



ASSOCIAZIONE
ITALIANA
COMPOSITI

*Conferenza AICO
Fiera del Restauro – Ferrara
Venerdì 5 Aprile 2002*

***Realizzazioni e Sviluppo di Tecnologie di Restauro e di Recupero Strutturale con
Materiali Compositi Innovativi (FRP)***



INGEGNERIA E ARCHITETTURA DEL RESTAURO

Valutazioni progettuali ed analisi di interventi con sistema Carboniar®

Relatore ing. Gabriele Marchini studio tecnico I.A.R.

***Pieve Millenaria di San Pietro Apostolo - San Pietro di Feletto (TV)
Progetto di recupero statico della cappella battesimale***

Relatori:

arch. Marcello Molteni libero professionista Treviso

ing. Davide Beltrame libero professionista Venezia



INGEGNERIA E ARCHITETTURA DEL RESTAURO

Presentazione

La società IAR di Rovigo, che si occupa di recupero strutturale e di conservazione, quest'anno compie 30 anni di attività.

La IAR ha sempre valutato con grande interesse l'innovazione tecnologica ed essendo anche impresa realizzatrice degli interventi proposti, si è sempre preoccupata di evitare facili entusiasmi e verificare nella realtà le cosiddette "assunzioni teoriche".

Così è stato per l'intervento di recupero della cripta della Basilica di San Marco a Venezia, chiusa al culto da oltre 3 secoli a causa delle periodiche invasioni delle acque della laguna; l'efficacia e la compatibilità dell'intervento sono state preliminarmente studiate tramite test durati 14 anni, e l'intervento risulta tuttora funzionale.

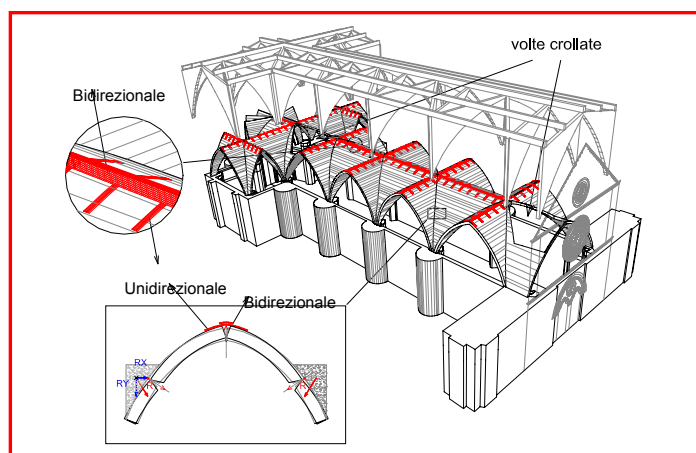


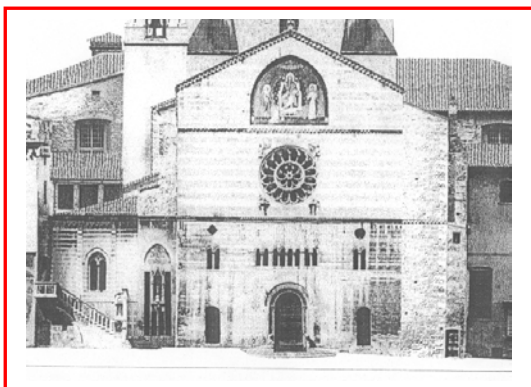
La IAR ha realizzato oltre 80 interventi con il sistema **Carboniar**[®] in fibre di carbonio, particolarmente su strutture di valenza storica, in Italia, Croazia, Slovenia, Grecia, Turchia, Bosnia; citiamo l'intervento sulle volte di villa Caldogno - Nordera del Palladio, realizzato nel 1996,



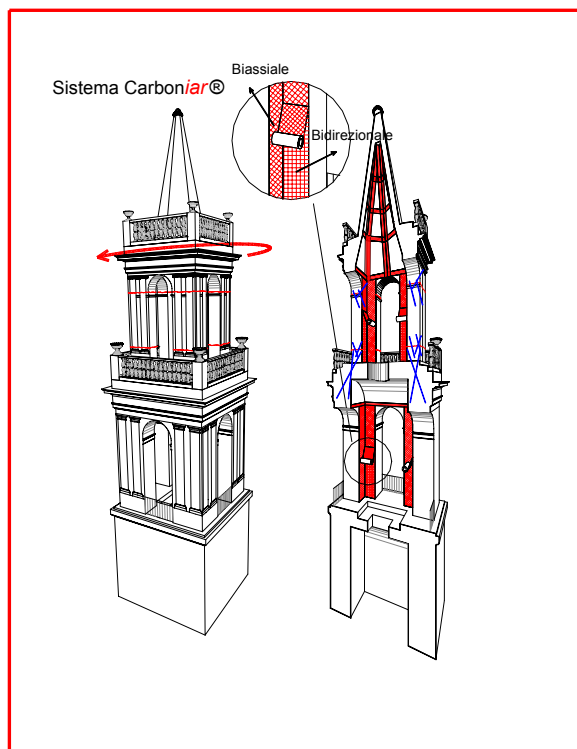
ed il pronto intervento sulle volte della Basilica Superiore di San Francesco di Assisi, realizzato subito dopo il terremoto del 1997.

Le linee rosse individuano gli 800 ml di nastri in fibre di carbonio applicati.





Di grande impegno, e di ampia articolazione, è risultato l'intervento sul complesso della Cattedrale San Feliciano di Foligno, in cui, in sinergia con il consolidamento delle volte e del campanile con fibre di carbonio, si è intervenuti sulla facciata con dispositivi di vincolo assiale in lega a memoria di forma.



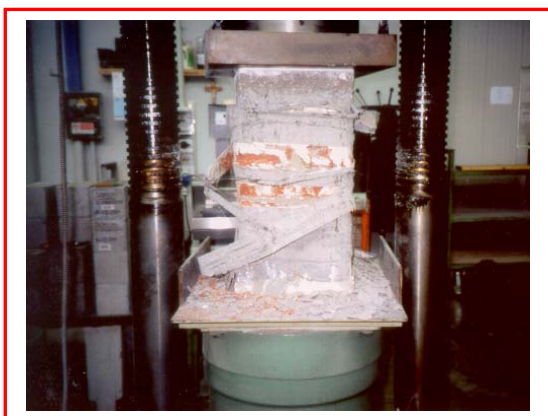
Riteniamo opportuno ribadire la necessità di una qualificazione delle ditte che operano in questo delicato settore, evitando spazi ad improvvisazioni che potrebbero ingenerare false sicurezze sull'efficacia del consolidamento.

La qualificazione è da intendersi estesa a tutte le fasi dell'intervento, iniziando dall'impostazione progettuale fino alla fase realizzativa, il che significa che all'interno della ditta devono essere presenti sia tecnici che operatori qualificati ed esperti.

Valutazioni progettuali ed analisi di interventi con sistema Carbon*iar*[®]

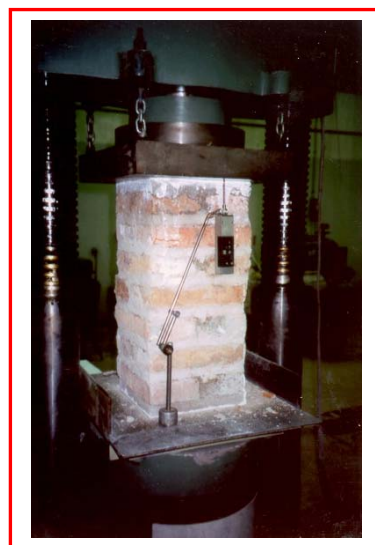
Per introdurre l'intervento con fibre di carbonio e con dispositivi in lega a memoria di forma realizzato nella Pieve di San Pietro di Feletto (TV), desideriamo soffermarci su alcune delle problematiche progettuali più significative:

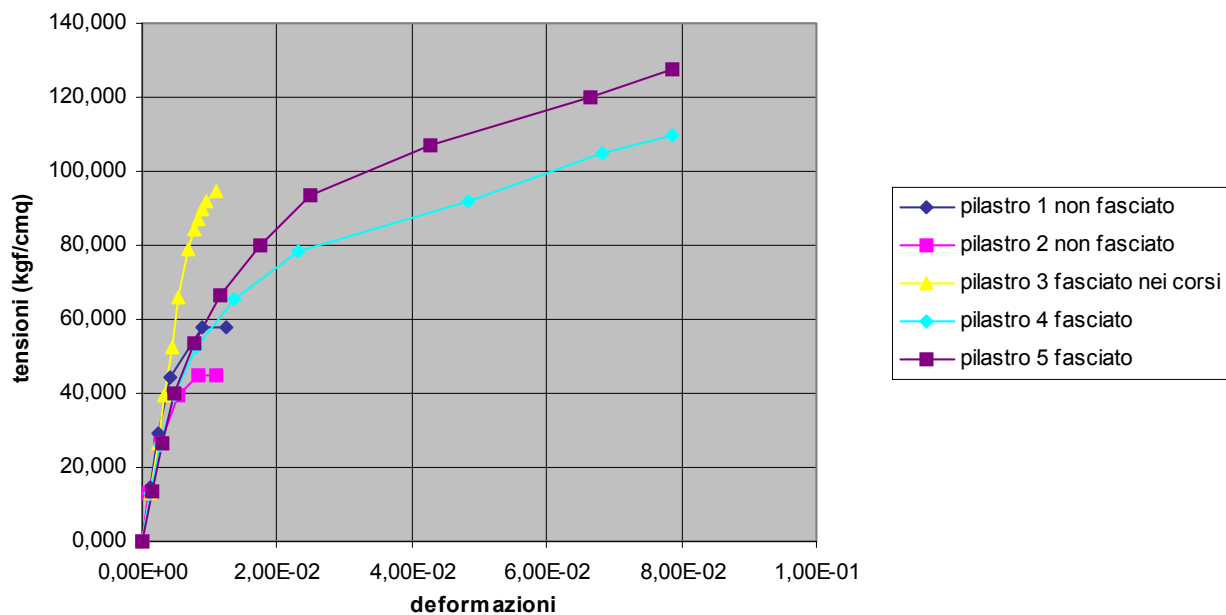
- la valutazione dell'efficacia di interventi realizzati con materiali altamente prestazionali, così come richiesto dagli Eurocodici;
- l'effettiva corrispondenza tra le valutazioni progettuali ed il comportamento reale;
- i temuti effetti causati dall'utilizzo di materiali ad alto modulo elastico, sulle rigidità originarie delle strutture murarie.



Analizziamo i risultati di prove sperimentali riguardanti la fasciatura con materiali compositi di elementi prevalentemente compressi; le attese progettuali di tale intervento sono basate su consistenti incrementi sia del carico ultimo che della duttilità. I pilastri, di sezione quadrata, avevano lato pari a 26 cm, ed erano stati realizzati in mattoni pieni di recupero aventi resistenza unitaria media a compressione pari a 32 MPa, mentre per l'allettamento era stata volutamente utilizzata una malta di bassa resistenza (1 MPa).

Si è realizzata anche una prova su pilastri in cui erano stati fasciati solo i corsi di malta, per poter mantenere l'aspetto a vista della struttura.





I pilastri 1 e 2 non erano stati rinforzati, i pilastri 4 e 5 erano stati completamente fasciati con il sistema **Carboniar**[®] ed hanno offerto un incremento medio di resistenza, rispetto ai pilastri non fasciati, pari al 124%; per inciso, per le necessità strutturali era stato richiesto dal progettista un incremento del 40 %; particolare interesse in caso di evento sismico riveste l'incremento di duttilità ottenuto pari a circa 20 volte.

Tali risultati corrispondono alle aspettative progettuali.

Il pilastro 3, quello fasciato solo sui corsi di malta, ha dato risultati molto interessanti non solo in termini di resistenza ma anche in termini di controllo delle deformazioni.

Analizziamo infine, in termini di variazione di rigidezza, i risultati ottenuti: il modulo elastico dei pilastri rinforzati, valutato tramite il calcolo del rapporto $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ nella zona ad andamento sostanzialmente rettilineo, e leggibile direttamente tramite la pendenza della retta, mostra incrementi contenuti entro il 10%, tali quindi da non modificare pericolosamente la rigidezza originaria.

L'intervento quindi non inibisce le possibilità deformative della struttura nella fase di comportamento elastico-lineare, anzi, ne consente il controllo.

Su queste basi proponiamo un modo di operare che affronti e risolva tutte le problematiche; la nostra posizione infatti è sempre stata quella di evitare toni enfatici e atteggiamenti meramente commerciali.

***PIEVE MILLENARIA DI SAN PIETRO APOSTOLO
SAN PIETRO DI FELETTO (TV)***

Progetto di recupero statico della cappella battesimale

Cenni storici

Situata nella zona del Feletto, a nord-ovest di Conegliano, su di un' altura a 270 mt. s.l.m., sorge la millenaria Pieve di S. Pietro Apostolo; l'antica nascita della chiesa, risalente ai tempi del Medio Evo, e la scarsità di fonti storico/archivistiche rende tuttavia difficoltoso stabilirne l'anno di costruzione. Si presume che la costruzione sia avvenuta sul sito di un preesistente edificio, forse un tempio pagano, come testimonia l'avvenuto ritrovamento nelle fondazioni di mattoni recanti bollo romano. Alcuni frammenti lapidei scolpiti a motivi geometrici venuti alla luce testimoniano comunque l'esistenza e l'apertura al culto della Pieve già in epoca longobarda, ipotesi che viene avvalorata dalla presenza dei massicci pilastri e delle finestrelle a feritoia presenti in facciata.

L'attuale sistemazione della chiesa andrebbe fatta risalire al XII secolo. Il manufatto risulta caratterizzato da cicli di affreschi che la decorano su di una superficie di ca. 155 mq. databili tra il XIII ed il XV secolo, che interessano le pareti della navata centrale, delle absidi e della Cappella del Battistero, quest'ultima oggetto dell'intervento di recupero statico che si viene ad esporre.

La Pieve era anticamente l'unica chiesa di tutto il distretto ad ospitare la fonte battesimale; verso la metà del '400, per dare opportuno risalto e collocazione al battistero, viene ricavata nell'angolo Nord-Ovest della navata sinistra una cappella, mediante l'iscrizione nella prima campata di una volta a crociera sestoacuta e della relativa parete di spinta, affrescata verso il 1460-70 con un ciclo pittorico raffigurante scene della vita di S. Sebastiano, che Vittorio Sgarbi, in una sua monografia sugli affreschi di S. Pietro di Feletto, definisce "...il vertice della decorazione pittorica della chiesa". Durante i recenti lavori di restauro conservativo che hanno interessato l'intero apparato pittorico ad affresco del monumento, diretti dal prof. G. Dinetto, alcuni macroscopici fenomeni di degrado caratterizzanti specificatamente la Cappella del Battistero, in precedenza attribuiti ad azioni meccaniche esercitate da cristallizzazione di sali solubili, hanno fatto presumere alla committenza possibili implicazioni di ordine strutturale, richiedendo l'intervento di tecnici specialisti.

La cappella di S. Sebastiano si connota, come vedremo, come un piccolo "gioiello" di contenute dimensioni, ca. ml. 4,50 X 5,00, caratterizzato per contro da una notevole complessità, sia per quanto

ottiene gli aspetti tecnologico/costruttivi e decorativi, sia per quanto concerne l' articolata morfologia dello stato di conservazione degli elementi costituenti (struttura e paramenti tonacali) e dei processi di alterazione e degrado, nonché dei comportamenti statici, con particolare riguardo agli esiti fessurativo/deformativi della struttura intervenuti nel tempo.

L'affresco, troppo spesso valutato come elemento decorativo a se stante, di fatto si connota come epidermide di un organismo assai complesso, al quale è intimamente correlato e con il quale intesse imprescindibili e complessi rapporti la cui approfondita conoscenza appare indispensabile ai fini della messa a punto di idonei interventi conservativi.

1.0 - STUDI, RILIEVI, INDAGINI ED ANALISI PRELIMINARI ALL'INTERVENTO

Per tali motivi è stato predisposto preliminarmente un articolato progetto di studi, rilievi, indagini ed analisi della Cappella Battesimale, concordato con la competente Soprintendenza BB.AA.AA. del Veneto, che hanno preso inizio nel febbraio del 1999.

L'analisi **tecnologico-costruttiva**, associata al rilievo **geometrico strumentale** ha consentito in prima istanza la conoscenza dei processi e delle metodologie costruttive, dei materiali impiegati, delle tecniche d'uso. La volta risulta come una sottile membrana, realizzata con mattoni pieni in taglio legati da malta di calce aerea e sabbia, di spessore complessivo variabile intorno ai 16 cm, comprensivo del paramento affrescato. L'estradosso della volta è rivestito da una sottile caldana di spessore variabile, realizzata con un impasto leggero, friabile ma nel complesso abbastanza tenace, composto da sabbia di fiume, frammenti di cocciopesto e pagliuzze lignee, legati da calce aerea con numerosi e grossolani calcinaroli bianchi. Il rapporto inerte/legante è pari a circa 3/1. La leggerezza dell'impasto è in buona parte dovuta proprio alla notevole presenza dei calcinaroli che rappresentano in volume ben il 20-30% dell'intonaco. Estremamente rilevante in questa fase è stata la comprensione dei sistemi costruttivi adottati per la realizzazione della volta, e la sua iscrizione all'interno della navatella sinistra. La struttura in cotto della crociera non risulta resa solidale mediante immorsatura alle murature di spalla che la perimetrano, deputate a contenerne le spinte laterali, trovando con esse solidarietà solamente lungo i piedritti di imposta per lo scarico dei pesi; tale procedimento costruttivo viene d'altronde evidenziato dalla presenza di estese fessurazioni, rilevabili sia sull'intradosso che sull'estradosso, correnti lungo i tratti di interfaccia volta/murature. Proprio l'utilizzo di questa particolare metodologia costruttiva, derivante evidentemente da prassi di cantiere in uso nel periodo, ha probabilmente consentito alla volta di mantenere un certo grado di elasticità che le ha consentito, pur attraverso processi deformativi e fessurativi di una certa entità, di conservarsi nei secoli, sostenendo l'azione del tempo ed in particolare quella degli eventi sismici,

anche di notevole entità, quale il terremoto verificatosi nel 1873, durante il quale diverse strutture della chiesa crollarono.

Peraltro, la realizzazione della volta, ha comportato nelle fasi esecutive dei notevoli problemi di adattamento alla struttura preesistente, come dimostrano le ricorrenti imprecisioni costruttive, riscontrabili in particolare nella sovrapposizione dell'arco acuto della vela sud e la arcata a tutto sesto della navata su cui questo si iscrive.

Nella comprensione dell'attuale e complesso stato conservativo della cappella di S. Sebastiano oltre alla conoscenza delle caratteristiche tecnologico-costruttive e dei processi di degrado, un notevole contributo è stato fornito dall'acquisizione di dati inerenti le sue vicende e trasformazioni attraverso **l'analisi delle fonti storico-archivistiche**. Fra i dati significativi emersi, l'angolo Nord-Ovest della chiesa, su cui insiste la Cappella del Battistero, appare essere stato caratterizzato, sino a tempi relativamente recenti, da dissesti statici interagenti con l'attuale stato conservativo. All'inizio degli anni '90 infatti, la chiesa viene sottoposta a numerosi interventi riguardanti lavori di manutenzione. Documentazioni fotografiche dello stato di fatto eseguite prima dei lavori, certificano in tale periodo la presenza di una fessurazione di notevole entità, interessante la parte muraria prossima al piano di calpestio dell'angolo Nord-Ovest della chiesa, zona su cui insiste la Cappella, definibile come dissesto da rotazione e probabile traslazione orizzontale su connessione ad "L". La fessurazione infatti, ripresa fotograficamente sulla parete Nord, evidenziava un andamento a 45° con cuspidi prossime al piano di calpestio, decorrente ed apertesi sino allo spigolo dell'edificio, dove raggiungeva un'altezza prossima all'imposta del porticato di facciata. L'andamento e le caratteristiche di tale fessurazione, in seguito ricucita durante i lavori, fanno presumere la presenza di un cedimento o ad una traslazione del piano fondazionale, se non fosse che il lungo periodo di insistenza sul luogo del fabbricato faccia sì da ritenere i terreni di fondazione sicuramente caratterizzati da esauriti processi di sovraconsolidamento.

L'evento lesionativo è quindi probabilmente da riferirsi a dissesti dell'edificio o cedimenti del piano sottofondale intervenuti con il verificarsi di eventi sismici, quali il già menzionato terremoto del 1873, che arrecò seri danni e parziali crolli dell'edificio, interessanti anche la copertura della navata centrale.

La identificazione e valutazione di tale evento appare interessante data la attuale presenza di fenomeni lesionativi parietali presenti nel sottotetto, tra i quali particolare rilevanza acquista una lesione posizionata sulla parete Nord, ad andamento verticale in prossimità dello spigolo dell'edificio. Il ripresentarsi, sugli intonaci allora ripristinati, di alcune fessurazioni, visibili sia all'esterno che all'interno della muratura Nord in prossimità dello spigolo ed al di sopra delle finestre che dà luce alla Cappella del Battistero, ha suggerito l'esecuzione di un monitoraggio del

quadro fessurativo finalizzato a verificare l'eventuale protrarsi nel tempo di processi, seppur odiernamente contenuti, di dissesto di tale parte della struttura.

L'analisi dell'aspetto tecnico-costruttivo della volta ha suggerito la formulazione di alcune prime ipotesi ed in particolare la possibilità di precise relazioni tra comportamenti statici e processi di degrado, o meglio tra processi dissesto/deformativi della volta e i macroscopici processi di affrancamento dell'intonaco presenti in alcune aree parietali. L'analisi geometrico/deformativa condotta a livello sia parietale che della voltatura ha consentito infatti di formulare l'ipotesi che le sacche di distacco potessero derivare da processi di schiacciamento della lamina intonacale derivanti da deformazioni differenziali delle porzioni veliche ad essi sovrastanti. Questo avrebbe fornito una spiegazione alla localizzazione dei tratti di rigonfiamento, sempre prossimi al punto di contatto tra vele e pareti di spinta, e preferenzialmente nei tratti prossimi alla chiave di volta, nonché all'entità ed alla morfologia dei fenomeni. Per verificare la correttezza di tale ipotesi si è proceduto con un **rilievo deformativo strumentale** di dettaglio di ciascuna delle arcate sia della volta che parietali, ricostruendo l'andamento dell'arco ideale e rilevando la costante corrispondenza tra deformazioni negative delle vele rispetto ad esso e aree parietali connotate da distacco.

A tali studi è stata associata l'analisi quali-quantitativa dei processi di distacco condotta sulle intere superfici affrescate della cappella, eseguita mediante **indagine termografica I.R.**, che ha consentito una mappatura estremamente dettagliata ed intelleggibile dei fenomeni di distacco dell'intonaco dal supporto murario. Valutazioni altrimenti impercorribili con i tradizionali metodi a percussione, sia perché impraticabili in presenza di superfici affrescate, sia perché ritenuti ampiamente superati visto gli ampi margini lasciati alla discrezionalità e soggettività dell'operatore.

Si è quindi proceduto ad una **analisi fotografica eseguita in luce** radente al fine di evidenziare e definire il rapporto tra deformazioni del paramento e processi di affrancamento dell'intonaco registrati mediante le indagini all'infrarosso.

La redazione dell'**analisi dello stato di degrado** condotta secondo le Raccomandazioni ed il glossario Normal, ha rappresentato pertanto il momento di sintesi dei processi di alterazione e di degrado della Cappella. Gli affreschi della volta a crociera e delle pareti apparivano diffusamente connotati da efflorescenze biancastre, con alterazioni cromatiche del pellicolato, ad andamento preferenzialmente maculoso, che interessavano con particolare intensità le superfici situate in prossimità dell'angolo Nord-Est della cappella.

Il fenomeno infatti era macroscopicamente ed intensamente riscontrabile, in modo diffuso ma non omogeneo, sulla vela Nord e la corrispondente parete finestrata di spalla, nonché sul peduccio

Nord-Est della volta, dove il fenomeno, particolarmente intenso nella parte inferiore, appariva attenuarsi repentinamente all'aumentare dell'altezza.

Tali fenomeni, in passato erroneamente attribuiti ad efflorescenze saline, si sono rivelati in parte correlabili ad alterazioni chimico-fisiche indotte dalla presenza di prodotti secondari derivanti da agenti biologici.

Il fenomeno si è rivelato riconducibile alla presenza di consistenti depositi detritici lungo i tratti estradossali di imposta della volta, rimossi durante l'intervento con attente letture stratigrafiche, caratterizzati da diffusa e consistente presenza di guano di colombi e pipistrelli. Peraltro la chiesa, durante gli anni '80, è stata caratterizzata da infiltrazioni di acqua meteorica che avrebbero particolarmente interessato la Cappella del Battistero e che hanno portato all'esecuzione nei primi anni '90 dei lavori di ripassatura del manto di copertura; processi che hanno consentito la alterazione e veicolazione dei composti organici. A tali osservazioni vanno però associate quelle relative all'esecuzione negli ultimi decenni di interventi manutentori e di restauro finalizzati alla conservazione dei cicli di affreschi; l'esecuzione di tali interventi ha comportato l'utilizzo di metodologie e sostanze in grado di dar luogo, nel tempo, ad alterazioni o produzione di prodotti secondari assimilabili a quelli attualmente riscontrati.

A tali imbianchimenti superficiali si associavano i già citati processi di distacco dell'intonaco dal supporto riscontrati con le indagini all'infrarosso, diffusi e riscontrabili sia sulla volta archiacuta che sulle pareti di spalla; il fenomeno, già rilevato sugli altri cicli di affreschi, acquistava nella Cappella del Battistero particolare intensità. Sulla parete Nord, alla destra della finestra, ed in prossimità della chiave di volta dell'arco sovrastante, i fenomeni di distacco arrivano localmente a sostenuti rigonfiamenti e sollevamenti dell'intonaco con creazione di tasche facilmente rilevabili, dove l'intonaco appariva prossimo a fenomeni di caduta. Processi analoghi si registravano anche sulla parete Ovest.

La complessità degli aspetti legati al quadro fessurativo e deformativo delle superfici hanno richiesto invece una valutazione mirata, attraverso l'approntamento di una apposita **analisi e restituzione del quadro fessurativo** sia intradossale che estradossale che ha messo in evidenza la presenza di un articolato e diffuso quadro fessurativo, la cui analisi evidenzia, in primo luogo, la presenza di estese fessurazioni coincidenti od in prossimità delle principali linee costruttive della volta e degli archi di imposta o delle pareti di spalla, cui si associa una rete fessurativa, correlata alla precedente, che interessa le superfici delle vele e quelle parietali. Tra i fenomeni fessurativi principali vale segnalare :

-fessurazioni attraversanti le chiavi di volta dell'arco a tutto sesto della navata e dell'arco sestoacuto Est di imposta della volta

- fessurazioni che si dipartono dalle chiavi di volta degli archi di imposta della crociera e decorrono lungo le murature di spalla Ovest e Nord,
- fessurazioni decorrenti lungo le linee di contatto tra la volta e le pareti/archi di spalla, che interessano con differenti estensioni i quattro lati della volta
- fessurazioni che collegano le chiavi di volta degli archi di imposta decorrendo lungo le superfici veliche, in particolare la fessurazione che attraversa le vele situate a Nord-Est, collegando le chiavi di volta dei due archi che le impostano
- fessurazioni che si dipartono dagli archi di imposta della volta e decorrono lungo la chiave di volta delle vele (vedi vela Nord e Vela Ovest)

Tali fessurazioni, variamente relazionate e collegate tra loro, costituiscono quindi una rete lesionativa che percorre e collega i principali punti costruttivi della volta, attraversando le chiavi di volta delle vele, il perimetro della crociera, le chiavi di volta degli archi di imposta o le porzioni murarie ad esse corrispondenti sulle murature di spalla.

A queste vanno associate diffuse micro e macrofessurazioni diramantisi da queste od aventi andamento autonomo, interessanti le vele della volte e le pareti; tra queste si segnalano in particolare quelle presenti nella parte superiore della lunetta Nord, che vanno ad interessare l'archivolto sguinciato della finestra. Da segnalare infine come tutti i fenomeni fessurativi registrati appaiono evidenziati dalla presenza, lungo i bordi di frattura, di concentrazioni di efflorescenze biancastre.

Le osservazioni fin qui fatte relativamente ai fenomeni di dissesto e fessurativi hanno consigliato l'approntamento di un'attività di sorveglianza per la verifica dell'assetto dell'opera mediante il **monitoraggio del quadro fessurativo** condotto mediante l'installazione lungo le lesioni più significative dell'estradosso della volta di estensimetri elettrici. Il monitoraggio, protrattosi nell'arco temporale di alcuni mesi, ha consentito di verificare l'attuale assenza di significativi processi di dissesto in atto.

A completamento del ciclo di rilievi ed indagini è stato condotto, con la società Sat Survey, un accurato rilievo tridimensionale mediante l'utilizzo di uno scanner dell'ultima generazione, che mediante nuvole di punti ha consentito di registrare l'attuale situazione deformativa delle pareti e della volta mediante la collocazione nelle tre dimensioni di ciascun loro punto. Il rilievo ha riguardato la restituzione di **fotopiani digitali** della volta e delle pareti, mentre la loro successiva scansione tridimensionale, che ha interessato anche l'estradosso della volta, ha consentito la restituzione della successione di **profili tridimensionali** longitudinali e trasversali della Cappella, pervenendo alla definizione della **modellazione tridimensionale** dell'intero manufatto.

E' oopportuno sottolineare come tali rilievi, oltre che estremamente significativi per i lavori di recupero statico eseguiti, hanno consentito di "congelare" l'attuale quadro deformativo della Cappella, diventando un significativo momento di riferimento; la eventuale nuova esecuzione dei rilievi consentirà infatti, in un qualsiasi momento storico, di verificare eventuali modifiche che dovessero intervenire nell'assetto del manufatto.

Tra gli altri studi condotti sulla Cappella del Battistero merita segnalare **l'analisi delle giornate di lavoro** che ha consentito di verificare la notevole velocità nell'esecuzione del ciclo affrescato e **l'analisi iconografica** che ha evidenziato come l'artefice del ciclo pittorico non si sia strettamente attenuto all'iconografia relativa alla vita di S. Sebastiano riportata nei testi sacri, ma ne abbia tratto, in particolare sulle scene rappresentate sulla parete Nord, una personale interpretazione.

2.0 - L'INTERVENTO DI RECUPERO STATICO

Come abbiamo visto, la Pieve è stata oggetto, prima della stesura del progetto esecutivo, di accurate indagini, volute al fine di disporre di uno spettro di informazioni preliminari completo e utili alla progettazione ed esecuzione di un intervento che consentisse di raggiungere obiettivi di stabilità in campo statico e dinamico coinvolgendo il meno possibile la struttura.

I criteri di progetto vengono di seguito specificati e giustificati in dettaglio, mentre gli elaborati grafici consentono da una parte l'individuazione delle caratteristiche geometriche della volta a crociera gotica della Cappella Battesimale posta nella porzione di testa della navata sinistra della Pieve di San Pietro di Feletto (TV) e dall'altro di intendere la geometria e le caratteristiche tecniche degli interventi da affrontare.

2.1 - ANALISI PRELIMINARI

La necessità di intervenire è frutto delle indagini geometriche e sui materiali, accompagnate da verifiche eseguite sulle caratteristiche delle murature nonché da considerazioni sul loro stato fessurativo ed in particolar modo su quello degli affreschi che decorano la Cappella, i quali, distaccati e spanciati in diverse zone a causa di fenomeni legati a cedimenti più o meno localizzati, sono in grave pericolo di caduta.

Caratteristiche geometriche

La volta a crociera, di origine gotica (vedi tavola n. 1e n. 2), trova sostegno nelle murature perimetrali, di origine romanica, che perimetrano esternamente la Pieve nei lati di Nord e Ovest (vedi foto n.5 e n.6), e nella muratura sorretta da archi a tutto sesto che divide la navata centrale dalla laterale posta a Sud rispetto alla Cappella (vedi foto n.7e n.8). In direzione Est la volta trova sostegno su di un arco ogivale, coevo ad essa, disposto trasversalmente alla navata laterale sinistra (vedi foto n.9 e n.10).

Dalle osservazioni effettuate nell'estradosso della volta, essa sembra non abbia alcun immorsamento nelle murature di perimetro né sull'arco ogivale costruito nello stesso momento (vedi foto n.19 e n.20).

E' stato possibile inoltre rilevare che le caratteristiche dimensionali dell'arco ogivale sono di una muratura a due teste per una larghezza complessiva di cm 26 mentre la volta è costruita con mattoni disposti per fornire uno spessore costante di 16 cm (vedi tavola n. 3).

Analisi dei carichi

Come già accennato la Cappella Battesimale è stata inserita nella Pieve in un secondo momento, in corrispondenza della testa della navata sinistra: questa, secondo lo schema tipico dell'architettura romanica, possiede una copertura tradizionale a falda più bassa della copertura della navata centrale, realizzata con travi in legno appoggiate alla muratura perimetrale e alla muratura che separa le due navate.

L'inserimento della volta a crociera e dell'arco ogivale gotico non ha interferito in alcun modo con la struttura di copertura soprastante e, pertanto, nessun carico escluso il peso proprio, agisce sulla volta (vedi foto n.11, n.12, n.13, n.14), mentre l'arco sostiene anche un muretto di forati che separa il volume sopra la volta dalla navata sinistra (vedi foto n.9).

In occasione delle indagini condotte si è constatato che nel corso degli anni, in concomitanza con vari lavori di ristrutturazione, lo spazio in corrispondenza dei pennacchi della volta è stato utilizzato come deposito di calcinacci, ora completamente rimossi (vedi foto n.15 e n.16), l'analisi dei quali ha evidenziato la presenza di vari strati provenienti da lavorazioni avvenute in tempi diversi su parti murarie differenti.

E' necessario ricordare che l'area geografica dove sorge la Pieve è stata coinvolta da sismi di entità non trascurabile che hanno colpito la zona anche in tempi relativamente recenti: l'ultimo evento molto significativo risale al 1873, quando un violento sisma causò il collasso parziale della parete tra la navata centrale e la navata destra, successivamente ricostruita, sisma che con ogni probabilità ha

concorso a provocare i danni più evidenti presenti oggi nell'angolo che contiene la Cappella Battesimale.

Analisi fessurativa

L'analisi fessurativa eseguita in corrispondenza dell'estradosso della volta, del suo intradosso sulla superficie dell'affresco e sulla muratura perimetrale rivolta a Nord della navata laterale sinistra, ha fornito forse le indicazioni più significative sulle cause e sui meccanismi del dissesto.

Le fessure nell'estradosso sono presenti nelle direttrici che dall'apice della volta si dirigono, lungo gli archivolti, alle imposte dei pennacchi (vedi foto n.16, n.17 e n.18) e lungo l'intero profilo della volta a ridosso delle murature che non possono essere considerate delle fessurazioni, ma l'evidenza della mancanza di connessione tra le murature eseguite in momenti diversi (vedi foto n.19 e n.20).

Nell'intradosso, invece, sono evidenti fessurazioni diffuse, tra le quali le fessure in chiave dell'arco ogivale e dell'arco romanico a tutto sesto (vedi foto n.21 e n.22) dimostrano, con ogni probabilità, la formazione del classico meccanismo di collasso degli archi, dove le cerniere in chiave di volta sviluppano aperture nell'intradosso mentre le cerniere alle reni le consentono all'estradosso.

In particolare considerazione sono da tenere le fessure che presenta la muratura rivolta a Nord, per i motivi che seguono: tale parete è quella che evidenzia lo stato fessurativo più articolato, che coinvolge esternamente la muratura e la parte superiore di una piccola finestra (vedi foto n.5 e n.8) e internamente l'affresco posto nella parete verticale, che si presenta fortemente fessurato e, in qualche piccola area, dissestato, fino a presentare un rigonfiamento molto evidente e pericoloso nella zona di destra.

Si può affermare con una certa sicurezza, che questo rigonfiamento non può essere causato da fenomeni chimici legati a risalita capillare o a formazioni di sali di varia natura presenti nel legante utilizzato, ma è da correlarsi a fenomeni meccanici di schiacciamento dovuti a cedimenti della struttura della volta.

Leggendo con attenzione i rilievi geometri del profilo della volta addossato alla parete in questione (vedi tavola n.4 e n.5), appare evidente che nella zona del rigonfiamento vi è stato un cedimento significativo che ha provocato il progressivo spanciamiento della superficie dell'intonaco affrescato.

Ritornando alle fessure esterne, da informazioni assunte su un intervento di ristrutturazione eseguito circa 10 anni fa, pare che ve ne fossero alcune molto evidenti prima dell'applicazione del nuovo intonaco; oggi queste sono appena visibili anche se, essendo disposte a 45° e attraversando gli angoli della finestra secondo uno schema di deformazione classico, evidenziano una debolezza di questo

angolo del fabbricato, probabilmente indotta dai fenomeni sismici di cui si è detto, debolezza che va affrontata in termini di consolidamento strutturale.

Considerazioni sulla sicurezza strutturale

Ci troviamo di fronte ad una situazione strutturale che presenta delle problematiche diverse e molto significative.

La volta a crociera e l'arco ogivale che la sostiene presentano una caratterizzazione geometrica alquanto debole, con sezioni resistenti assai ridotte e materiali costruttivi legati con malte che, pur se di discreta qualità, sono in opera da qualche centinaio d'anni e hanno subito forti vibrazioni dinamiche dovute a brusche accelerazioni, che possono avere compromesso in termini sensibili la loro funzionalità.

Il quadro fessurativo e deformativo ci confermano il fatto che la Cappella battesimale ha subito e sofferto, nelle sue parti murarie, deformazioni non trascurabili, che mettono in crisi innanzitutto la stabilità dell'affresco e che rischiano di progredire verso situazioni irrimediabili.

Inoltre, le fessure osservate in chiave degli archi, suggeriscono il fatto che lo schema statico attuale sia già quello di arco a tre cerniere e che pertanto non vi siano ulteriori riserve di resistenza nel caso di un nuovo fenomeno sismico.

2.2 - INTERVENTI DI CONSOLIDAMENTO

Le motivazioni esposte consigliano di affrontare un intervento utile a migliorare il comportamento del complesso strutturale costituito da murature portanti-archi-volta, in fase statica ma soprattutto nel caso di sollecitazioni prodotte da forze dinamiche. Per ottenere tali risultati gli interventi che si propongono possono riassumersi come segue.

FASE STATICA: CONSOLIDAMENTO DELLA VOLTA

Al fine di garantire il corretto funzionamento strutturale della volta, è assolutamente necessario che essa non presenti discontinuità o lacune tali da impedire la trasmissione degli sforzi di compressione. Le volte devono la loro stabilità e la loro resistenza al funzionamento a compressione semplice delle membrature, indotto dalla loro stessa forma. Ogni possibile discontinuità nella trasmissione di tali forze di compressione costituisce una debolezza che può comprometterne la stabilità.

Per tale motivo il primo intervento da programmare sarà quello di risarcire accuratamente tutte le fessure presenti all'estradosso, ad eccezione delle fessure tra volta e pareti perimetrali per le quali si è previsto un intervento di tipo diverso, utilizzando malte di calce idraulica pozzolanica ed inerti, totalmente prive di sali.

Per migliorare sensibilmente le caratteristiche complessive di resistenza della volta si prevede un intervento con utilizzo di fibre di carbonio (FRP), realizzando un esoscheletro ottenuto dall'incrocio delle fibre in due direzioni per migliorare le caratteristiche meccaniche complessive della volta (vedi tavola n.6).

E' stata eseguita una verifica, utilizzando il metodo del Mery, sullo stato tensionale della volta, schematizzandola in archi di larghezza unitaria e profilo prossimo alla sezione in prossimità delle murature laterali, costruendo quindi la curva delle pressioni graficamente: i valori tensionali massimi alle reni sono comunque molto contenuti, dell'ordine di 0,4 Kg/cmq sulla superficie dell'affresco, lontani dai limiti di resistenza dei materiali presenti.

E' stata fatta anche una verifica sulla sezione mediana di chiave della volta poiché, in tale posizione, la schematizzazione strutturale può essere quella di due aste rettilinee a cuspide, la cui soluzione è abbastanza agevole. Tale situazione risulta sicuramente la più critica poiché si creano dei momenti flettenti che in alcune posizioni portano in trazione l'affresco, anche se con valori tensionali bassi, prossimi a 0,4 Kg/cmq.

E' da tenere presente che le condizioni dei materiali sono quelle segnalate nei capitoli precedenti e che, in ogni caso, per un manufatto di tale importanza la cautela deve essere massima anche in relazione alle sollecitazioni di tipo dinamico di cui si dirà più avanti.

La realizzazione dell'esoscheletro con fibre larghe 5 cm poste nelle posizioni indicate nella tavola n. 6, fornisce una densità di fibre rispetto alla superficie complessiva della volta pari al 21% circa, più che accettabile a garantire la perfetta traspirabilità dalla muratura: esse sono distribuite in modo tale da rinforzare maggiormente il colmo nelle due direzioni, per i motivi segnalati, e i profili a ridosso delle murature che come sappiamo sono liberi.

In tal modo, dal punto di vista meccanico, consolidando la volta nell'estradosso, non essendo possibile altro intervento, si impedisce la formazione delle due cerniere alle reni: l'analisi delle volte e degli archi rinforzate in questo modo condotta sperimentalmente in laboratorio assicura un miglioramento delle caratteristiche di resistenza, con tale densità di fibre, pari a circa 6-7 volte la resistenza iniziale oltre a un meccanismo di collasso che sfrutta completamente le caratteristiche del funzionamento ad arco.

FASE DINAMICA: COLLEGAMENTO DELLE PARTI MURARIE

Come già anticipato la volta non è vincolata alla muratura che la sorregge con immorsature e probabilmente nemmeno all'arco ogivale di navata.

Sebbene si ritenga che tale caratteristica non sia positiva ai fini della stabilità strutturale della volta, in fase statica ciò non condiziona una stabilità che comunque viene sostanzialmente migliorata dagli interventi già descritti.

Tale mancanza di legame strutturale è, in ogni caso, molto negativa nel caso le sollecitazioni siano di natura sismica, quando le diverse frequenze naturali di vibrazione delle strutture potrebbero provocare martellamenti reciproci che sono da considerare quanto di più dannoso alla stabilità strutturale di ognuna di esse: è risaputo, del resto, che il comportamento scatolare migliora la resistenza delle strutture poiché l'alto grado di iperstaticità fornisce delle riserve di resistenza molto utili.

Per tale motivo gli interventi progettati sono tesi ad aumentare il grado di vincolo tra le varie parti strutturali e a limitare la tendenza a vibrare in maniera indipendente tra le strutture, per mezzo di dispositivi in grado di legarle in modo elastico al fine di evitare i martellamenti di cui si è detto: tale scelta è legata anche all'impossibilità di creare vincoli più rigidi tra parti murarie che devono essere toccate il meno possibile anche per la presenza dell'affresco che costituisce il punto più debole e assieme più prezioso.

La formazione dell'esoscheletro visto nel capitolo precedente, consente già di avere una volta che tende a comportarsi in maniera unitaria oltre che con caratteristiche meccaniche molto migliori; gli interventi già descritti, quindi, sono di per sé stessi molto utili ai fini della resistenza della volta in campo dinamico mentre quelli che si descrivono di seguito sono ad essa finalizzati.

Non si è ritenuto possibile intervenire direttamente sulle connessioni tra volta e muratura poiché le considerazioni fatte sulle dimensioni della volta e sullo stato dell'affresco, pur da consolidare e proteggere prima di ogni intervento strutturale, sono tali da sconsigliare l'applicazione diretta di qualsiasi dispositivo atto a legare, seppur elasticamente, tali parti. Per questo motivo si è scelto di legare solamente le murature che perimetrano la volta con "dispositivi in lega a memoria di forma" (SMAD).

Tali dispositivi sono realizzati in lega NiTi e presentano la caratteristica di garantire deformazioni anche superiori al 10% per tornare alle dimensioni originarie al termine dell'applicazione della forza. Il loro comportamento è schematizzabile in una fase elastica cui segue un plateau tra il 4% e il 10% di deformazione nel quale la forza trasmessa dal dispositivo rimane costante per poi proseguire in un

altro tratto simile alla fase elastica precedente e giungere quindi alla plasticizzazione. E' in tal modo possibile garantire che le parti murarie che perimetrano la volta siano legate elasticamente fornendo un funzionamento scatolare elastico che tende a limitare gli spostamenti relativi di segno opposto, contenendo così anche i temuti fenomeni di martellamento. Si valuta, in base alle grandezze dei pesi in gioco, che il valore della forza cui deve corrispondere il plateau di comportamento dei dispositivi sia valutabile in 5.0 KN e che lo spostamento relativo delle murature legate corrispondente al 10% della deformazione degli stessi sia da considerare pari a 15 mm.

La disposizione dei tiranti in acciaio ai quali verranno collegati tali dispositivi è indicata nella tavola n. 7: non è stato possibile prevedere il collegamento anche dell'arco ogivale in muratura che delimita a Est la volta per gli stessi motivi di stabilità della muratura e dell'affresco già citati, per questo si è optato per un collegamento tra la muratura rivolta a Ovest e le porzioni di muratura rivolta a Nord e Sud prossime alle imposte dell'arco ogivale.

Si ritiene opportuno, inoltre, prevedere un pretensionamento dei dispositivi giungendo al 1% della deformazione prevista con l'applicazione di una forza di trazione di 125 Kg per ognuno: gli ancoraggi alle murature saranno ovviamente calcolati per sopportare il massimo sforzo previsto.

Per completare gli interventi volti ad ottenere una mutua connessione elastica delle varie parti murarie, è necessario prevedere il riempimento dell'apertura esistente tra la volta e le murature perimetrali con resine epossipoliuretatiche o polisulfuriche a formare un giunto tecnico elastico che impedisca quei fenomeni di martellamento così evidentemente nocivi in occasione dei fenomeni sismici.

2.3 - CONCLUSIONI

Ricapitolando, l'intervento proposto si articola, schematicamente, nelle fasi seguenti:

- *risarcimento delle crepe osservate all'estradosso della volta per mezzo di malta di calce idraulica naturale pozzolanica ed inerti, a garanzia del corretto funzionamento a compressione della volta;*
- *formazione di esoscheletro in fibre di carbonio per l'assorbimento dei carichi di trazione e per legare gli elementi di laterizio della volta e conferirle l'omogeneità necessaria a permettere un comportamento assimilabile ad una membrana;*

- *formazione di un vincolo assiale tra le murature che perimetrano la volta, per mezzo di tiranti in acciaio, nelle due direzioni, contenenti dispositivi antisismici in lega a memoria di forma (SMAD) che consentono, per la loro caratteristica di poter subire deformazioni di grande entità senza plasticizzare, di assorbire energia senza restituirla violentemente garantendo così un comportamento congruente al complesso strutturale atto ad evitare fenomeni di martellamento. La loro indipendenza dalla volta evita interferenze i cui effetti potrebbero essere dannosi.*
- *risarcimento della fessura tra la zona centrale della volta e le pareti laterali con resina elastica epossipoliuretana o polisulfurica a formare un giunto tecnico ottenuto per evitare fenomeni di martellamento, in occasione di sollecitazioni sismiche, tra le strutture murarie perimetrali e della volta; tale accorgimento completa il legame non rigido tra la volta e le murature laterali ottenuto con l'inserimento dei dispositivi a memoria di forma.*

Tali soluzioni permettono di ottenere un sensibile miglioramento strutturale in campo statico ed un sostanziale miglioramento in campo dinamico: esse non sono frutto di analisi strutturali computazionali complesse con utilizzo di schematizzazioni ad elementi finiti poiché si ritiene che strutture così articolate forniscano, con questi ausili, soluzioni illusorie senza giungere a conclusioni molto più accurate dello studio di sottostrutture semplici di cui si conoscono i comportamenti.

3.0 FASE ESECUTIVA

La fase esecutiva è, come sempre in casi di questo genere, una seconda fase progettuale, nel corso della quale l'analisi del problema da un punto di vista meramente realizzativo consiglia spesso di affrontare le soluzioni in termini leggermente diversi.

Nel caso in questione gli adattamenti alle esigenze realizzative sono state una vera e propria fase progettuale non meno importante della precedente.

Si è innanzitutto deciso di non realizzare il “giunto tecnico” tra le porzioni perimetrali della volta e le murature poiché osservando attentamente la loro connessione ci si è convinti che non si sarebbe potuto realizzare un vero e proprio giunto elastico con il rischio, tra l'altro, di non riuscire a controllare le resine che, percolando, avrebbero potuto danneggiare gli affreschi sottostanti.

Si è anche deciso di utilizzare nastri in fibra di carbonio di larghezza pari a 10 cm, eliminando una striscia per direzione, al fine di limitare la presenza diretta delle maestranze su porzioni critiche della volta, le cui caratteristiche meccaniche si presentavano assai scadenti in diversi punti.

Comunque, la questione più delicata che si è presentata in fase di esecuzione ed in particolare durante il fissaggio delle piastre metalliche di collegamento dei meccanismi a memoria di forma, è nata in relazione alla consistenza delle murature perimetrali e specialmente a causa della ridotta profondità delle parti esterne del paramento murario a sacco. Tale questione, accompagnata dalla difficoltà di posizionare le piastre in posizioni della muratura tali da garantire carichi soprastanti significativi a causa della geometria della struttura (ciò in particolar modo per i due tiranti centrali dei quattro di collegamento tra le murature della navata e quella perimetrale), ci ha obbligato a posizionare queste piastre in modo non simmetrico, purchè si trovassero sotto le travi del solaio di copertura. Inoltre, solo per questi due tiranti, si è modificata, riducendola a 2.0 KN, la forza di plateau degli SMAD pur mantenendo la stessa deformazione di fine plateau (10%) pari a 15 mm. Anche la forza di pretensionamento, pari all'1% della deformazione, è stata conseguentemente ridotta a 0.5 KN.

Certamente tutte le scelte progettuali descritte avrebbero potuto essere migliori, e le difficoltà ora esposte lo dimostrano, ma i vincoli di vario tipo, economici, artistici, di opportunità etc., con i quali si ha a che fare in ogni situazione di questo genere, costituiscono una parte non trascurabile delle condizioni al contorno.

San Pietro di Feletto, marzo 2001

Arch. Marcello Molteni

Via 2 giugno n. 37

Villorba (TV)

Ing. Davide Beltrame

Via Pasqualigo 91/I

30174 Mestre (VE)