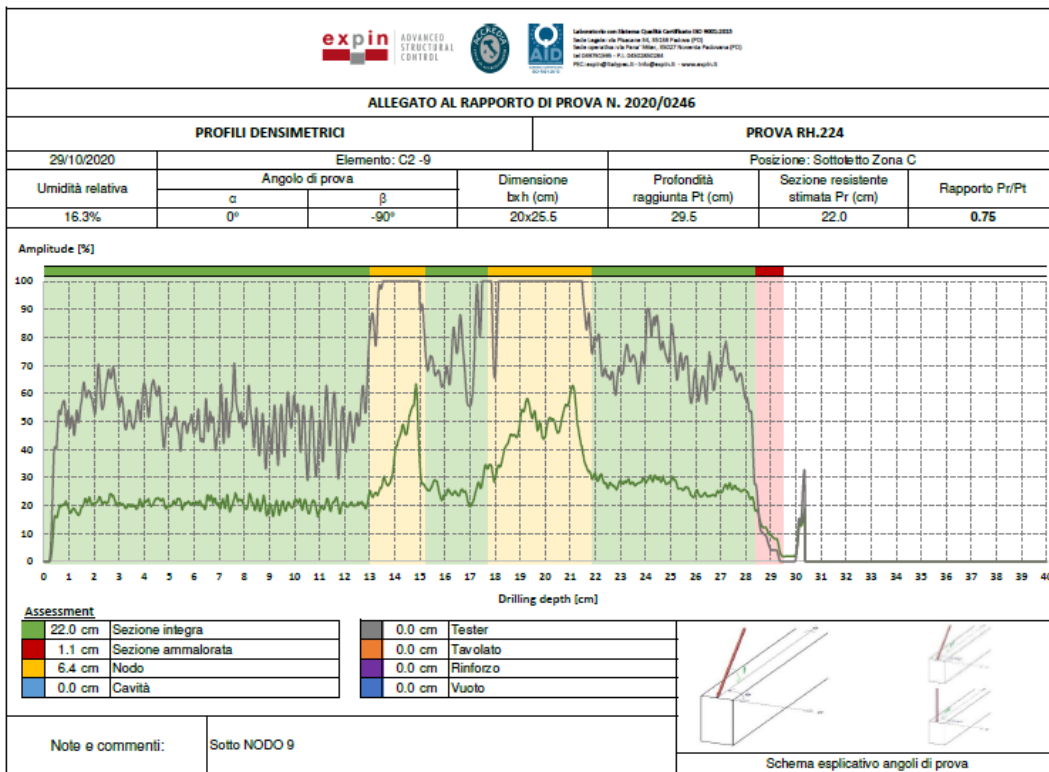
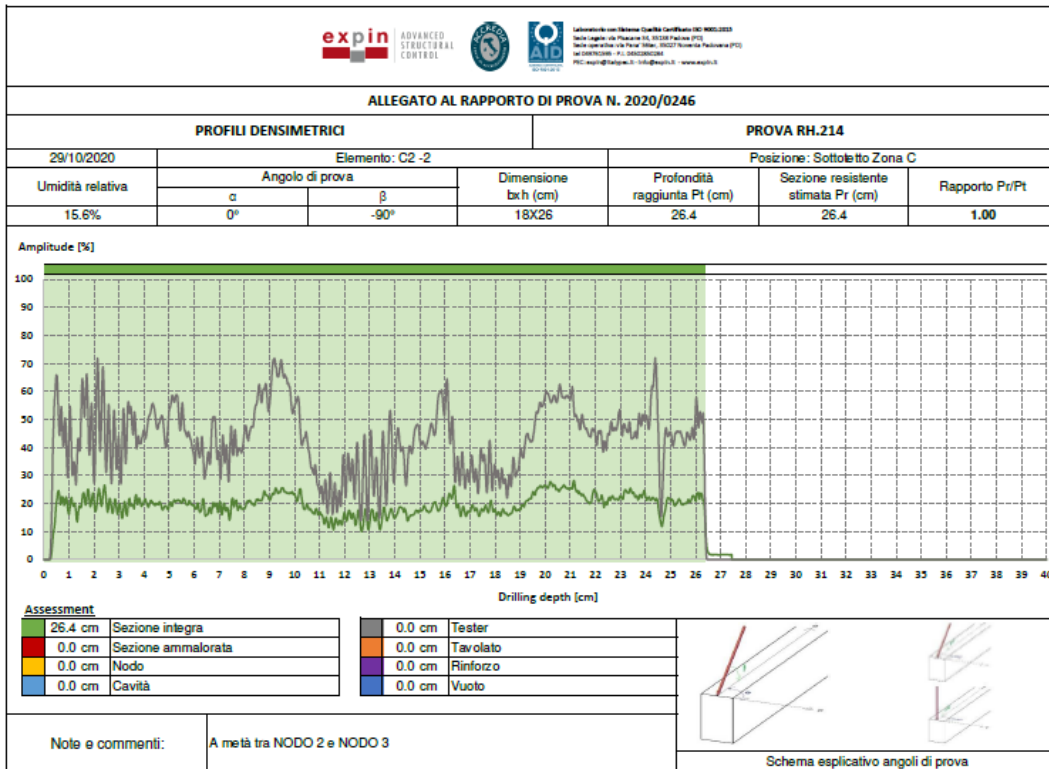
APPENDICE



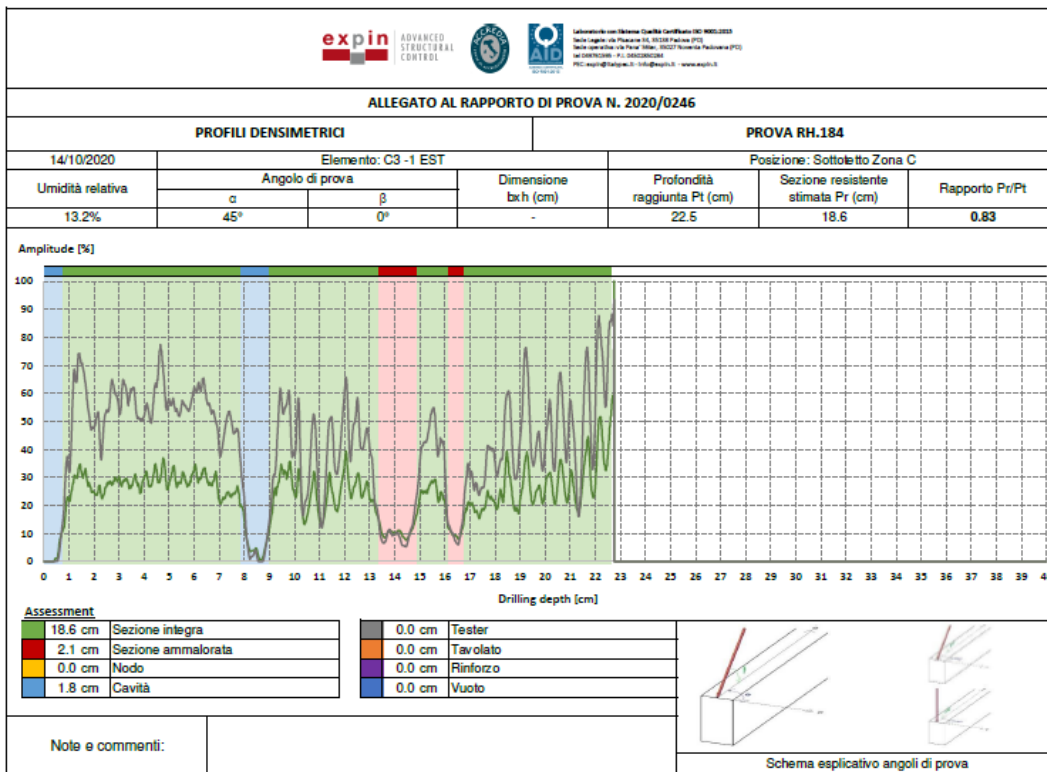
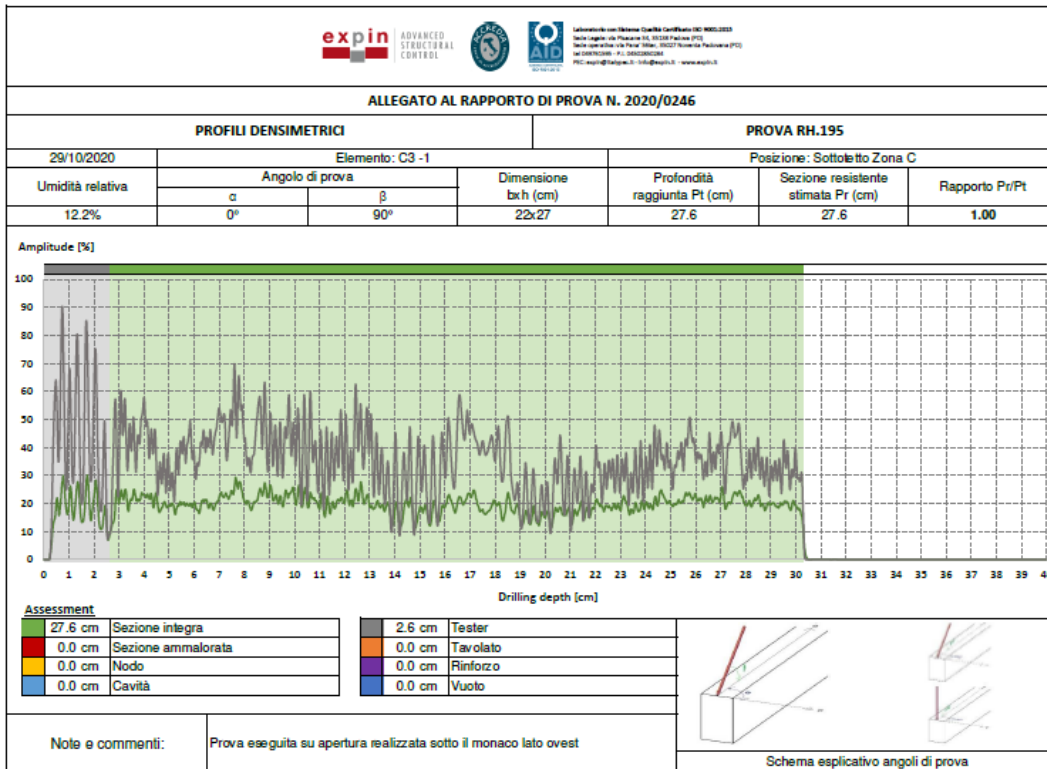
APPENDICE



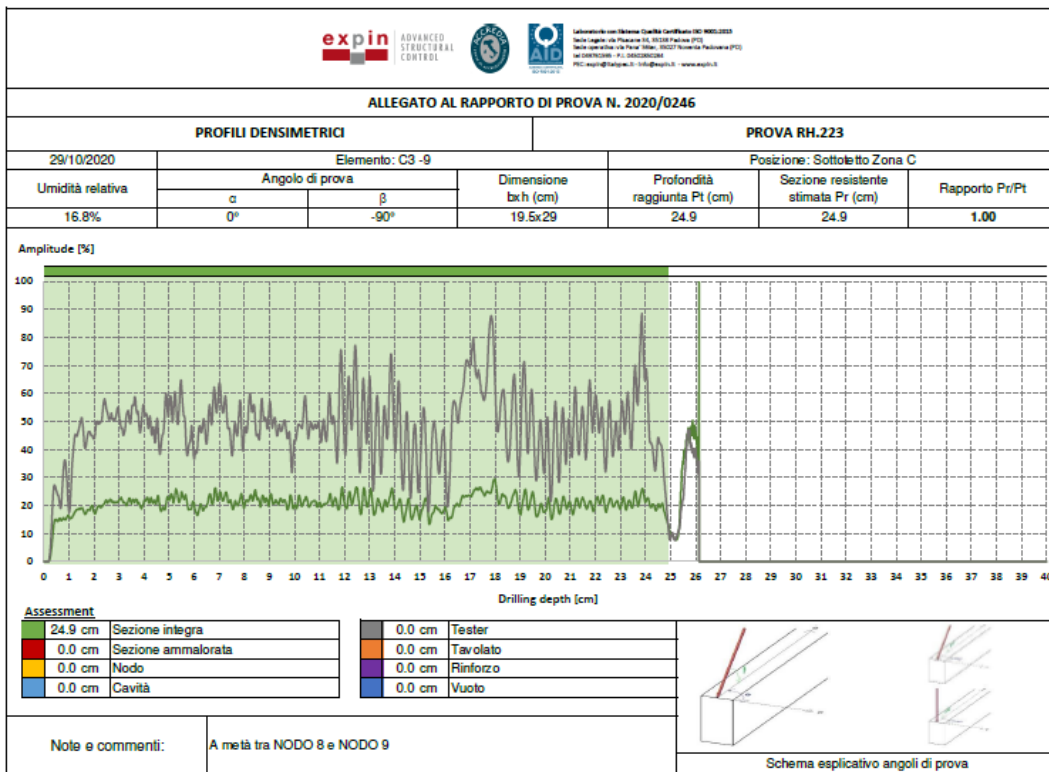
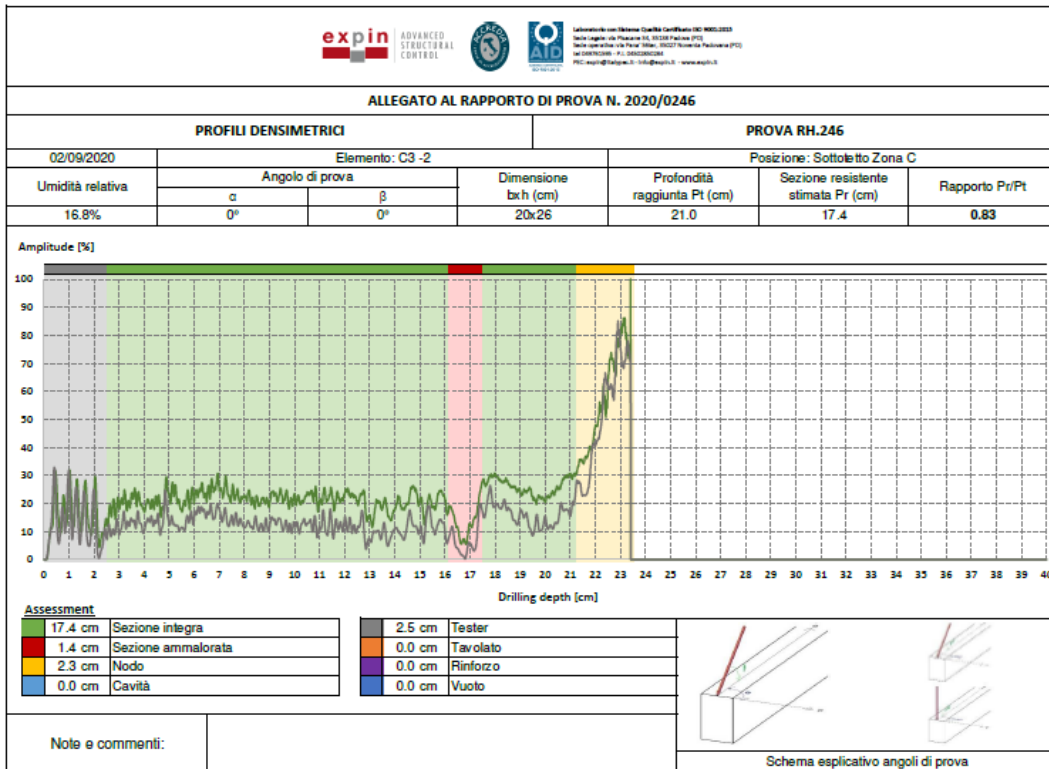
APPENDICE



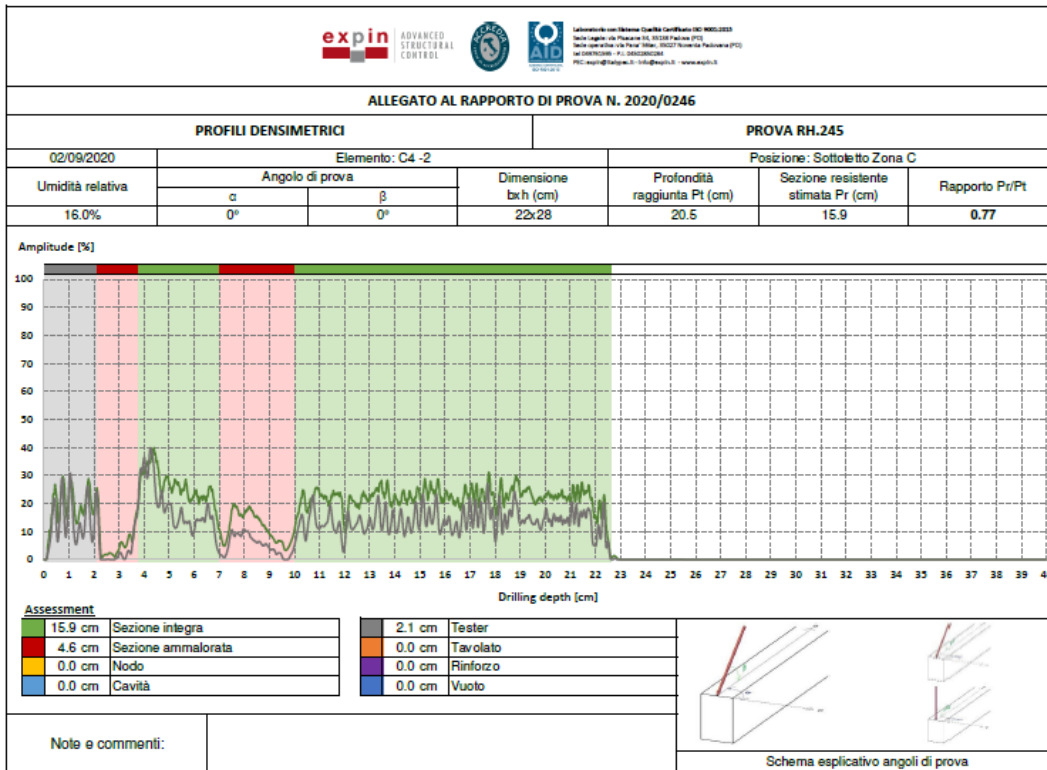
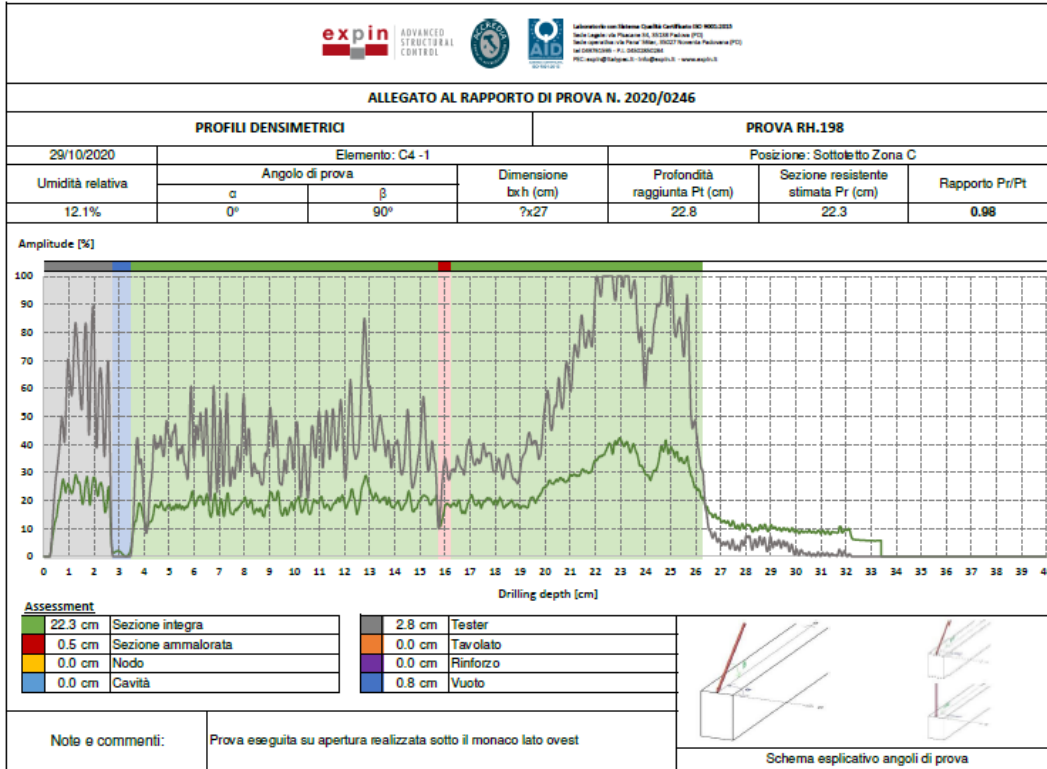
APPENDICE



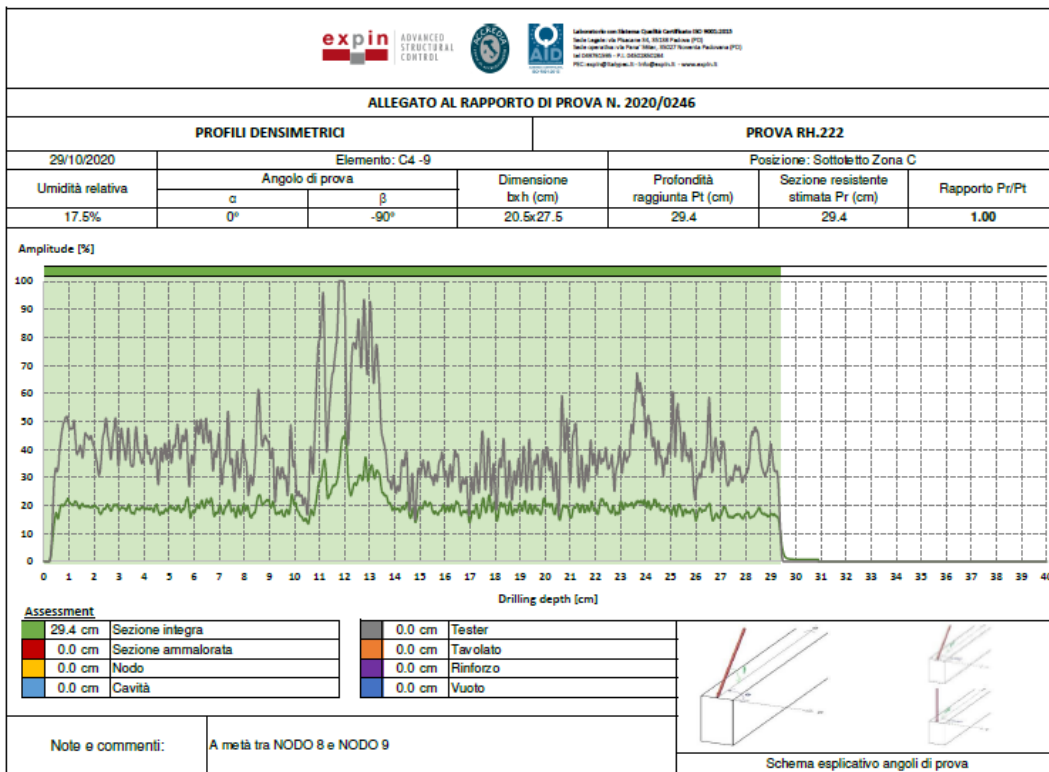
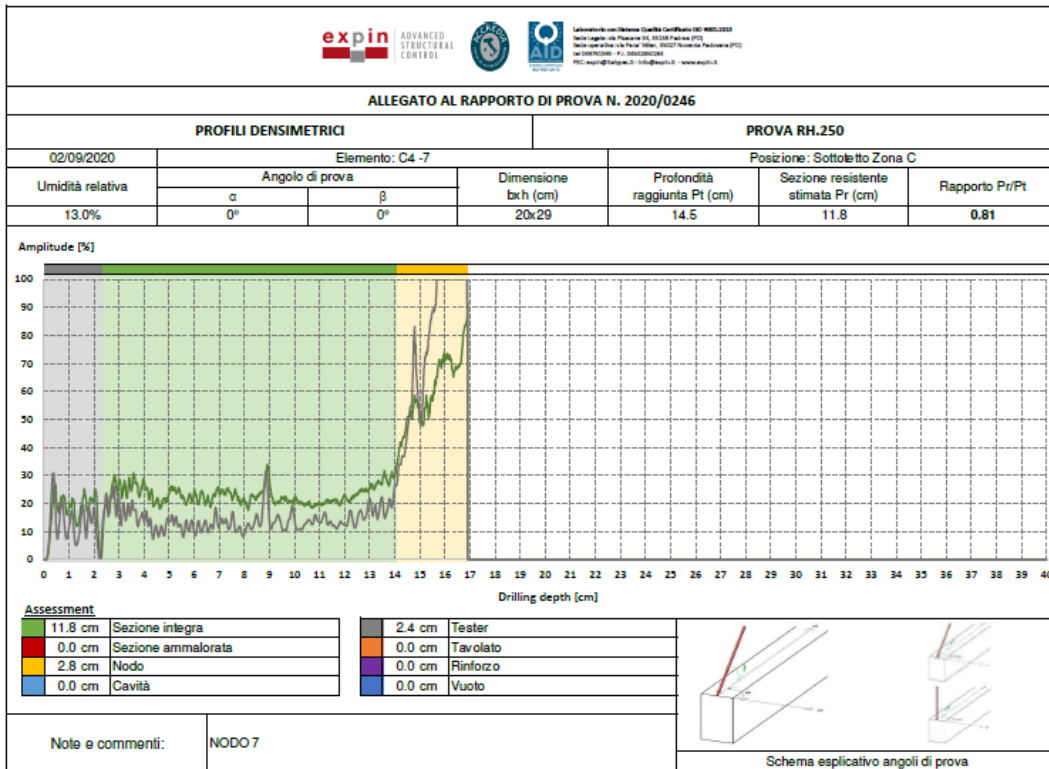
APPENDICE



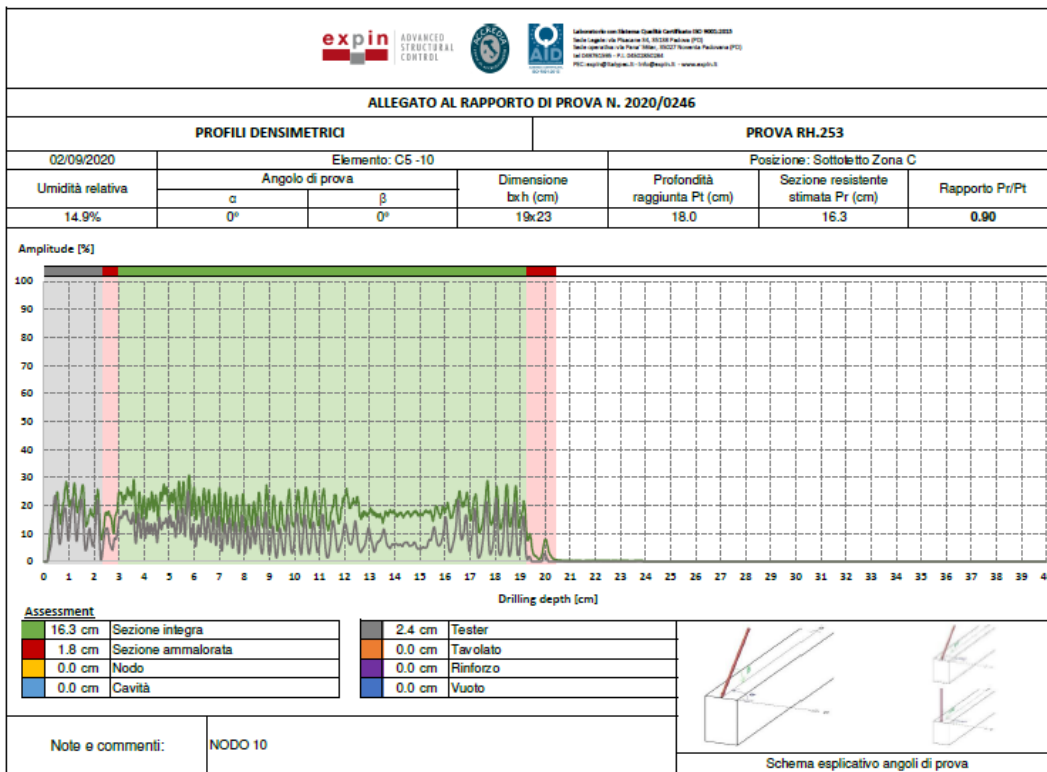
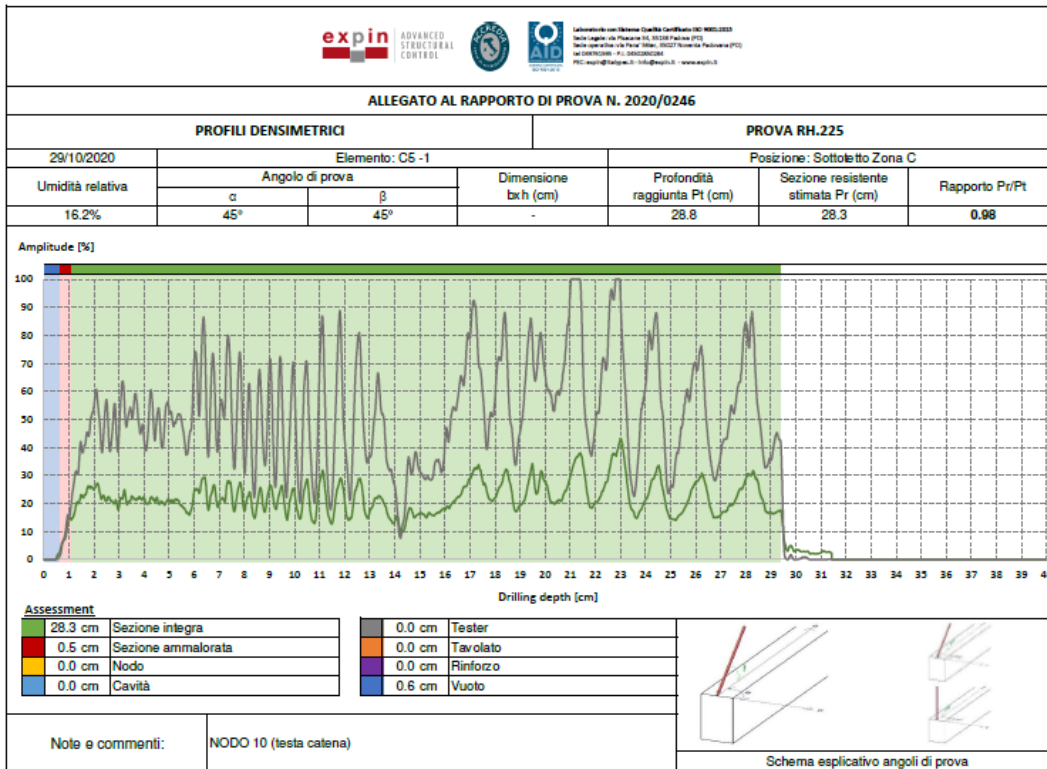
APPENDICE



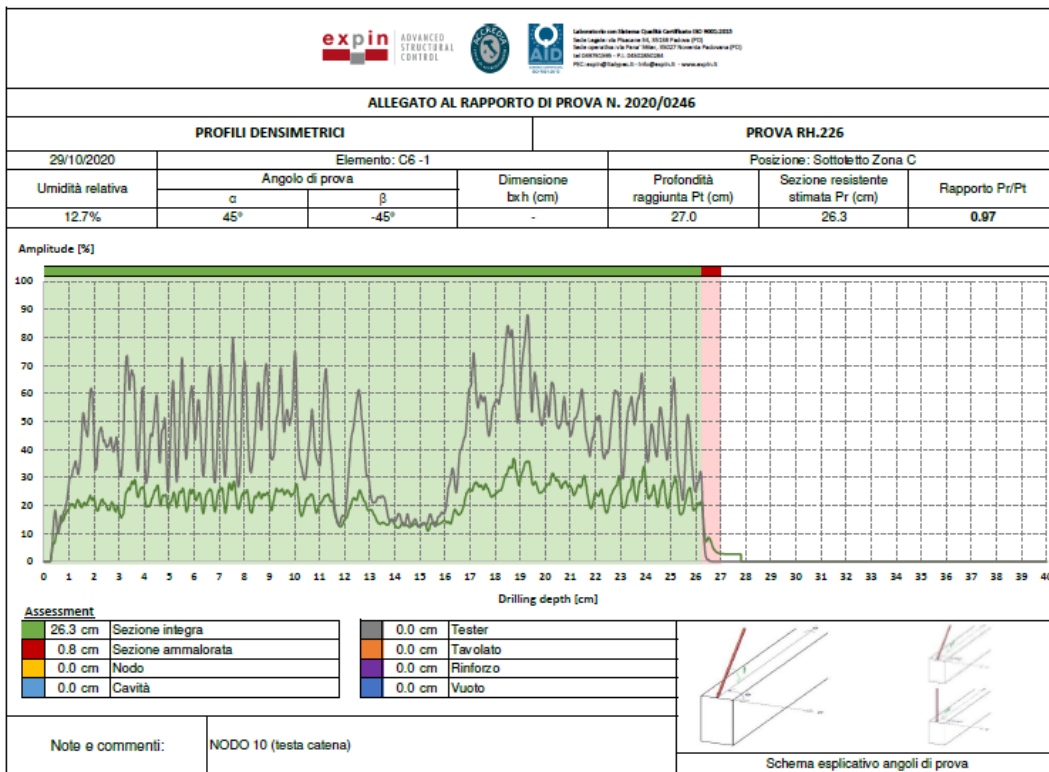
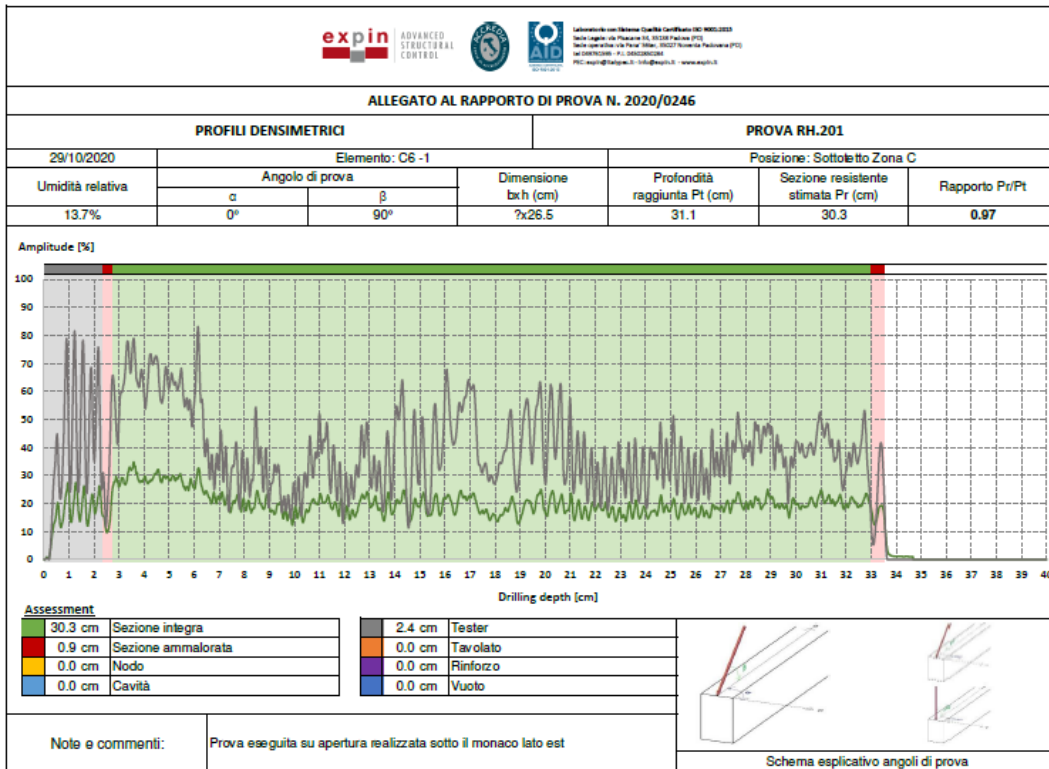
APPENDICE



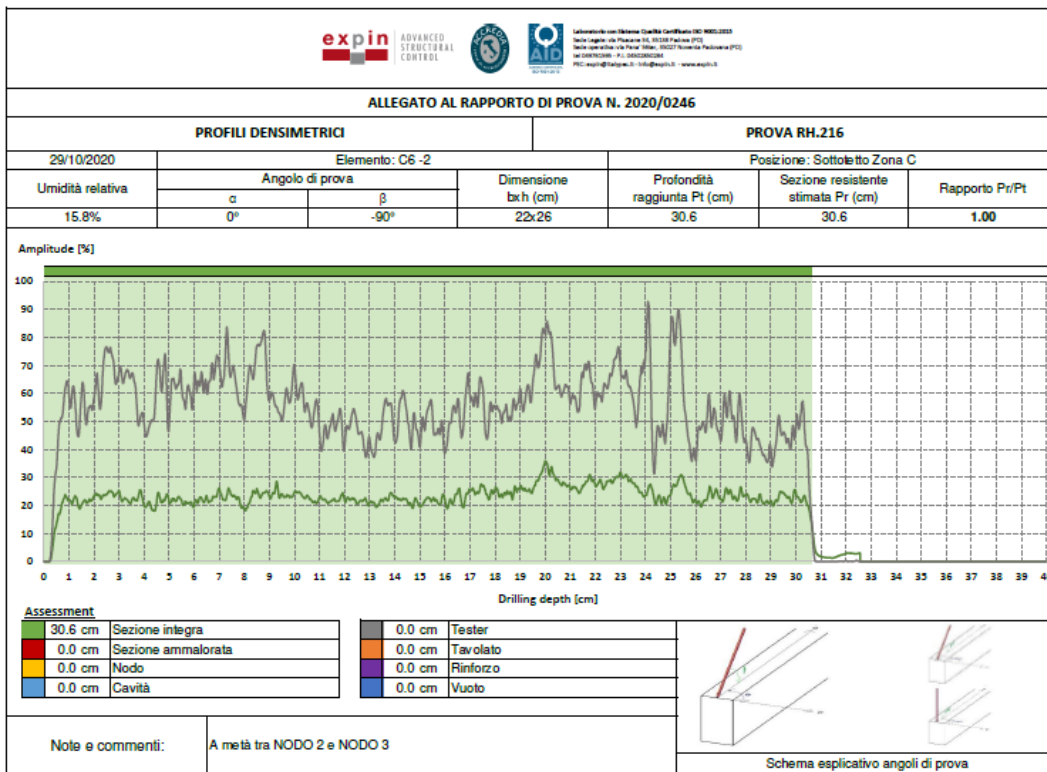
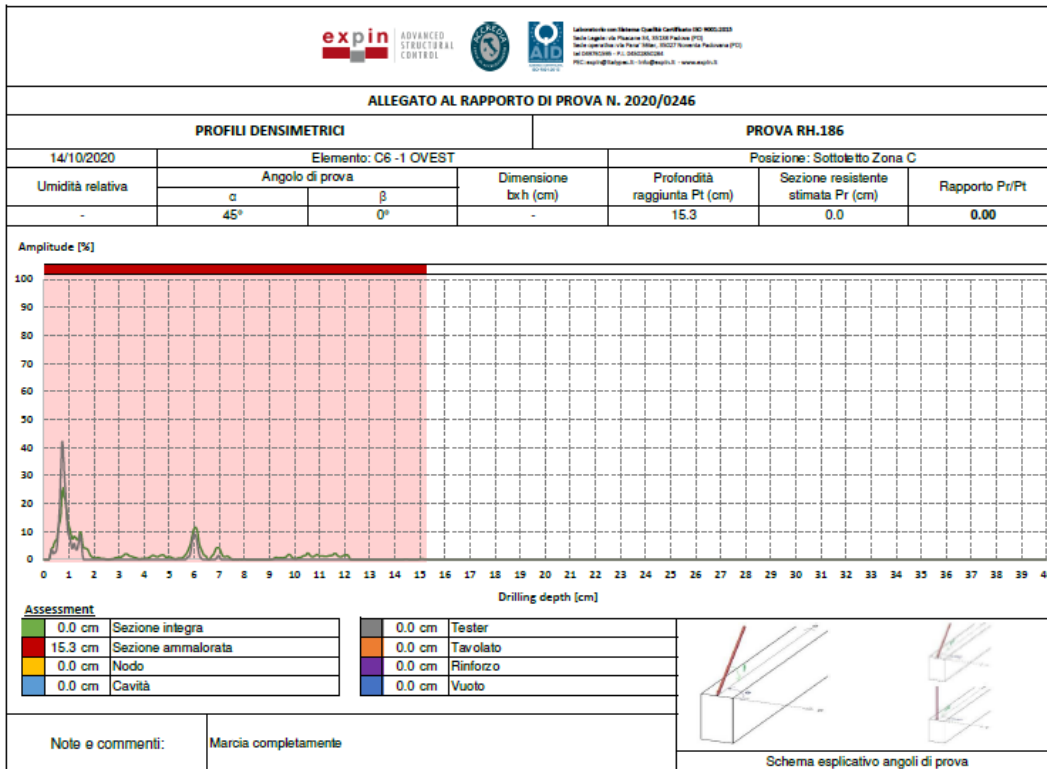
APPENDICE



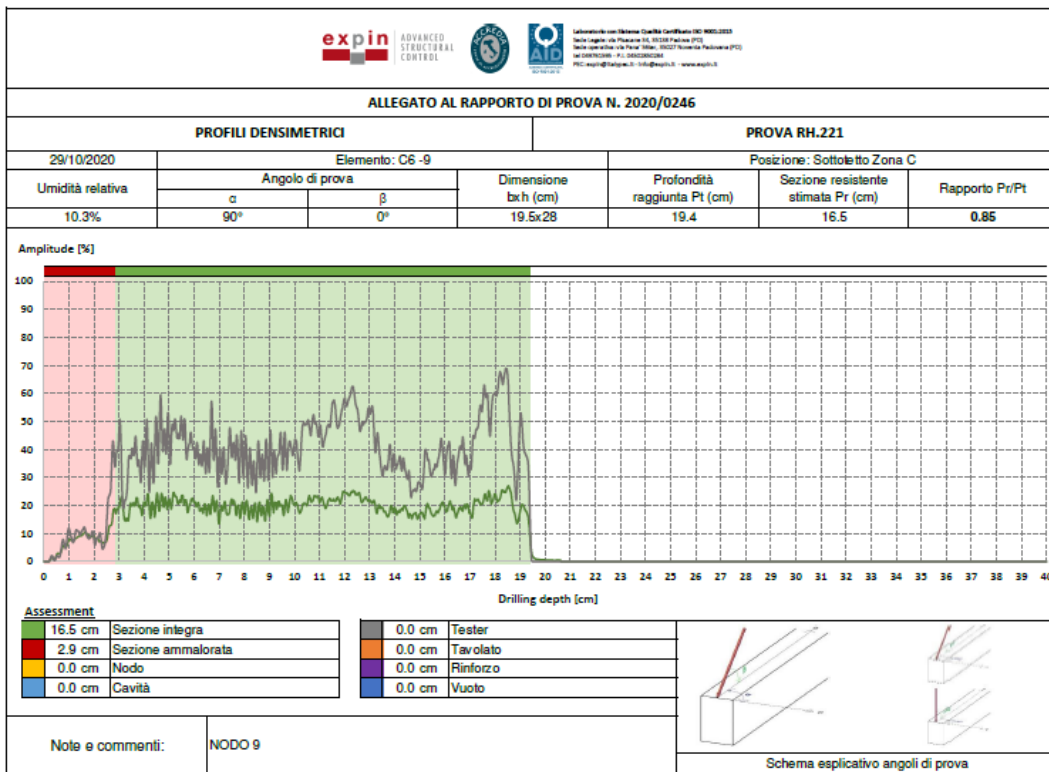
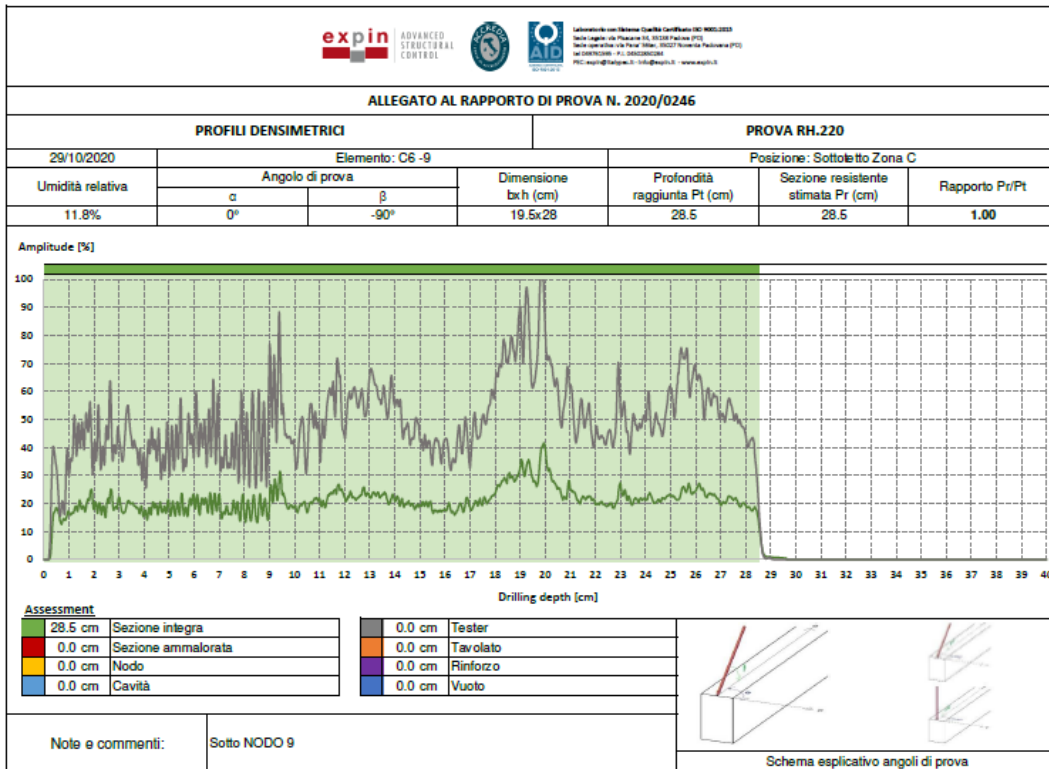
APPENDICE



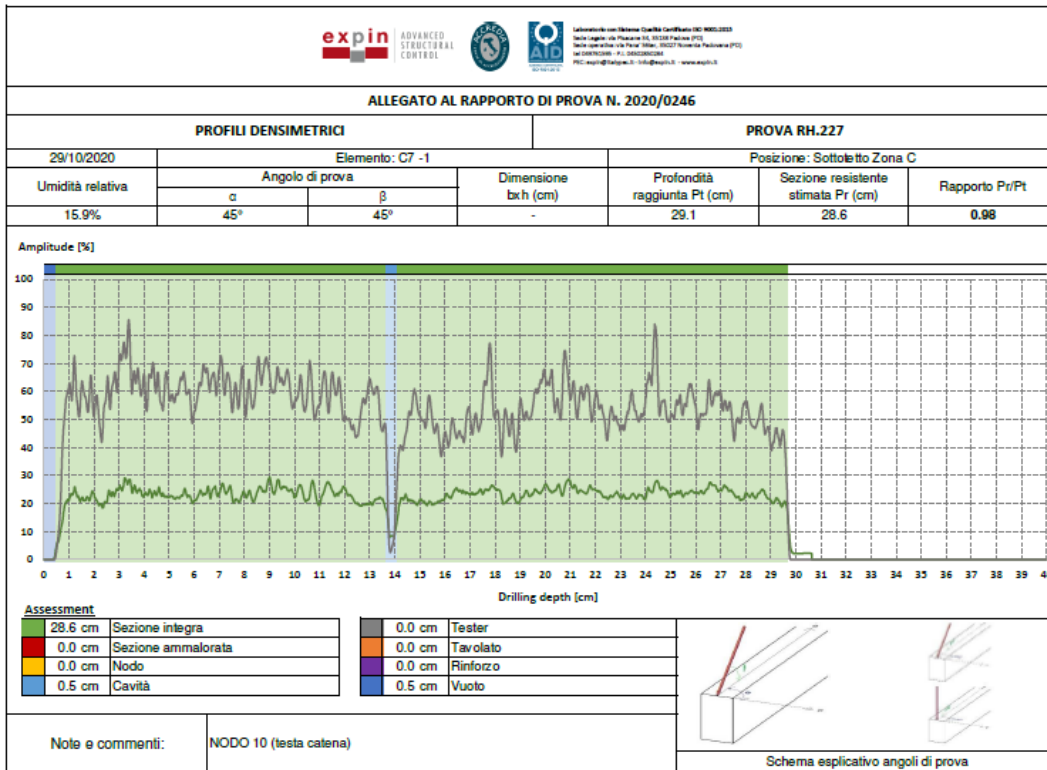
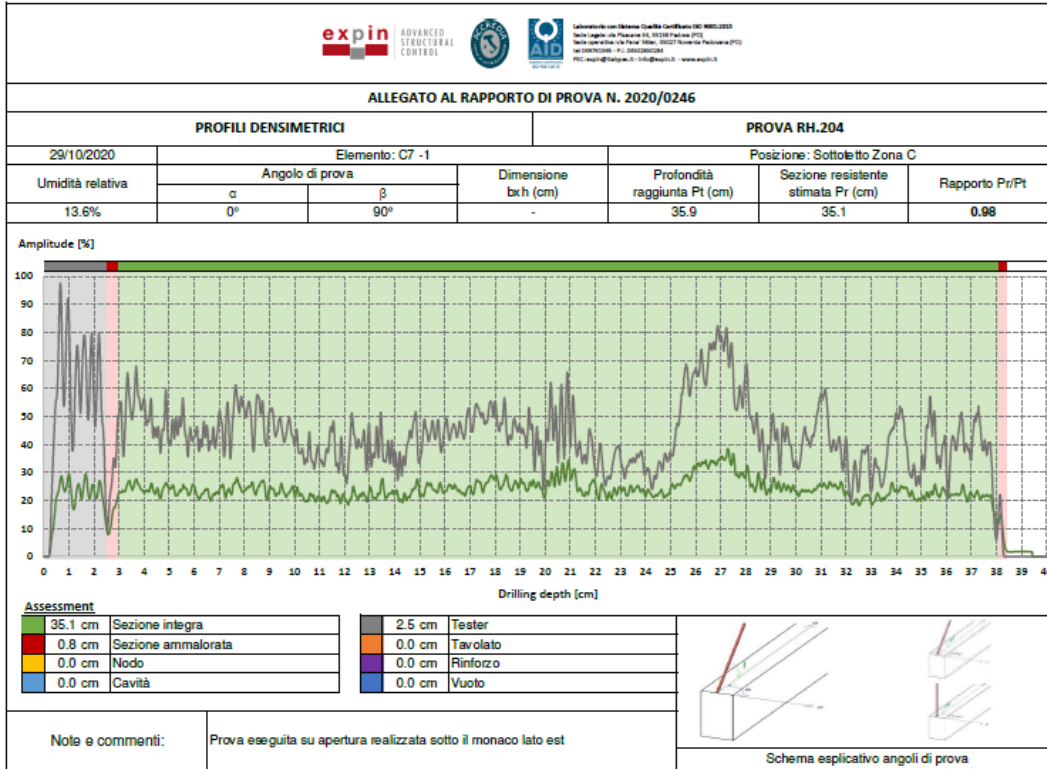
APPENDICE



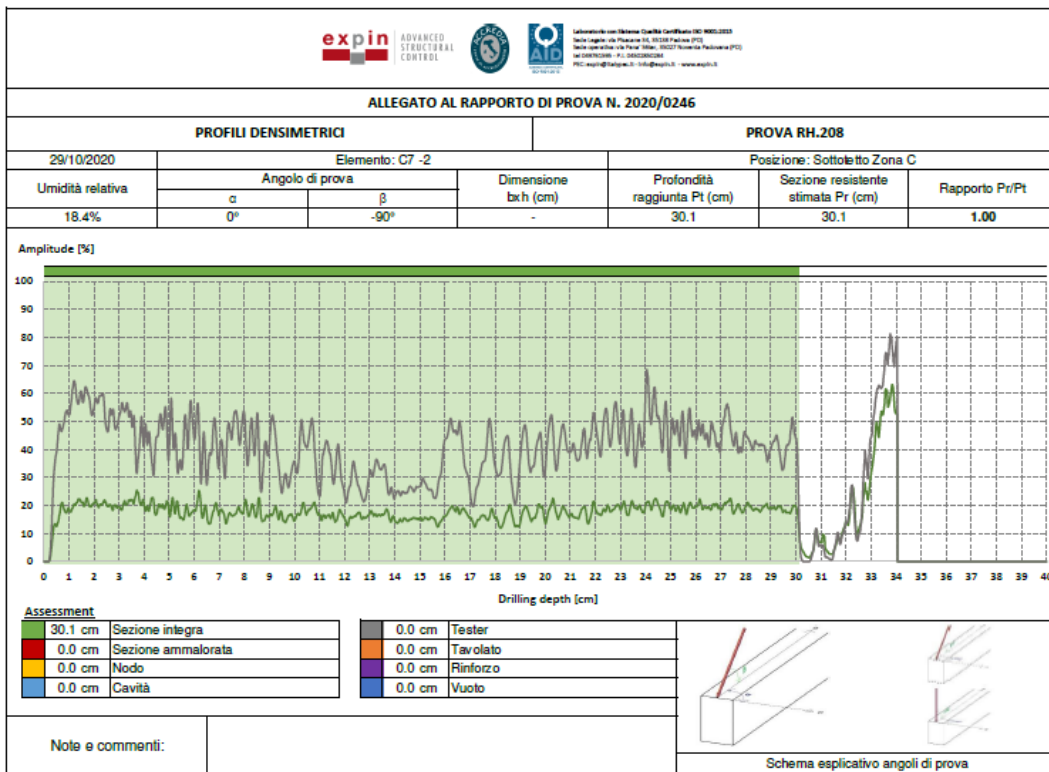
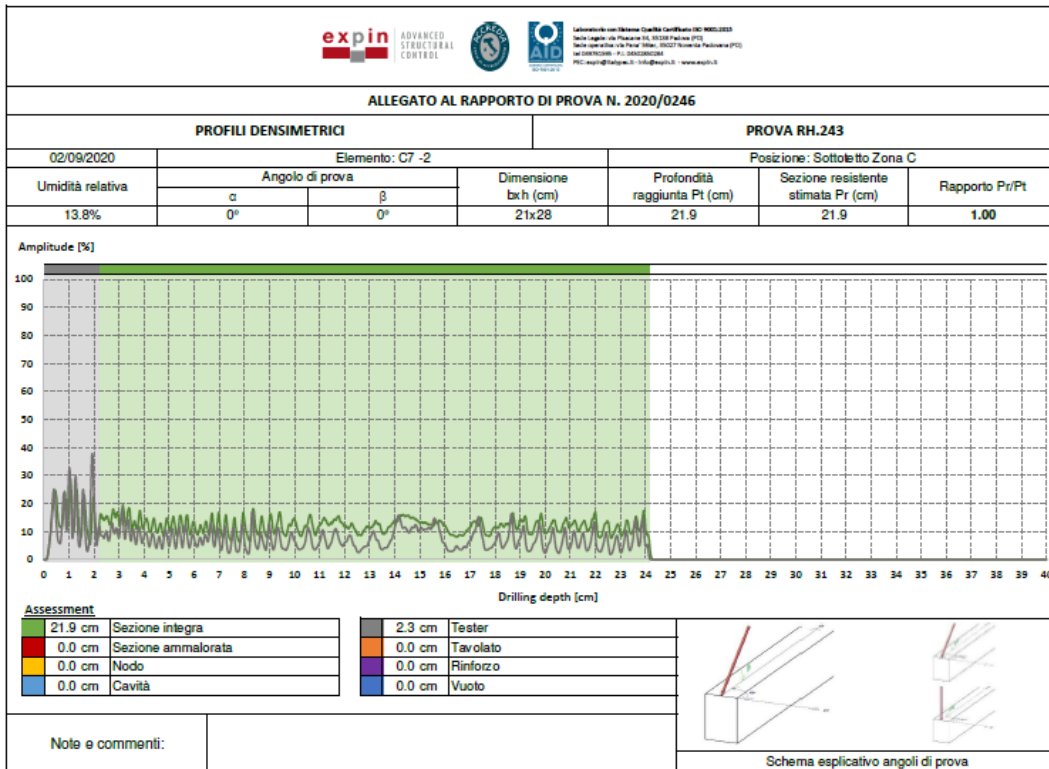
APPENDICE



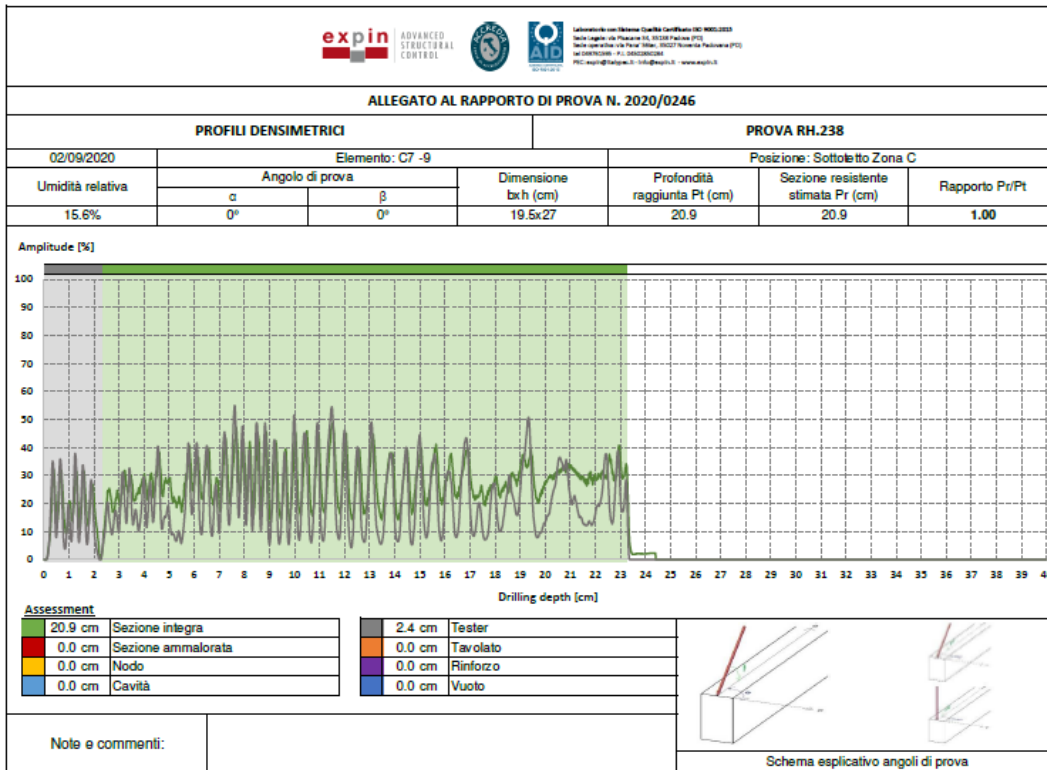
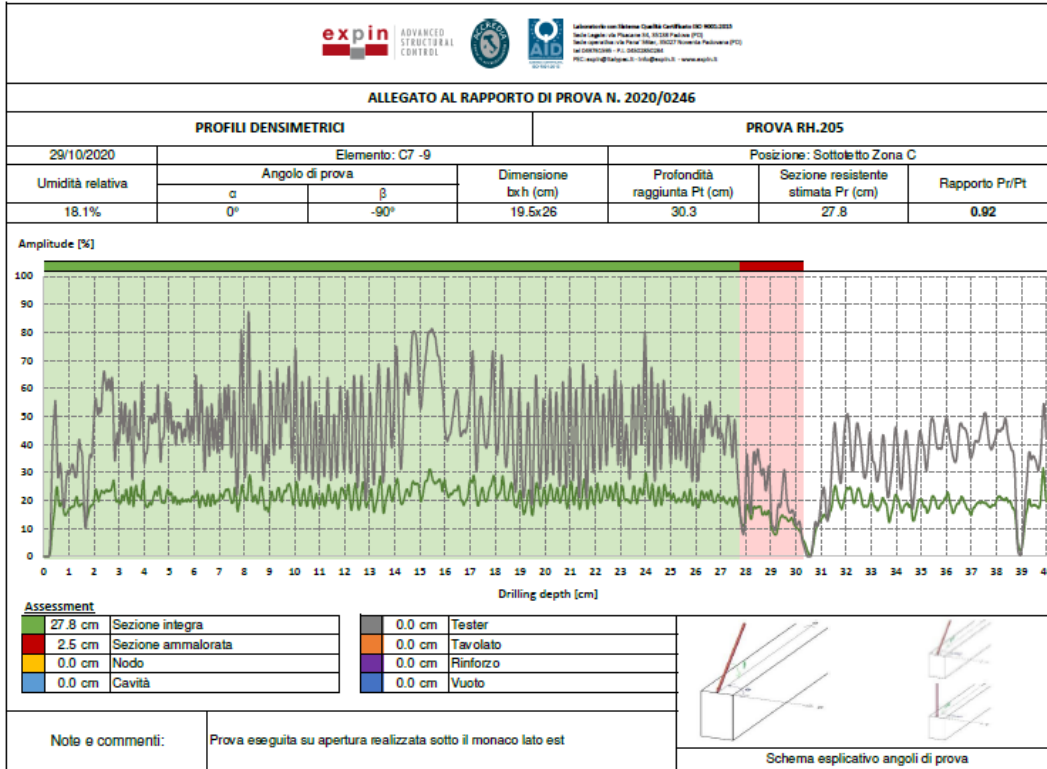
APPENDICE



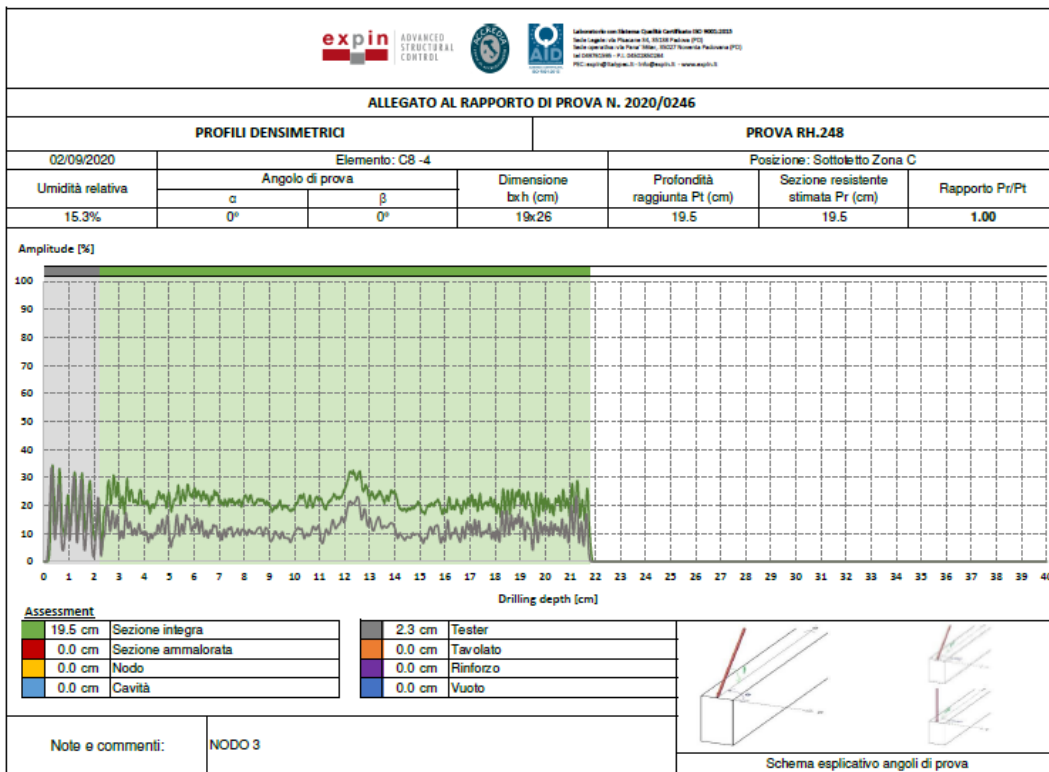
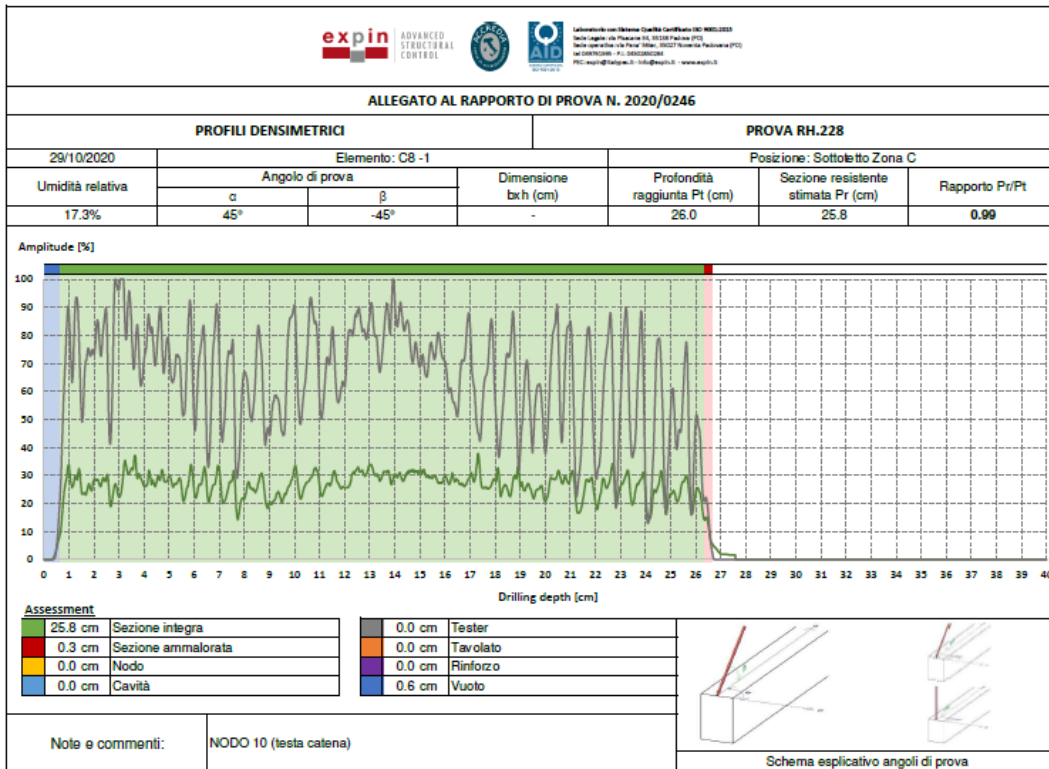
APPENDICE



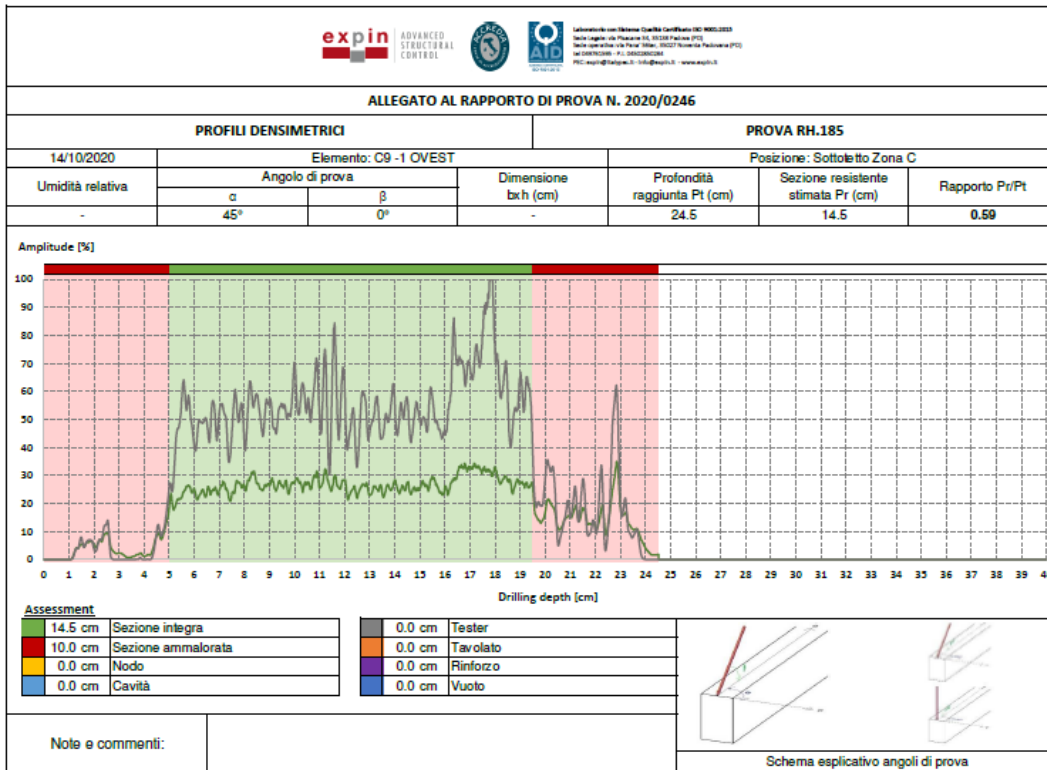
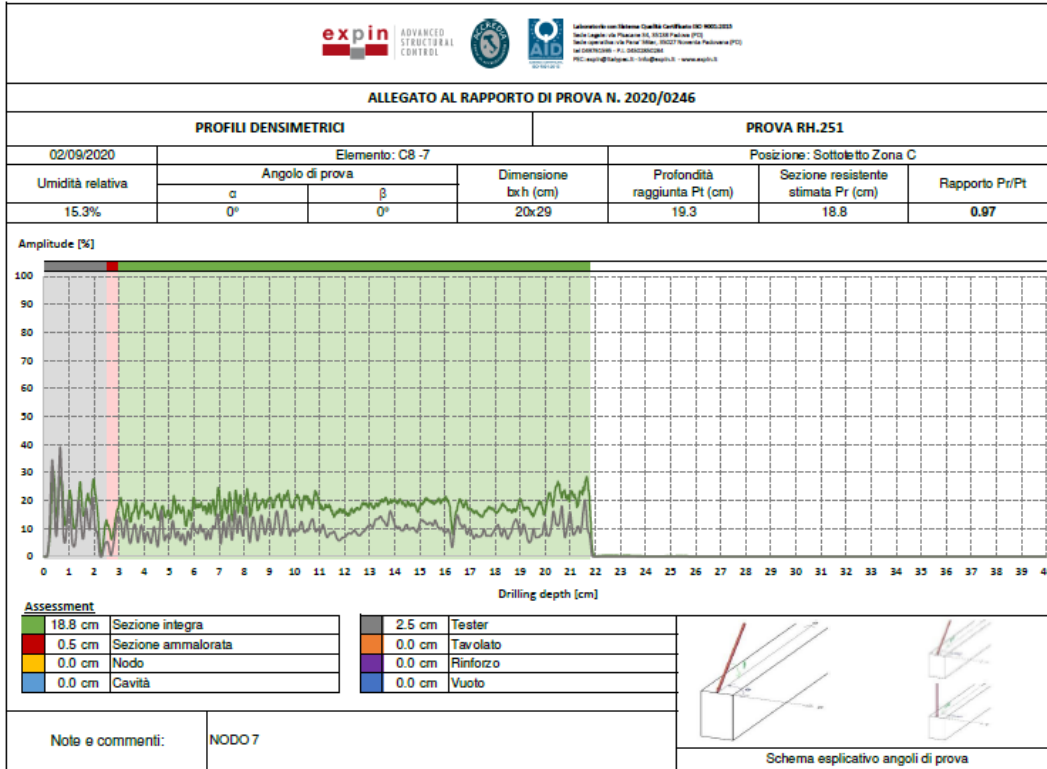
APPENDICE



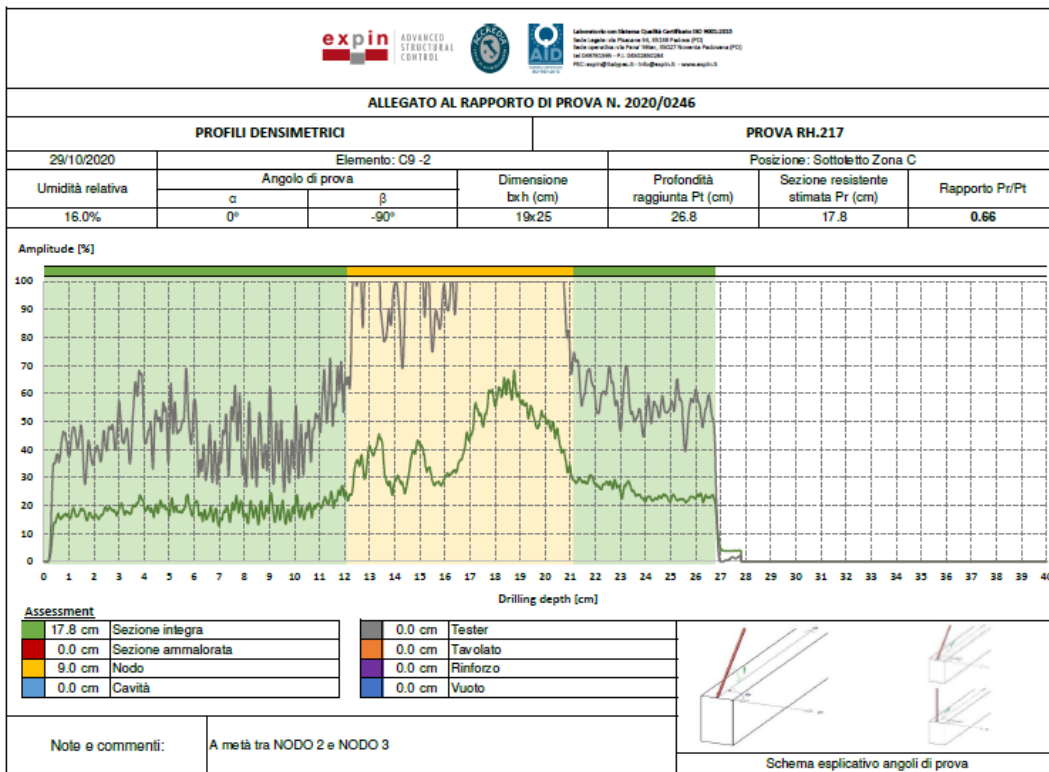
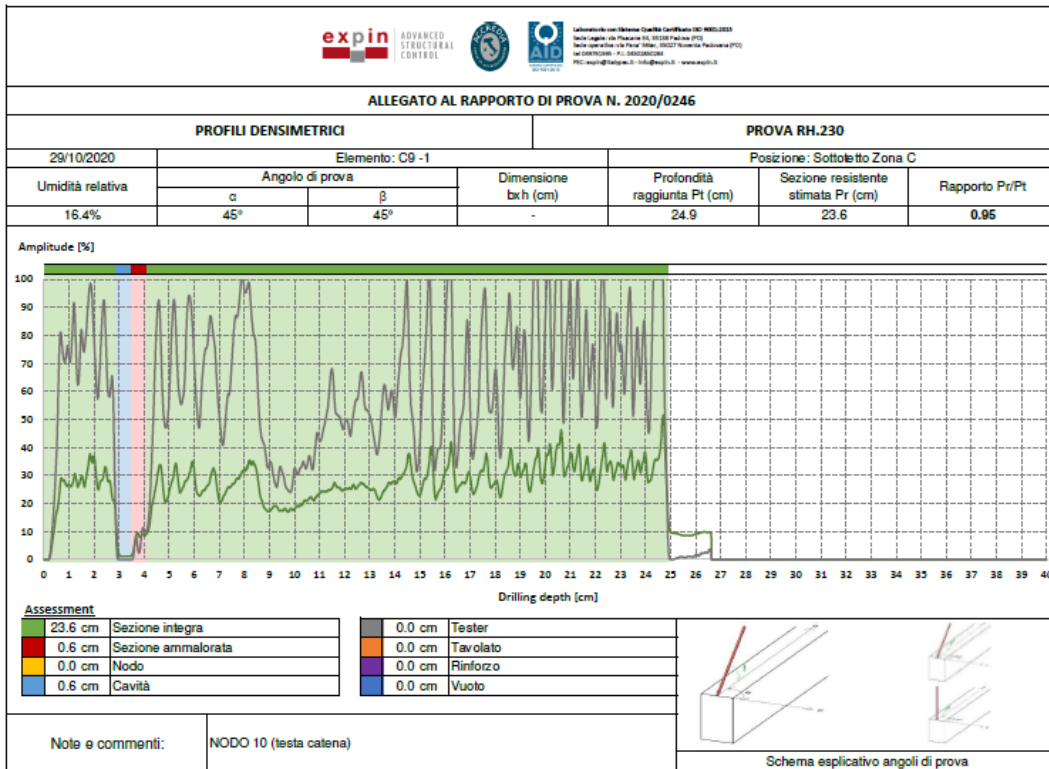
APPENDICE



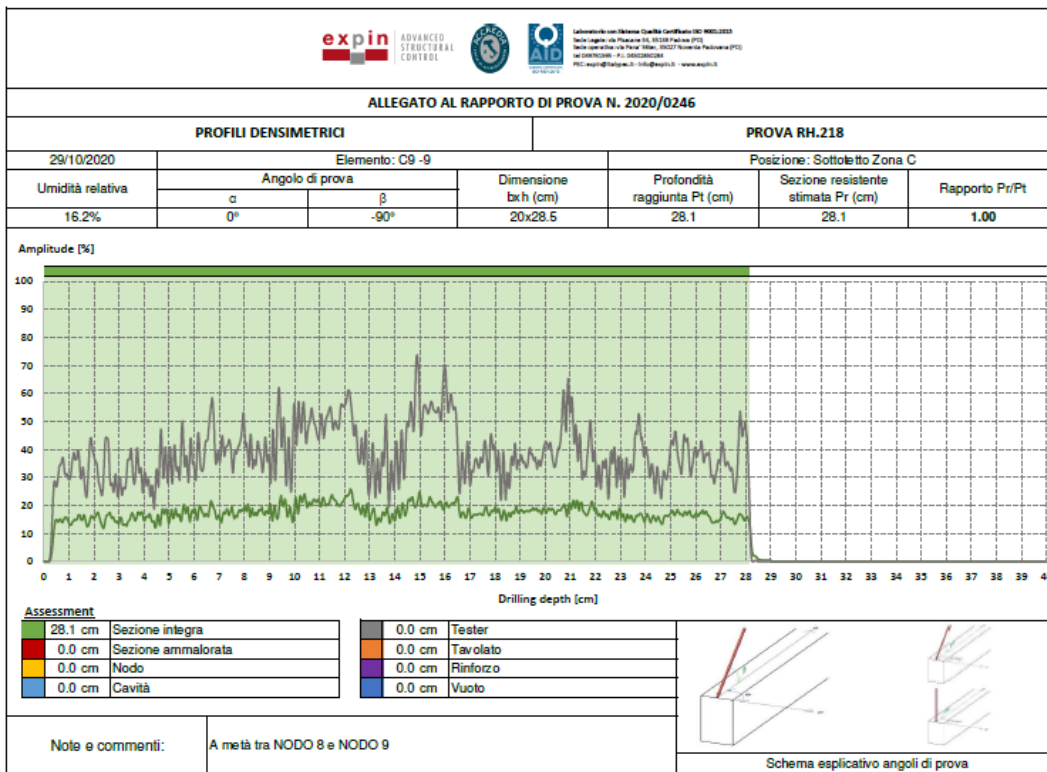
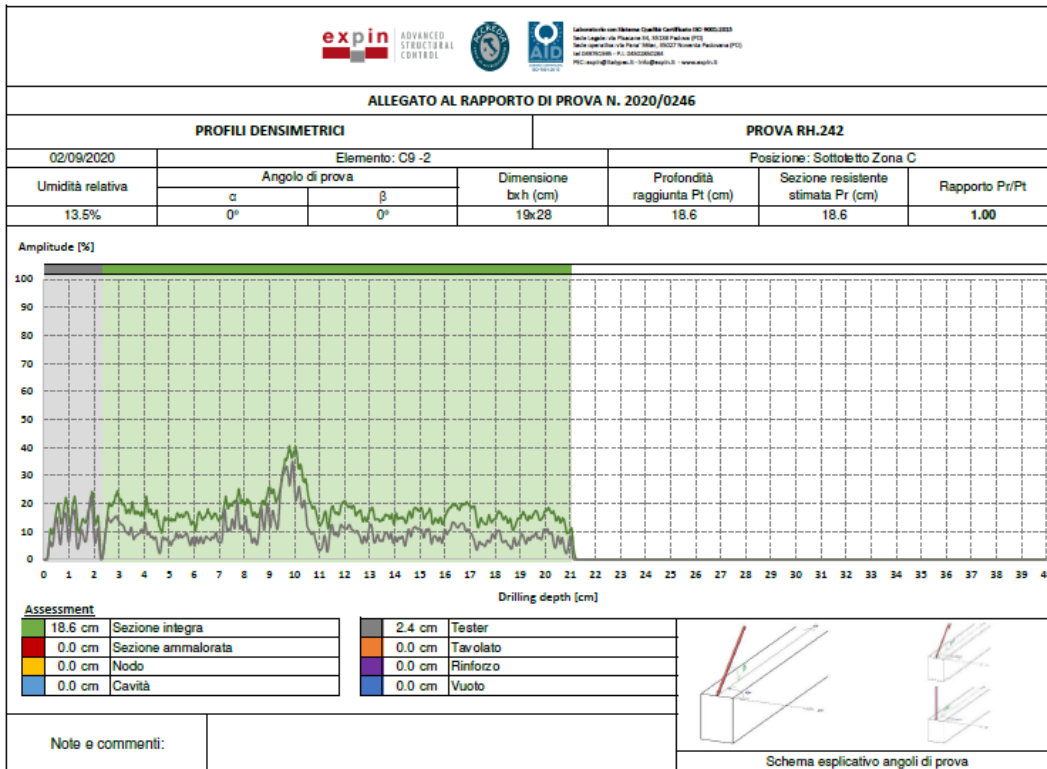
APPENDICE



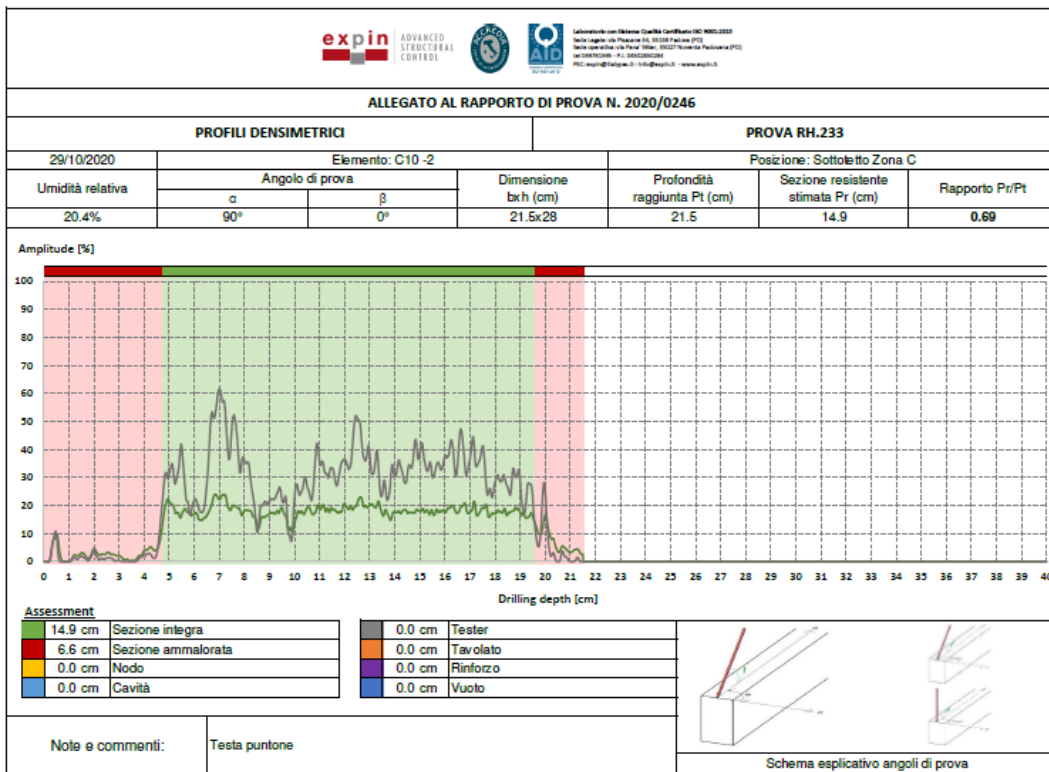
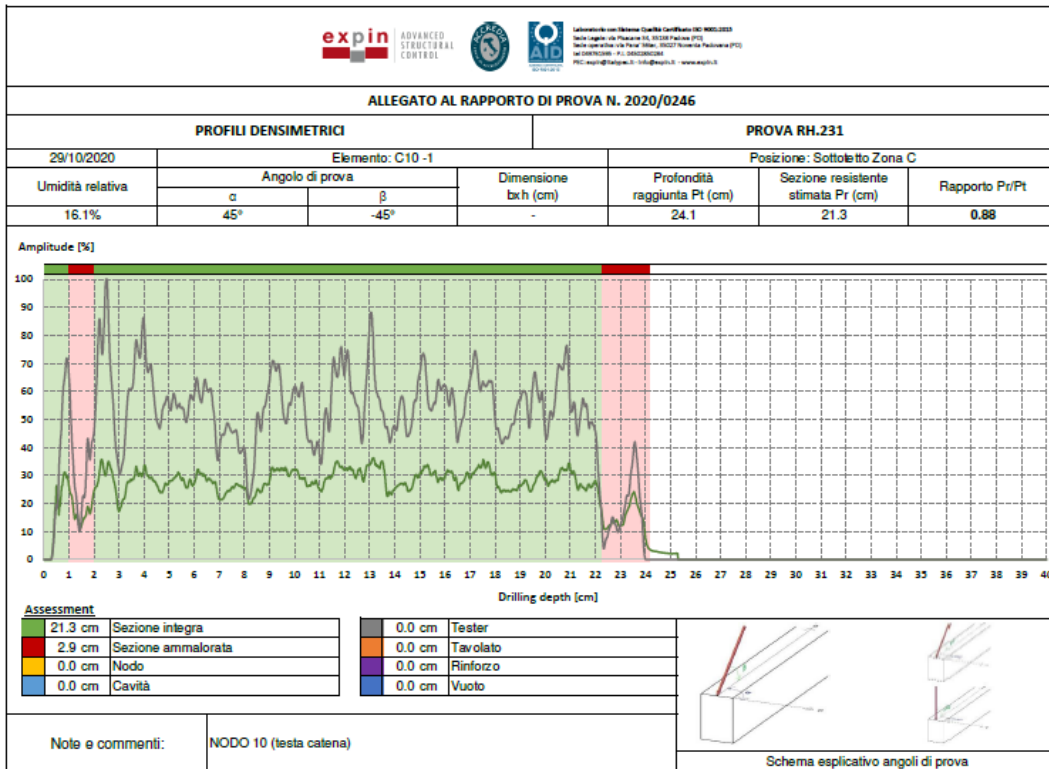
APPENDICE



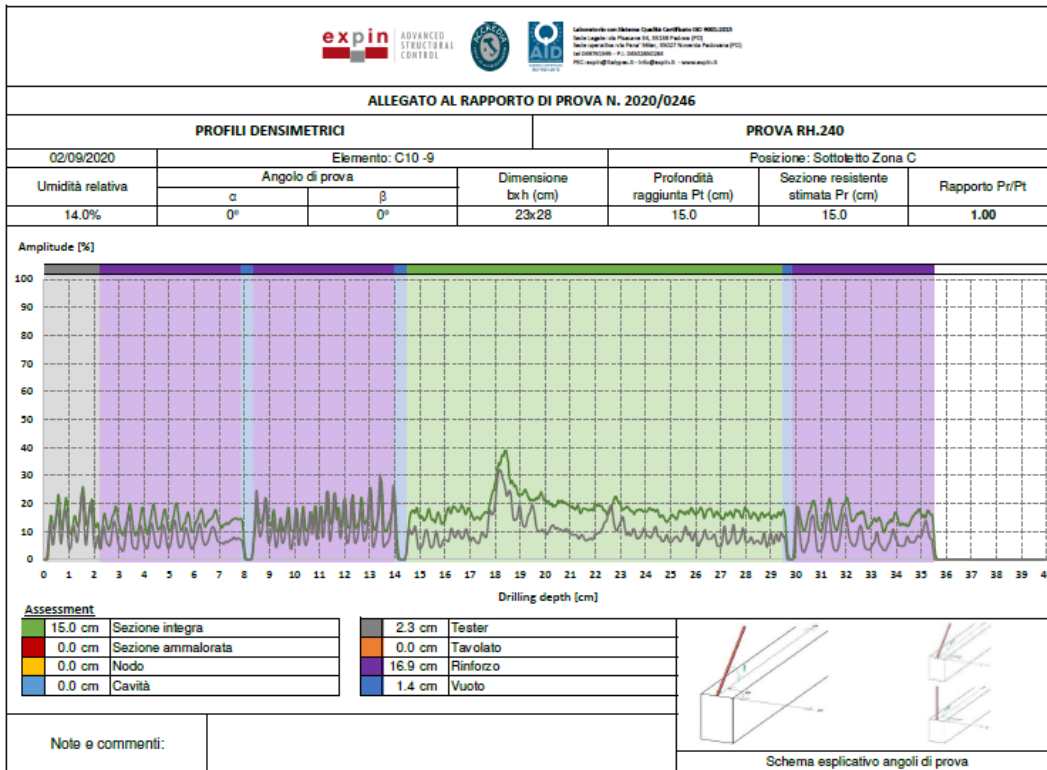
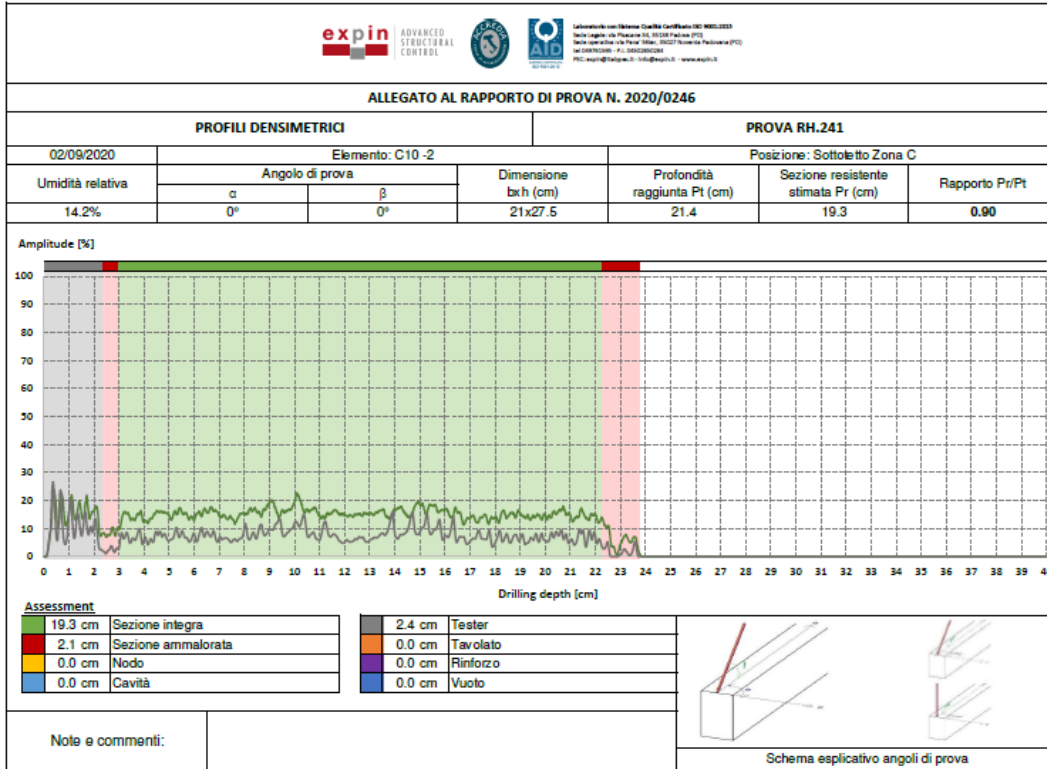
APPENDICE



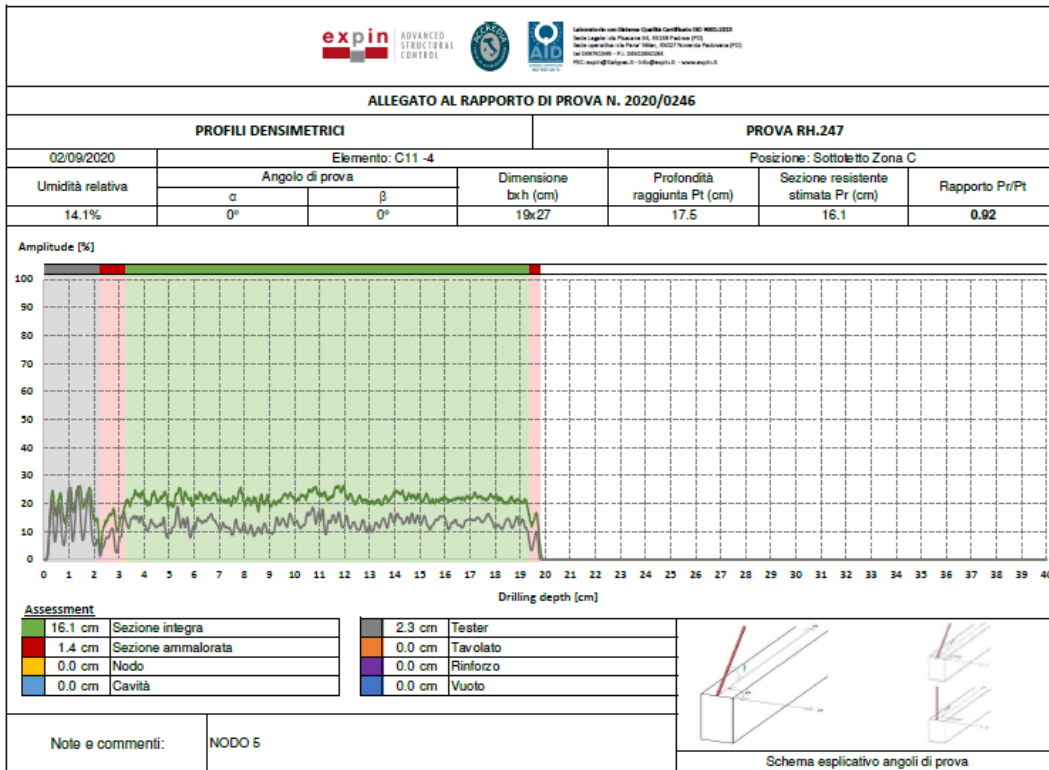
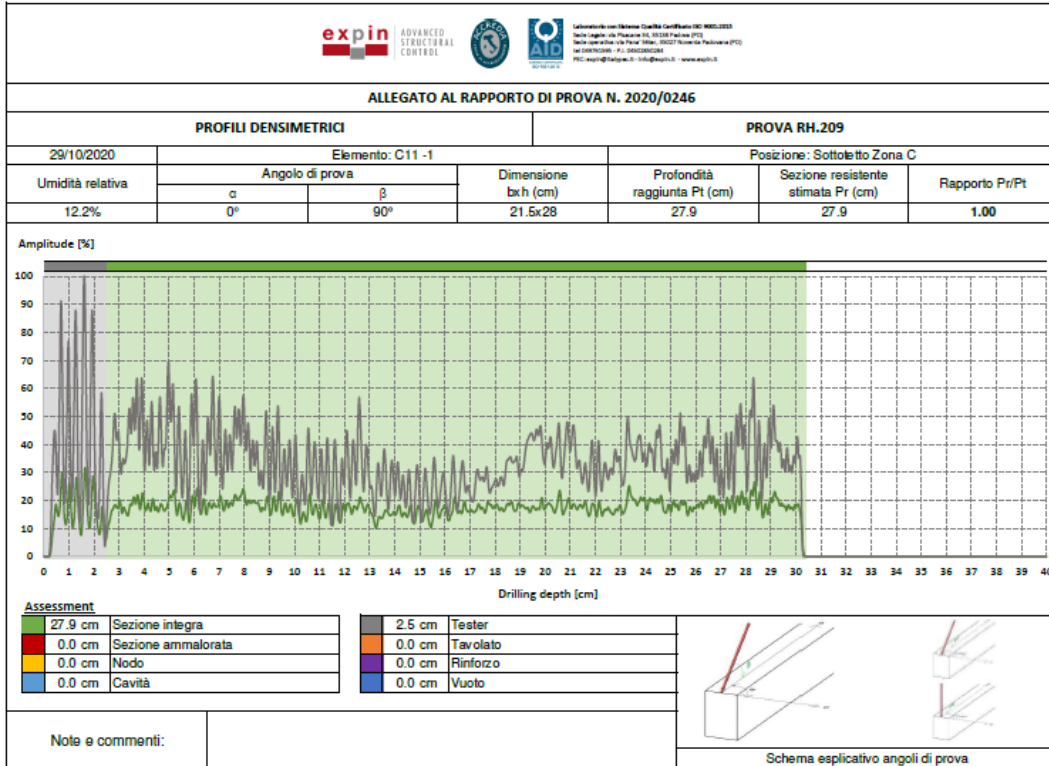
APPENDICE



APPENDICE



APPENDICE



APPENDICE

