

Un sistema di “cerchiatura interna” per il consolidamento di ciminiere in muratura

Lorenzo Jurina, professore, Politecnico di Milano
Massimo Mazzoleni, libero professionista

Abstract

The presence of many ancient tall industrial chimneys all around the world and the need for a static consolidation, respectful of conservation principles, guided to an analytical study and a diagnosis of this special type of structures. The definition of a new consolidation method came, which uses “internal tensioned rings and radial ties” to eliminate dangerous vertical and horizontal stresses in the masonry, usually due to thermal actions. Details of the method are illustrated.

Premessa

La presenza di numerose testimonianze di edifici industriali dismessi in varie zone d’Italia ed il desiderio di mantenere in vita i segni di un’epoca e di una tecnologia conducono doverosamente a confrontarsi con i problemi della sicurezza.

In particolare, le *ciminiere in muratura* che si alzano talora per decine di metri sopra agli edifici adiacenti di ex-fabbriche e capannoni, spesso aperti al pubblico, costituiscono una presenza inquietante che talora, in un passato anche recente, è stata risolta con il semplice abbattimento della struttura, “per ragioni di sicurezza”.

Il presente lavoro intende analizzare la criticità di tale tipologia strutturale ed i modi per una sua conservazione che sia rispettosa sia della valenza formale che dei requisiti di prudenza a cui i regolamenti si ispirano.

I segni del degrado strutturale

La presenza di una sorprendente *sistematicità* dei quadri fessurativi in ciminiere in muratura risalenti al XIX e XX secolo ha stimolato ad uno studio finalizzato alla comprensione delle cause scatenanti e, di conseguenza, alla definizione di un nuovo sistema di consolidamento.

Il lavoro di analisi ha riguardato in particolare un campione di sei ciminiere ubicate in diverse zone del Nord Italia ed in Sardegna, anche se fenomeni analoghi si presentano in buona parte delle strutture antiche di questo tipo, in un modo, si potrebbe dire, che è *indipendente* dalla particolare geometria e dalla ubicazione geografica.

Questa circostanza ha fatto sorgere l’ipotesi che il dissesto non sia legato alla tipologia formale o alle condizioni di carico derivanti dall’ambiente, ma piuttosto alle gravose condizioni subite durante il periodo di utilizzo ed in particolare ai fenomeni di *stress termico*.

I principali sintomi di degrado riscontrati sono i seguenti:

- A) tutte le ciminiere presentano nella parte sommitale un evidente quadro fessurativo caratterizzato da forte irregolarità, frequente espulsione del materiale e presenza di numerosi rami di fessura;
- B) una metà circa delle ciminiere presentano ampie lesioni nella parte mediana del camino, con andamento verticale e unica direttrice fessurativa;
- C) su tutte le strutture rilevate si osserva una più o meno vistosa curvatura della parte finale.

Sulla scorta di queste osservazioni è stata eseguita una indagine numerica (mediante il codice di calcolo per elementi finiti ABAQUS 8.1) che ha consentito di analizzare gli stati di sollecitazione della struttura sottoposta a differenti condizioni di carico, che comprendono *peso proprio, vento e sollecitazione termica*.

In particolare si sono assunti i seguenti dati alla base del modello:
altezza della ciminiera: 49,88m

diametro esterno / interno alla base: 3,90m / 1,40m
 diametro esterno / interno in sommità: 1,90m / 1,40m
 modulo elastico della muratura: 1500MPa
 coefficiente di dilatazione termica: 5×10^{-6}
 peso specifico: 1900 daN/m^3 ; Peso totale: 572842,54daN
 vento ad andamento lineare in funzione della quota: da 797 Pa a quota +8m,
 a 1473 Pa a quota +49 m.

temperatura interna / esterna:
 linearmente decrescente in altezza da 200° a 100° / esterna $0^\circ,30^\circ$

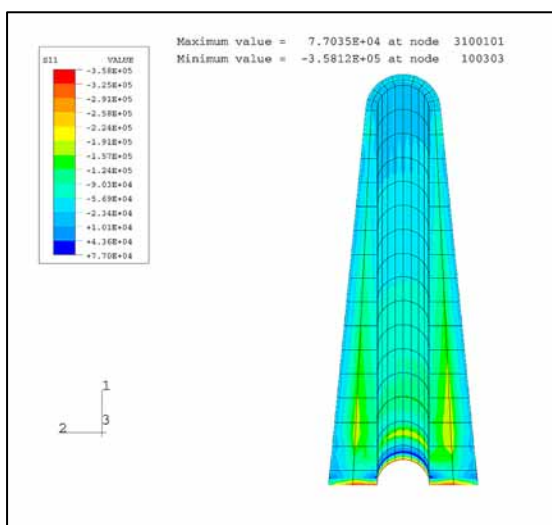
Dapprima indagate separatamente e successivamente combinate in condizioni di carico “globali”, queste azioni hanno consentito di modellare il comportamento della ciminiera nelle due ipotesi di *ciminiera in esercizio* (fessurata e non) e di *ciminiera dimessa*, fessurata.

Senza entrare nei dettagli dell’analisi eseguita si è potuto constatare che:

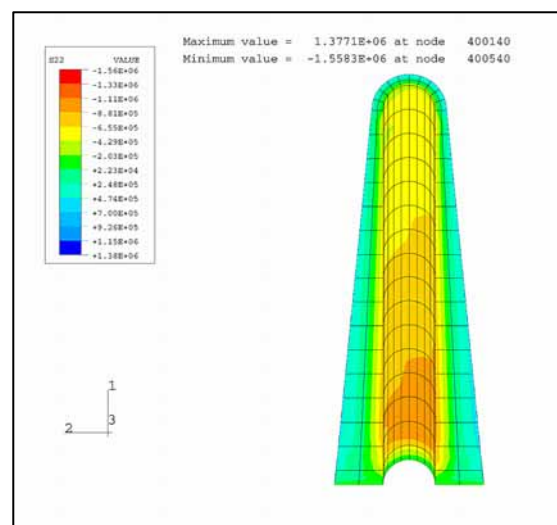
- il **solo peso** proprio non comporta per la struttura particolari problemi, determinando delle sollecitazioni massime verticali di compressione usualmente accettabili per il materiale;
- la componente del **vento** raddoppia approssimativamente il valore della compressione verticale massima alla base della ciminiera, senza arrivare a valori pericolosi, se confrontati con la resistenza della muratura che usualmente è di buona qualità;
- l’introduzione di un **gradiente termico**, caratterizzato da temperature notevolmente alte nella parte più interna della muratura, a contatto con i fumi, e da temperature medie più alte sul lato sud rispetto agli altri fronti esterni, implica invece alcune notevoli conseguenze.

Anzitutto ne nasce uno stato di *sforzo tridimensionale*, non assialsimmetrico, in cui nessuna delle componenti può essere ritenuta trascurabile e che è caratterizzata da *sforzi verticali* di compressione all’interno e di trazione sul paramento esterno; da *sforzi radiali* di compressione (che risultano massimi nella parte centrale dello spessore murario e decrescono spostandosi verso le superfici esterne, fino a raggiungere valori di trazione) e da *sforzi circonferenziali* che partono da valori massimi negativi sulla superficie interna del camino per giungere a valori massimi positivi sul paramento esterno.

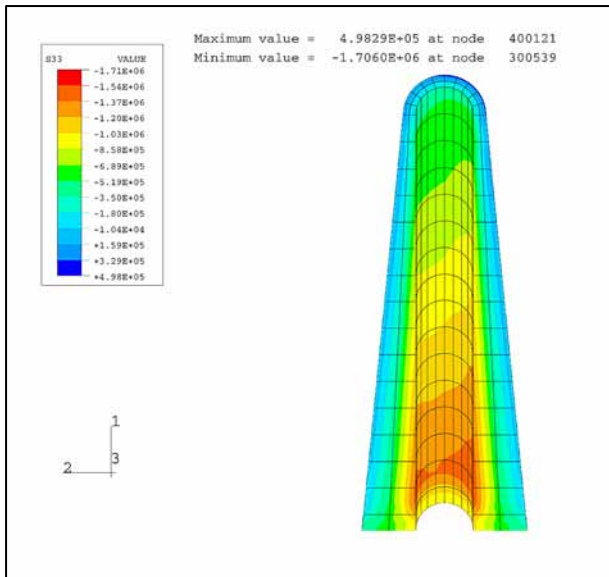
Si nota inoltre che gli sforzi diminuiscono andando verso l’alto per tutte le componenti, con una differenziazione del fronte nord rispetto agli altri lati, mediamente più freddo e quindi più sollecitato dalle differenze di temperatura.



Andamento degli sforzi σ_1 (radiali):
 si evidenziano compressioni nella parte centrale dello spessore murario e trazioni nelle parti più periferiche, più accentuate in sommità



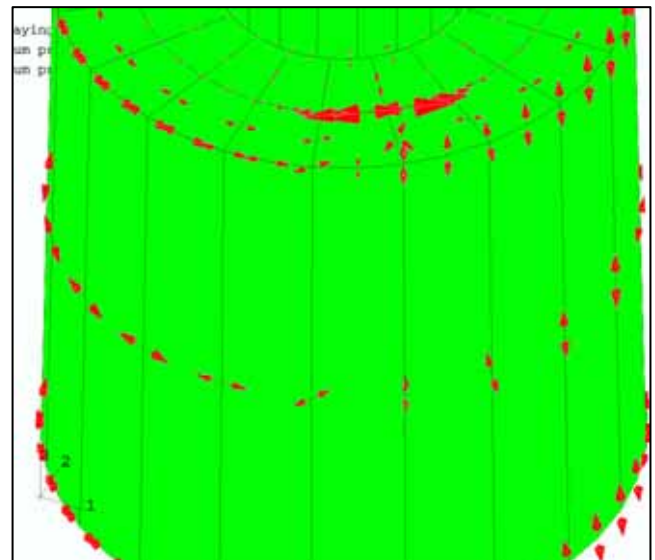
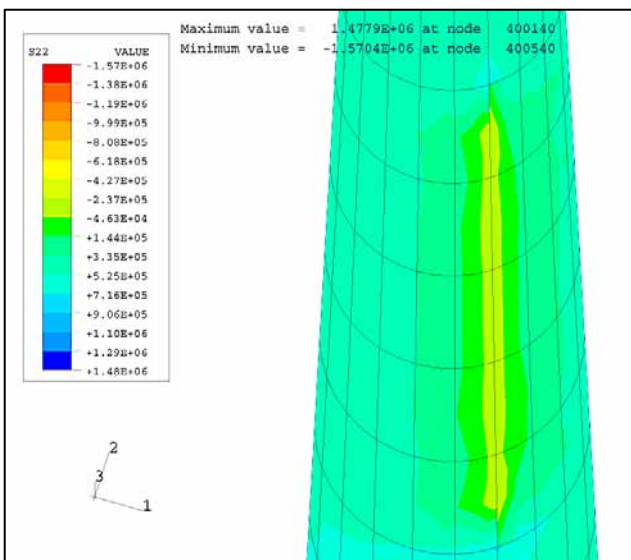
Andamento degli sforzi σ_2 (circonferenziali):
 Gli sforzi circonferenziali cambiano di segno passando dal paramento interno a quello esterno, con un andamento più accentuato sul lato nord, quello più freddo



Andamento degli sforzi σ_3 (verticali):

le forti compressioni interne (più accentuate anche in questo caso a nord) sono derivate dalla differente deformazione dei paramenti interni rispetto a quelli esterni. La parte interna cerca di dilatarsi verticalmente e ne è impedita da quella esterna. Quest'ultima va pertanto in trazione mentre la parte interna va in compressione.

L'inserimento nel modello numerico della lesione verticale mediana, frequentemente rilevata nelle strutture reali, ha inoltre permesso di comprendere come questa costituisca a tutti gli effetti *una forma spontanea di adeguamento* della ciminiera alle gravose sollecitazioni meccaniche derivanti dal campo termico disomogeneo. Si è potuta evidenziare infatti una redistribuzione complessiva degli sforzi caratterizzata da un *drastico decremento* in adiacenza delle fessure e da un incremento concentrato nelle zone di cuspidè delle stesse. Risulta giustificata da questa osservazione la presenza di lesioni molto estese lungo lo spessore della muratura, generate da fenomeni ciclici di propagazione della frattura protratti nel tempo.



Dettaglio della fessura Nod-Ovest, sforzi σ_2 (circonferenziali)

Sforzi principali di trazione in corrispondenza della fessura Nord-Ovest: la discontinuità nella muratura determina una deviazione degli sforzi di trazione che, in prossimità dei cigli, si orientano in senso radiale. Notevole la concentrazione di trazioni all'apice della fessura.

Dagli esiti delle analisi qui sopra brevemente illustrati è stato possibile passare ad una diagnosi, almeno qualitativa, dei principali fenomeni di dissesto statico riscontrati.

A) Lesioni della parte sommitale

L'analisi condotta con il modello agli elementi finiti, in condizioni di esercizio, ha evidenziato nelle zone sommitali la presenza di un regime di sollecitazioni caratterizzato da forti tensioni circonferenziali, da tensioni verticali con trazioni all'esterno del camino, e da tensioni radiali di trazione diffuse su tutto lo spessore.

Questo aspetto, unito alla ciclicità del fenomeno, al ridotto spessore della muratura ed alla maggiore esposizione agli agenti meteorici, ha dato origine ad un processo di graduale deterioramento della muratura, degenerato localmente in fenomeni di fessurazione e disarticolazione del paramento.

L'osservazione dei dissesti nelle parti alte delle ciminiere ha posto infatti in evidenza un esteso degrado con perdita di materiale nei corsi di malta, unito ad una rete di fessure molto articolata.

A differenza delle zone inferiori, il tessuto murario è caratterizzato da una forte scarificazione dei giunti di malta. Le fessure presentano in generale un andamento verticale, ma si scompongono in molte ramificazioni e seguono l'andamento dei giunti di malta interessando solo raramente i mattoni. Accanto alla direttrice principale si dipartono linee di frattura inclinate e talora orizzontali che evidenziano uno scorrimento relativo fra i mattoni.

In alcuni punti inoltre mancano interi blocchi di laterizio, staccatisi e precipitati.

Le particolari caratteristiche di questi fenomeni, che si ripropongono in quasi tutti i casi indagati, trovano una loro interpretazione negli esiti numerici ottenuti.

La ridotta azione verticale di compressione determinata dal peso proprio della struttura non garantisce infatti, nelle parti alte delle ciminiere, un valido contrasto alle sollecitazioni di trazione presenti sul paramento esterno, portando così ad un degrado della muratura soprattutto nelle zone di minor resistenza, rappresentate dai giunti di malta.

Questo processo avviene in maniera graduale e la ciclicità dell'azione termica gioca un ruolo fondamentale sottoponendo il materiale a sollecitazioni alternate.



Ciminiera "Frazzi" di Cremona, dettaglio della lesione nella zona sommitale: la fessura è molto articolata ed interessa prevalentemente i giunti della muratura determinando anche espulsioni di materiale. I corsi di malta risultano molto scarificati.

All'innesco della frattura in un punto di debolezza del paramento fa seguito una redistribuzione degli stati tensionali, con una accentuazione degli sforzi di trazione nelle zone di cuspidè della lesione. Anche partendo da condizioni assialsimmetriche, la simmetria iniziale del fenomeno si perde e ne nasce una fascia critica sul paramento murario, all'interno della quale risulta più probabile la prosecuzione della rottura.

L'andamento delle fessurazioni, che coincide spesso con quello dei giunti di malta, è giustificato dalla presenza della sollecitazione di trazione verticale che determina una forte riduzione della componente di resistenza a taglio per attrito della muratura, consentendo così uno scorrimento relativo fra i mattoni.

Come si vedrà, questo aspetto riassume e giustifica la differenza fra i quadri fessurativi che interessano le zone terminali delle ciminiere e quelli che riguardano invece e parti inferiori.

B) Lesioni della parte mediana

Le lesioni nella parte mediana si caratterizzano per un *andamento più regolare e netto*, basato su un'unica direttrice fessurativa verticale che interessa non solo i giunti di malta, ma anche i mattoni. Osservando ad esempio la grossa fessura Nord-Ovest della ciminiera "Frazzi" di Cremona si può cogliere la differenza rispetto al quadro fessurativo superiore (Nord-Est).

Nel primo caso la frattura, ben definita e abbastanza regolare, divide nettamente il paramento dando luogo a cigli fessurativi a spigolo vivo, nel secondo si assiste ad una sconnessione della muratura più che ad una vera e propria rottura, e l'andamento è molto più irregolare e frammentario.

Queste differenze possono essere valutate alla luce di quanto visto riguardo all'azione termica, che si ritiene essere anche in questo caso la principale delle cause scatenanti il dissesto.

L'analisi eseguita con il codice di calcolo ha evidenziato nella parte mediana della ciminiera la presenza di forti sollecitazioni circonferenziali nella zona esterna con contemporanea presenza di sollecitazioni verticali prossime allo zero, soprattutto nelle zone sotto vento.

È emerso dunque che l'azione circonferenziale di trazione gioca un ruolo determinante nel processo di lesionamento della muratura definendo una direttrice fessurativa verticale. In questo caso, a differenza di ciò che avviene nella parte sommitale, la componente di compressione derivante dal peso proprio determina una netta prevalenza delle trazioni circonferenziali rispetto a quelle verticali, impedendo quel fenomeno prima menzionato di scorrimento relativo fra i mattoni in senso orizzontale.



Ciminiera "Frazzi", dettaglio della lesione nella zona mediana:

si tratta di un fenomeno molto esteso (oltre 17 metri su 49), che si sviluppa su un'unica direttrice fessurativa regolare. Solamente in alcuni punti si rilevano brevi fessure uscenti inclinate. Si noti nella corrispondenza fra i cigli la traslazione relativa orizzontale che indica la presenza di un quadro isostatico orientato secondo il reticolo murario.

A questo si aggiunga la ciclicità dell'azione termica che ha portato negli anni all'alternarsi delle due condizioni di sola compressione verticale (periodi di sosta dell'attività), e di trazione orizzontale e verticale (periodi di funzionamento).

Si può comprendere solo così come sia stato possibile giungere a dei quadri di dissesto tanto gravi in strutture che, escludendo il fattore temperatura, non presentano particolari condizioni di precarietà statica.

C) Curvatura della parte sommitale

Su tutte le strutture analizzate, in diversa misura si sono rilevate *fuori piombo* delle parti sommitali. Si tratta di curvature dell'asse verticale del camino che interessano di solito l'ultimo quarto dell'altezza complessiva.

Le ragioni possono essere ancora una volta ricercate nell'azione ciclica della temperatura.

L'ipotesi è che si sia verificato, per anomalie locali del materiale, un allungamento del paramento esterno in direzione verticale oltre il campo elastico e che questo, accumulando sempre maggiori incrementi plastici con la successione dei cicli, abbia condotto ad una situazione di deformata permanente. In virtù di ciò si giustificerebbe la presenza del fenomeno solo nell'ultima parte del camino, che è quella con minor carico gravitazionale superiore.

Relativamente all'asimmetria del problema invece, non sembra sussistere una vera e propria regola anche se, con frequenza, i quadri fessurativi sono presenti nella zona di estradosso della curvatura.

Un sistema per il consolidamento delle strutture

L'opera di consolidamento statico costituisce il momento conclusivo del lavoro di analisi sulla struttura, e rappresenta la risposta concreta ai problemi emersi. Il compito ad essa affidato è quello di riportare la costruzione a condizioni di sicurezza e fruibilità accettabili.

Un buon intervento deve caratterizzarsi per alcuni importanti aspetti, quali:

- La **durabilità**: legata sia alla qualità dei materiali impiegati che agli accorgimenti rivolti ad una loro congrua protezione;
- La **limitata invasività**: l'intervento deve cercare di sopperire alle carenze statiche della costruzione senza sostituirsi ad essa, stravolgendone la forma o il comportamento strutturale;
- La **verificabilità e manutenibilità**: è importante avere un accesso agevole alle opere di rinforzo al fine di controllarne periodicamente il corretto funzionamento e di eseguirne la manutenzione;
- La **reversibilità**: nel limite del possibile deve essere garantita la possibilità di una rimozione e/o sostituzione degli interventi che non danneggino la struttura.

In quest'ultima parte del lavoro è stato messo a punto una modalità di intervento di consolidamento statico che cerca di sintetizzare da un lato gli esiti delle osservazioni in sito e delle verifiche numeriche condotte, e dall'altro gli aspetti di "filosofia" dell'intervento, accennati poco sopra.

Si tratta di un sistema attivo di "**cerchiatura interna**", vale a dire un sistema di "confinamento" orizzontale della muratura basato sulla posa di anelli in acciaio circolari, disposti nel condotto *all'interno del camino*, secondo un'opportuna spaziatura e solidarizzati alla muratura mediante "**barre radiali**", inserite nella muratura fino quasi a raggiungere il paramento esterno.

L'anello ha un diametro leggermente inferiore a quello del cavedio interno. Ciò consente di mettere in trazione le barre radiali, mediante dadi che contrastano sull'anello, inducendo in questo una *trazione* controllata e, in modo duale, una *compressione* di analoga entità nella muratura. Si riduce così, fino ad eliminarla, la trazione circonferenziale sulla superficie esterna.

Questa valida alternativa al metodo tradizionale, usualmente realizzato con *anelli esterni di cerchiatura*, consente di ottenere alcuni interessanti vantaggi:

1. non è visibile all'esterno, il che permette di mantenere praticamente inalterata l'immagine d'insieme della costruzione.
2. non risulta esposto all'azione degli agenti atmosferici e che quindi è meno soggetto a degrado di tipo chimico - fisico;
3. è accessibile dall'interno senza l'ausilio di alcuna opera provvisoria e quindi agevole da ispezionare e mantenere;
4. presenta un notevole grado di reversibilità;
5. la stessa struttura di rinforzo, come verrà mostrato, può divenire parte integrante di un sistema di risalita che consente il controllo periodico della ciminiera.

La possibilità inoltre di connettere i diversi anelli cerchianti attraverso *tiranti metallici verticali* garantisce un'efficace azione di *precompressione verticale* del camino che può essere regolata in maniera tale da ridurre o compensare le eventuali eccentricità geometriche presenti.

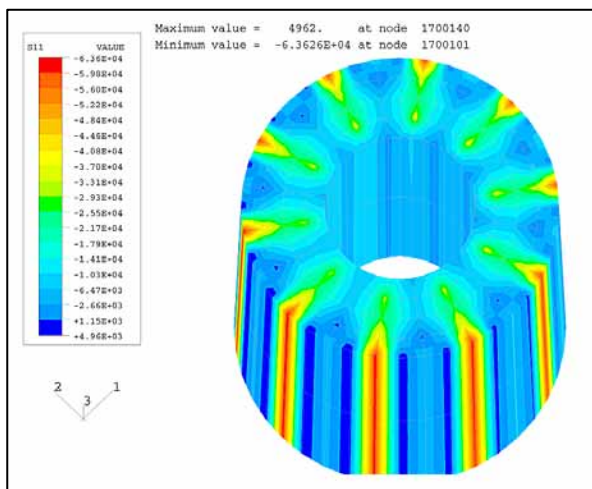
L'analisi quantitativa di questo intervento è stata condotta attraverso l'utilizzo di un modello agli elementi finiti che ha permesso di valutarne l'effettiva efficacia e la sensibilità al variare di diversi parametri di tipo geometrico e tecnologico.

In particolare si è indagata la risposta in termini di sforzo nella muratura in funzione di:

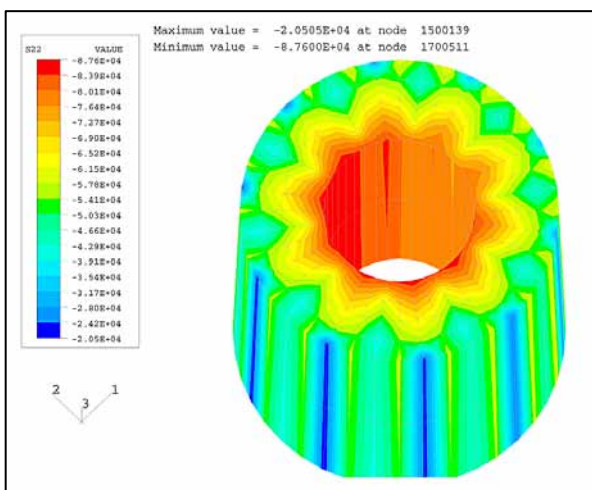
- distanza tra le cerchiature in direzione verticale;
- distanza tra le barre radiali secondo la circonferenza;
- profondità di ancoraggio delle barre nella muratura;
- influenza dell'entità di presollecitazione;
- tipologia di ancoraggio delle barre nella muratura.

Si è potuto così verificare la risposta della muratura in termini di sforzi globali, individuando la

eventuale presenza di dannose “azioni parassite” locali di trazione e taglio.
 Come termine di confronto si è naturalmente analizzata la soluzione tradizionale della ciminiera cerchiata esternamente con anelli presollecitati.



Sforzi radiali σ_1 nella parte mediana del camino: la sollecitazione indotta dalle barre radiali di ancoraggio ha permesso di ottenere quasi ovunque l'annullamento delle trazioni.



Sforzi circonferenziali σ_2 nella parte mediana del camino: le sollecitazioni risultano ovunque di compressione e sono ben distribuite sia sulla superficie interna che su quella esterna. I valori di compressione su quest'ultima sono comparabili con quelli ottenuti con il metodo tradizionale delle cerchiature esterne.

Gli esiti numerici hanno consentito di determinare una configurazione ottimale per il sistema di “cerchiatura interna”, e di verificare una effettiva analogia con le cerchiature esterne in termini di efficacia statica.

Partendo da queste premesse si è dunque puntualizzato il progetto del sistema di rinforzo interno andando a specificare in dettaglio le diverse scelte esecutive.

- *Frequenza verticale degli anelli:* deve essere valutata in relazione alla presenza di anomalie geometriche o alla posizione delle fessure, ma in ogni caso l'interasse non può risultare superiore a due volte lo spessore della muratura.
- *Frequenza orizzontale delle barre radiali:* ogni anello cerchiante dovrà essere fissato alla muratura mediante almeno 10 barre radiali equidistanti.
- *Profondità di inserimento dei tiranti:* dovrà interessare la quasi totalità dello spessore murario.
- *Tipo di ancoraggio delle barre radiali alla muratura:* le barre dovranno essere solidarizzate alla muratura con materiale adesivo solo nella parte terminale, per una lunghezza pari a circa due terzi dello spessore murario. Il terzo interno va lasciato libero di scorrere.
- *Presollecitazione:* ogni barra, dopo la posa in opera, dovrà essere sottoposta ad una presollecitazione di almeno 500 daN.

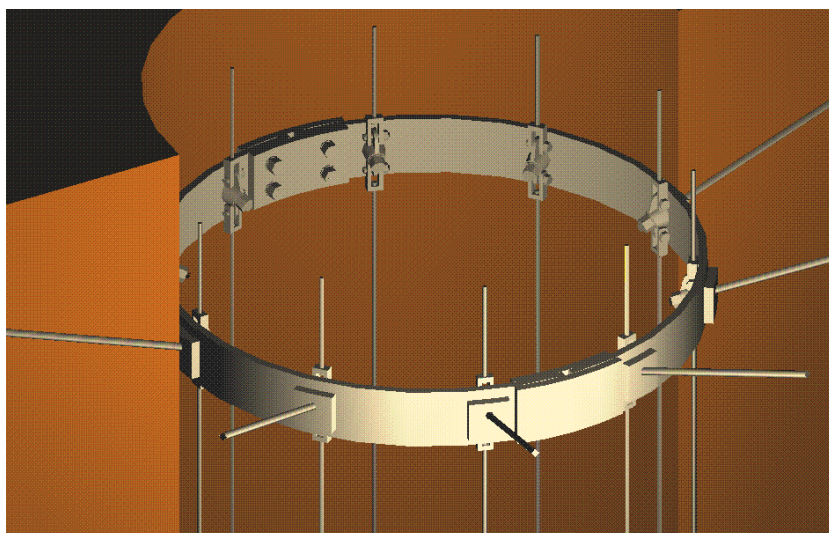
L'utilizzo degli anelli di cerchiatura interna ha come scopo principale quello di generare sulla struttura un'azione di confinamento capace di opporsi agli sforzi di trazione sia in senso radiale che

circonferenziale della ciminiera, e quindi anche all'avanzamento delle gravi lesioni verticali presenti.

Per la parte sommitale della ciminiera è inoltre previsto il collegamento verticale fra gli anelli cerchianti, realizzato attraverso *tiranti verticali* in acciaio posti in pretensione.

Questo garantisce un'azione di compressione sulla muratura anche in senso verticale ciò che risulta molto importante soprattutto laddove sussistano forti sconnessioni del paramento.

La possibilità di agire in modo differenziato sui diversi tiranti permette inoltre, in casi di accentuata curvatura del camino, di esercitare un'azione di precompressione asimmetrica in grado di neutralizzare l'eccentricità dei carichi e di ristabilire quindi un'adeguata condizione di sicurezza, senza alcuna necessità di "raddrizzare" geometricamente il camino stesso.



Dettaglio della cerchiatura dotata di barre radiali di ancoraggio e di tiranti verticali.

Ogni anello di cerchiatura risulta costituito da due elementi semicircolari giuntati con piastre bullonate, e da dieci barre radiali a queste connesse tramite dadi di contrasto.

L'anello ha una sezione rettangolare di approssimativamente 100x10mm, mentre le barre radiali a sezione circolare hanno diametro superiore ai 14mm.

Nella parte sommitale le barre vengono disposte con un'inclinazione rispetto all'orizzontale di 20°, a salire verso l'esterno; ciò consente di fare fronte alle due componenti di pretensione, quella orizzontale indotta dalle barre radiali e quella verticale indotta dai tiranti verticali.

Al fine di garantire l'esplicitarsi dell'azione di confinamento gli anelli circolari devono rimanere staccati dal paramento murario; per questo motivo in corrispondenza delle barre radiali vengono utilizzati dei distanziatori in gomma morbida di spessore minimo 20 mm.

Per quanto concerne l'ancoraggio fra le barre radiali e la muratura viene praticato un carotaggio della muratura mediante sonda a sola rotazione entro il quale viene poi eseguito l'inghisaggio della barra, nella sola parte estrema, con malta idraulica fluidificata a ritiro compensato.

L'intervento di cerchiatura viene esteso a tutta l'altezza della ciminiera, mentre quello di precompressione verticale può essere limitato all'ultimo quarto della ciminiera.

È da sottolineare però che quest'ultimo potrà essere esteso in futuro a tutta la struttura senza grosse difficoltà, inserendo semplicemente gli speciali giunti di connessione dei tiranti verticali alle estremità delle barre radiali.

Grazie alla modularità degli elementi utilizzati per l'intervento è possibile installare una *scala elicoidale* all'interno del camino che viene ancorata agli anelli di cerchiatura secondo lo schema illustrato nell'immagine allegata, e che permette un agevole accesso alla struttura.

Costituita solamente da una piastra metallica a sviluppo elicoidale a sezione rettangolare dotata di perni filettati per il fissaggio dei gradini a sbalzo, la scala garantisce la possibilità di eseguire i lavori di consolidamento senza il montaggio di alcun ponteggio provvisorio interno.

Sul tipo di acciaio da impiegare per la realizzazione degli elementi sopra descritti va sottolineato che l'opzione dell'acciaio inox risulta ottimale per la sua durata praticamente illimitata mentre quella dell'acciaio zincato offre maggiori vantaggi dal punto di vista economico.

Ricordando che l'intervento proposto risulta completamente protetto dall'azione degli agenti atmosferici e comunque facilmente ispezionabile, l'utilizzo dell'acciaio zincato appare economicamente vantaggioso e privo di controindicazioni, a meno che si desideri lasciare aperta in sommità la ciminiera.

Le opere di consolidamento appena descritte devono essere precedute da alcune operazioni preliminari sulla ciminiera.

Sul paramento interno deve essere eseguita una pulitura della superficie interessata dalle incrostazioni. Nelle zone in cui si presenta un degrado dei corsi di malta deve essere eseguita la scarificazione e la successiva ristilatura con malta di calce.

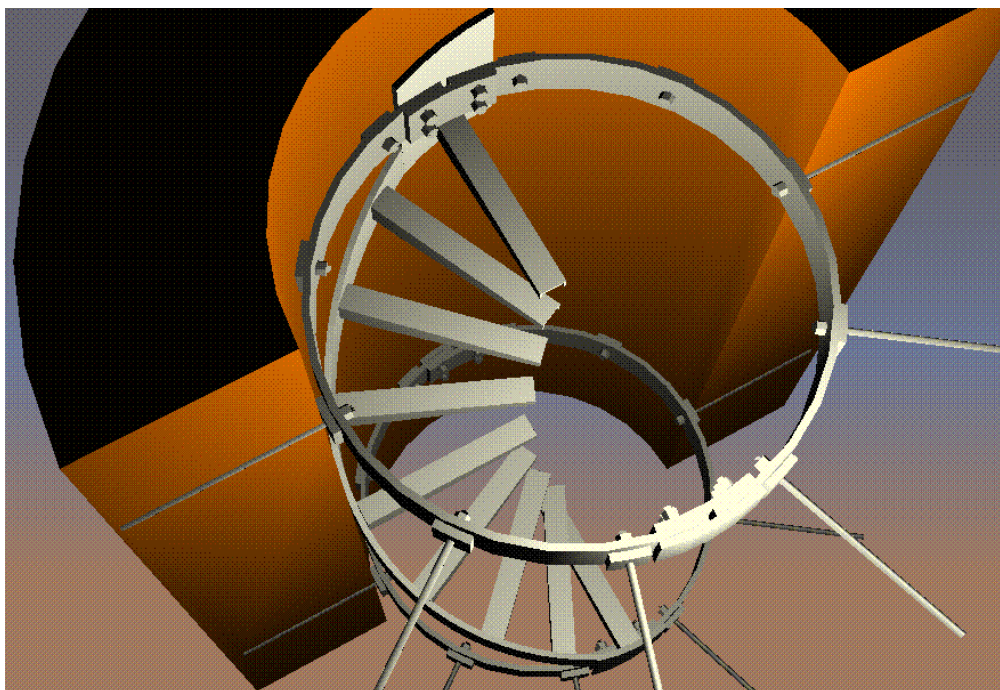
Ove necessario si deve provvedere alla reintegrazione del tessuto murario mediante operazioni di scuci-cuci con le quali gli elementi eccessivamente ammalorati vengono sostituiti con altri integri.

In corrispondenza delle lesioni devono essere eseguite iniezioni a bassa pressione con malta di calce idraulica microfine, priva di sali solubili e a ritiro compensato.

Queste opere hanno lo scopo di rigenerare il tessuto murario e di predisporlo agli interventi di consolidamento sopra descritti.

Al fine di garantire la manutenibilità della struttura nel tempo e agevolarne l'ispezione periodica si deve prevedere l'installazione all'interno del condotto di un impianto di illuminazione.

Da ultimo è consigliabile prevedere la realizzazione di una copertura terminale apribile e di un impianto a protezione dai fulmini.



Dettagli della scala elicoidale, installata all'interno della ciminiera ed ancorata agli anelli di cerchiatura, che permette un agevole accesso alla struttura.

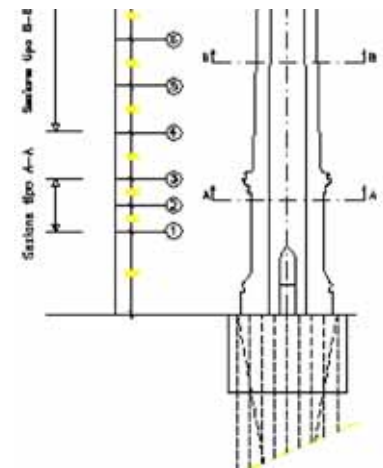
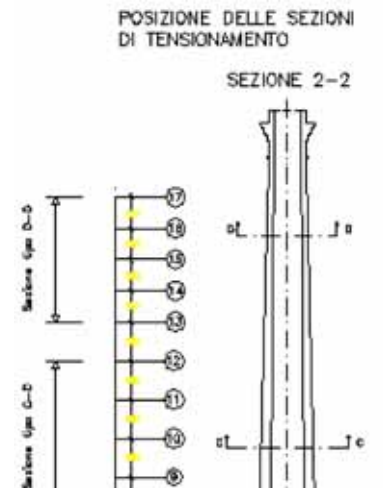
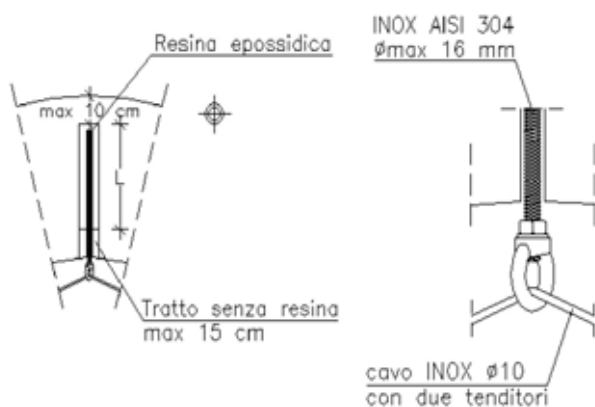
Alcuni esempi di applicazione del sistema

Il sistema illustrato è stato ultimamente approvato dalle commissioni di controllo per il consolidamento statico di una ciminiera in muratura situata nel comune di Selargius, in provincia di Cagliari. Lungo tutto il condotto interno della struttura è stato predisposto un sistema di cerchiature costituito da *cavi in acciaio inox* posti in trazione da tasselli in acciaio inox inghisati alla muratura con resina epossidica, al fine di determinare la richiesta componente di compressione circonferenziale sul paramento murario.

Basato sul medesimo principio degli anelli costituiti da piastre dunque, questo intervento se ne differenzia per semplici aspetti tecnologici che lasciano inalterato l'effetto desiderato: quello di un'efficace azione di confinamento sul paramento murario.

Si riportano di seguito alcune immagini di dettaglio della soluzione adottata con particolare riferimento al sistema di ancoraggio dei tasselli murari.

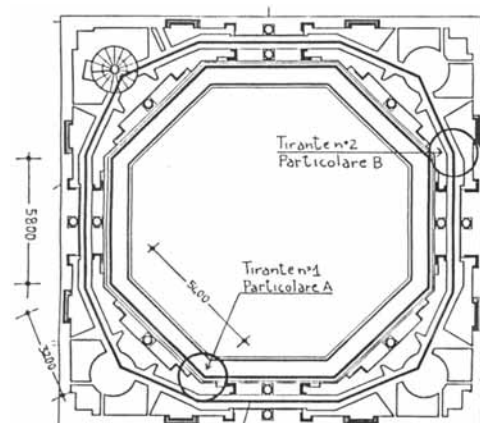
PARTICOLARE A : TASSELLO DI ANCORAGGIO E TIRANTE



Accanto a questa applicazione complessiva del sistema di intervento studiato possono essere menzionati tre ulteriori consolidamenti effettuati recentemente dal primo autore, sfruttando l'effetto confinante garantito da cerchiature interne.

Si tratta del consolidamento delle cupole ottagonali del Santuario della Santa Casa di Loreto a Tresivio (SO), del Mausoleo Trivulzio a Milano e della Chiesa di Marmashen in Armenia.

In questi tre casi la cerchiatura è stata realizzata su un solo livello, posto alla base della cupola stessa, attraverso l'utilizzo di tasselli chimici abbinati a un cavo perimetrale, posti in corrispondenza degli otto spigoli. La tensione del cavo è stata realizzata semplicemente accorciando i tasselli mediante dadi di contrasto.



“Cerchiatura interna ottagonale” del tamburo del Mausoleo Trivulzio a Milano

Considerazioni riassuntive sul sistema proposto

In risposta ai fenomeni di dissesto rilevati su varie ciminiere è stato proposto un intervento di consolidamento statico che si pone quale alternativa alle cerchiature metalliche esterne da sempre utilizzate su questi tipi di strutture. Si tratta di *un'opera completamente interna alla ciminiera* che pur mantenendo una sua netta riconoscibilità, non ostenta la sua presenza e non incide, a differenza delle cerchiature, sull'immagine del manufatto consentendone una piena fruizione.

Basato sul medesimo principio di confinamento trasversale della struttura, introduce in più, rispetto alle cerchiature esterne, la possibilità di determinare una precompressione verticale della muratura, che può anche essere specializzata e resa asimmetrica in funzione di eventuali eccentricità geometriche del camino.

Introducendo infatti dei tiranti verticali fra gli anelli cerchiati interni e agendo in diversa misura su di essi in termini di tesatura, è possibile compensare le curvature che sistematicamente si riscontrano nelle ciminiere quali effetti dei carichi termici di esercizio e ristabilire delle adeguate condizioni di sicurezza.

Nel corso del lavoro sono state condotte delle analisi di tipo parametrico che hanno avuto come fine quello di determinare l'efficacia dell'intervento in relazione alla variazione di alcuni fattori sia di tipo geometrico che tecnologico.

La presenza di una scala elicoidale integrata con gli elementi cerchiati garantisce una agevole ispezionabilità dell'intero manufatto e un costante controllo delle diverse parti di rinforzo. Permette altresì l'installazione e la periodica lettura di strumenti per il monitoraggio statico e per il controllo dei quadri fessurativi.

La totale protezione degli elementi di rinforzo dall'azione degli agenti atmosferici garantisce una lunga durata degli stessi e permette sia l'uso di acciaio inox che di acciaio zincato.

Si tratta in definitiva di un'opera che, oltre a garantire un'effettiva messa in sicurezza delle strutture, ne consente un costante controllo ed una approfondita conoscenza senza per questo comprometterne le peculiarità formali.

Riferimenti bibliografici

- ALI S.S., A.W. PAGE, *Finite element model for masonry subjected to concentrated loads*, *Journal of structural engineering*, Asce, 1988
- CASOLO S., *Analisi per la valutazione della vulnerabilità sismica di torri in muratura di pietrame in ipotesi di comportamento non lineare a rigidità degradante*, (in italian) *Thesis for the degree in Civil Engineering*, University of Udine, a.y. 1991-1992
- CHIOSTRINI S., VIGNOLI A., *In situ determination of the strength properties of masonry walls through destructive shear and compression test*, Binda (ed), 1992
- DHANASEKAR M., PAGE A.W., KLEEMAN P.W., *The elastic properties of brick masonry*, *International Journal of Masonry Construction*, 1982
- FRIDMAN YA. B., *Strength and Deformation in Nonuniform Temperature Fields*, Consultants Bureau, New York, 1964.
- JURINA L. *I tiranti metallici nel consolidamento degli edifici monumentali*, atti del XVI Congresso C.T.A, Ancona ottobre 1997
- JURINA L., *Il consolidamento strutturale della Torre S.Dalmazio a Pavia*, XV Convegno Naz. CTA, Riva del Garda, 1995
- JURINA L., Jadicicco M., *L'acciaio inossidabile nel consolidamento delle strutture*, Convegno "Progettare e costruire con l'acciaio inossidabile", Milano, novembre 2000
- JURINA L., *Il confinamento laterale delle pareti in muratura mediante tiranti inseriti nelle "buche pontate"*, Conv.naz. 2la meccanica delle Murature tra teoria e progetto", Messina, Settembre 1996