

“INNOVATIVE” TECHNIQUES OF STATIC REINFORCEMENT OF MASONRY VAULTS

Massimo Corradi*, Simona G. Lanza **

*Professore, Dipartimento di Scienze per l'Architettura, Università degli Studi di Genova, Stradone di Sant'Agostino 37 – 16123 Genova, tel. 010 2095879, corradi@arch.unige.it

**Architetto, Ph.D., Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo Soprintendenza Belle Arti e Paesaggio della Liguria, via Balbi, 10 - 16126 Genova, tel. 010 2710249, simonagiovanna.lanza@beniculturali.it

Key words: Masonry arch, vaulted structures, static reinforcement

Abstract: The techniques of static reinforcement of masonry are today oriented to the use of new materials such as fiber-reinforced (FRP), enclosing between the new materials also the use of concrete or steel structures. The intervention that we want to present in this brief note is about the reinforcement of the vault of the presbytery of the Church of Nostra Signora Assunta in Rossiglione (Genova). The technique of reinforcement of the vault has privileged the use of materials compatible with the existing ones; because it is a masonry vault is operated by introducing a system of sub-arcs of brick masonry in support of the masonry vault existing, seriously damaged. The masonry vault becomes cooperating with the new masonry arches and the new structural system has the function to cooperate to support the heavy baroque altar; static analysis was performed according to the theory developed by Jacques Heyman in his writings on masonry arches [J. Heyman, *The masonry Arch*. 1982]. The result constitutes a technique that we dare say “innovative” *versus* the current practice of static reinforcement of vaulted structures. This technique of static rehabilitation of existing structures has the feature of being compatible, reversible and non-invasive with the existing structure and in continuity with the existing geometric and static.

Sommario: *Le tecniche di rinforzo statico delle volte in muratura sono oggi orientate all'impiego dei nuovi materiali come ad esempio i fibro-rinforzati, racchiudendo tra i nuovi materiali anche l'impiego di calcestruzzo armato o strutture in acciaio. L'intervento che si vuole presentare in questa breve nota riguarda il consolidamento della volta del presbiterio della Chiesa di Nostra Signora Assunta in Rossiglione (Genova). La tecnica di rinforzo della volta ha privilegiato l'impiego di materiali compatibili con quelli esistenti; poiché si tratta di una volta in muratura, si è operato introducendo un sistema di sotto-archi in muratura di mattoni a sostegno della volta in muratura esistente, seriamente lesionata. La volta esistente diventa collaborante con i nuovi archi in muratura e il nuovo sistema strutturale ha la funzione di collaborare al sostegno del pesante altare barocco; l'analisi statica è stata eseguita seguendo la teoria sviluppata da Jacques Heyman nei suoi scritti sugli archi in muratura [J. Heyman, *The masonry Arch*, 1982]. Il risultato ottenuto configura una tecnica che noi azzardiamo dire “innovativa” rispetto alla pratica corrente di rinforzo statico delle strutture voltate. Questa tecnica di riabilitazione statica di strutture esistenti ha la caratteristica di essere compatibile, reversibile e non invasiva con la struttura esistente e in continuità geometrica e statica con l'esistente.*

Introduzione

Le tecniche di consolidamento delle strutture in muratura e in particolare delle strutture voltate vedono di volta in volta la riproposizione di sistemi costruttivi che privilegiano l'uso del cemento armato, delle strutture di acciaio o in questi ultimi anni dei materiali compositi e FRP (materiali compositi fibrorinforzati). Tutto questo avviene senza mettere in conto il cimento statico delle strutture esistenti ma devolvendo ogni funzione strutturale alle nuove strutture che come protesi svolgono funzioni non più demandate alle strutture originarie. In questo modo, e soprattutto nel caso dell'impiego del cemento armato o dei materiali FRP, la struttura originaria perde ogni funzione statica e rimane – ove ancora visibile – solamente memoria inutilizzata e inutile di un sistema costruttivo che in questo modo diventa obsoleto e passivo, spesso mascherato o addirittura nascosto dalle nuove strutture o dai nuovi materiali.

In questa breve nota, si vuole portare a conoscenza della comunità scientifica una tecnica di intervento per la riabilitazione strutturale di una volta in muratura che - in accordo con la tradizione costruttiva dei sistemi di consolidamento statico delle strutture murarie sviluppata fino all'avvento del cemento armato, introduce come sistema di rinforzo strutturale l'inserimento di strutture murarie compatibili, reversibili, non invasive dal punto di vista materico sul sistema costruttivo originario, e staticamente ed esteticamente coerenti con le strutture originarie trovando una giusta mediazione tra il sistema strutturale originario e le tecniche costruttive che riprendono la tradizione costruttiva delle costruzioni in muratura.

Cenni storici sulla costruzione

L'intervento proposto in questo lavoro riguarda il consolidamento della volta sottostante al presbiterio della chiesa Nostra Signora dell'Assunta a Rossiglione (Genova).

Questa fu edificata, tra la fine del XVI secolo e l'inizio del XVII, su una antica costruzione medioevale di cui rimangono ancora oggi visibili le tracce in un arco a sesto acuto in pietra locale. Già agli inizi del 1600 fu modificata cambiandone la copertura nell'attuale volta a botte mentre nel 1700 furono realizzate le cappelle laterali e tra la fine del 1800 e il primo decennio del Novecento furono realizzati un successivo ampliamento e la costruzione della nuova facciata per opera dell'architetto Marco Aurelio Crotta (1861 – 1909), a seguito dei danni provocati dal forte terremoto del 1887.

L'ubicazione della chiesa in prossimità del torrente Stura è stata la causa di alcune problematiche anche strutturali che hanno coinvolto l'edificio. Infatti, già nel 1911, una frana del muro d'argine causò danni alle fondazioni della nuova facciata e alle murature perimetrali del lato est della chiesa, prospiciente il fiume. Le ripercussioni maggiori e più evidenti si sono avute proprio sulla volta del locale sottostante al presbiterio che è stata opportunamente puntellata circa vent'anni fa mediante un imponente sistema di pali di legno, disposti per tre file parallele alla linea di chiave della volta, posizionati in chiave e alle reni e forzate mediante cunei di legno ad aderire l'intradosso della volta stessa. Inoltre, è stato realizzato un intervento di rinforzo a carico delle fondazioni mediante un sistema di micropali in modo da evitare ulteriori e futuri cedimenti per rotazione delle murature, per effetto di cedimenti fondazionali, che potessero portare al collasso della struttura voltata.



Fig. 1 Chiesa Nostra Signora dell'Assunta a Rossiglione (Genova).

Considerazioni sulle precedenti proposte progettuali

Dalla situazione brevemente descritta nel paragrafo precedente si evince come per la progettazione dell'intervento sull'esistente sia necessaria e fondamentale la fase di conoscenza, architettonica e materiale, costruttiva e storica. Nel caso in esame, purtroppo, questo studio si è protratto per lungo tempo, dovendosi anche scontrare con le esigenze della committenza che richiedeva la possibilità del continuo utilizzo della chiesa.

Pertanto, a partire dal 1999 si è operato eseguendo il rilievo geometrico della volta e lo studio del quadro fessurativo presente anche nella chiesa. La struttura voltata in muratura di mattoni, oggetto del presente lavoro, copre una luce di circa sette metri e presenta una tipologia a botte a sezione policentrica con chiusura del padiglione a tre lunette convergenti in chiave al corpo della volta stessa. Questa, negli anni, è stata oggetto di cedimenti differenziali dovuti a cause non note e presenta un quadro fessurativo preoccupante con lesioni diffuse anche in chiave e trasversali all'asse della volta.

Su queste poche basi conoscitive sono stati proposti i primi progetti di intervento di rinforzo della volta che, basandosi sul presupposto di non poter smontare il pesante altare seicentesco e il pavimento della chiesa, per esigenze della committenza, proponevano di intervenire dall'intradosso della volta. La scelta di realizzare nuove strutture in acciaio, che di fatto sostituivano la volta esistente nella sua funzione statica relegandola a semplice superficie “decorativa”, non rispondeva agli obiettivi di tutela e conservazione dell'esistente. Infatti il mantenimento solo materiale della volta risulta un mero esercizio di pura conservazione non in linea con le finalità di una tutela consapevole del bene rivolta

anche alla sua continua fruizione. Inoltre la proposta di realizzare una fitta serie di portali ad arco a spinta eliminata con catene in ferro, accoppiati ad interasse pari a circa un metro, rendeva di fatto inagibile il locale sottostante.

Si è reso perciò necessario procedere ad uno studio più approfondito della volta sotto il profilo strutturale ma anche sotto il profilo materico e costruttivo. Dal proficuo confronto con la committenza si è potuto procedere allo smontaggio dell'altare (approfittando dell'occasione per il suo restauro) e del pavimento della zona sopra alla volta in oggetto. L'analisi dell'estradosso della volta ha messo in luce l'esistenza di due voltini, in posizione non simmetrica, con probabile funzione di alleggerimento e di un riporto di mattoni posti in foglio, in aderenza alla volta originaria, nella sola parte a botte della volta, con probabile funzione di irrigidimento. Inoltre è stato possibile verificare l'entità delle lesioni che si sono manifestate passanti in alcuni tratti e comunque diffuse.

Infine, anche se con un po' di fatica necessaria a superare le reticenze della committenza, legate soprattutto a fattori economici, è stata eseguita la necessaria analisi mensiocronologica dei mattoni costituenti la volta. Conformemente a quanto conosciuto dalle fonti scritte in merito all'epoca di costruzione della chiesa, si è scoperto che gli elementi laterizi risalgono al periodo compreso tra la fine del XVI secolo e il primo quarto del XVII secolo.

La revisione del progetto che è seguita alla comprensione di tutti questi elementi di conoscenza aggiuntivi si è risolta ancora una volta nella proposta di una nuova struttura in acciaio alla quale invece “appendere” la volta originaria, privandola di ogni funzione strutturale, con inoltre l'aggiunta di una nuova struttura di supporto, in acciaio, per reggere il pesante altare seicentesco del peso di circa 16 tonnellate. Un intervento complesso e anche costoso, complesso e invasivo, e forse non del tutto compatibile con l'esistente.

Partendo dal presupposto teoretico che tra gli obiettivi che si dovrebbe sempre perseguire in un intervento sull'esistente, assumono notevole rilevanza quelli della compatibilità con la struttura esistente e della reversibilità, ma soprattutto quello della conservazione della concezione strutturale esistente, l'intervento proposto aveva sollevato non pochi dubbi di fattibilità nell'Ente preposto alla salvaguardia del bene vincolato. Per perseguire tali obiettivi, come ormai assodato, è necessaria una approfondita conoscenza del manufatto su cui si deve intervenire. Nel caso in esame tale conoscenza è stata acquisita in un lungo periodo di tempo a causa dei desiderata della committenza e delle questioni economiche producendo l'effetto contrario di perdere parecchi anni e probabilmente risorse economiche per l'impegno progettuale.

I progetti brevemente descritti in precedenza, pur potendosi considerare reversibili, non erano né compatibili con la struttura esistente né attenti alla logica strutturale in quanto andavano ad inserire strutture nuove che negavano l'esistente, relegandolo a mero aspetto estetico, e creando nuovi equilibri che avrebbero potuto anche rivelarsi in futuro pericolosi. Tra l'altro, in un caso, prevedendo l'inserimento di travi metalliche per sostenere l'altare, si sarebbe verificata non solo la perdita della funzione statica dei voltini ma anche la loro perdita materiale in quanto questi venivano tagliati dai nuovi elementi metallici.

Pertanto, l'ulteriore e proficuo confronto con la committenza e i professionisti ha condotto alla proposta di intervento qui presentata che ha visto porre in primo piano l'attenta lettura dell'esistente.

L'analisi del quadro fessurativo

La volta esistente è una volta a botte sottile (spessore pari a circa due teste di mattone) a geometria probabilmente semicircolare (ora policentrica per effetto delle sopraggiunte deformazioni) ribassata a 1/5 estradosata parallelamente, probabilmente rinforzata - ma la documentazione storica non ne fa cenno - con un successivo corso di mattoni posti in foglio sull'estradosso della volta stessa e non ammorsati all'esistente per uno spessore complessivo di circa 18÷20 centimetri, legata con malta di calce, che insiste su una pianta rettangolare leggermente irregolare. Inoltre, la volta è delimitata su di un lato da tre lunette dello stesso spessore, convergenti in chiave al corpo principale della volta, e realizzate con la stessa tecnica costruttiva. La volta soggetta all'azione di carichi permanenti considerevoli (l'altare maggiore pesa come detto circa 16 tonnellate) ha denunciato nel tempo, anche per effetto di azioni esterne legate a fenomeni probabilmente anche sismici, un quadro deformativo (con un abbassamento in chiave massimo di 13 cm) e fessurativo importante con la presenza di lesioni diffuse (in chiave e alle reni) all'intradosso e all'estradosso. Tale situazione, come detto, ha consigliato alla fine degli anni novanta del XX secolo la messa in opera di un complesso sistema di puntellamento per garantire l'uso del presbiterio e la continuità delle funzioni religiose all'interno della chiesa. Il sistema di puntelli doveva inoltre garantire un adeguato sostegno al “pesante” altare seicentesco (1691).



Fig. 2 Lesioni sulla volta.

Il sistema di consolidamento e riabilitazione strutturale della volta esistente

Il criterio che è stato utilizzato in sede di intervento di consolidamento statico ha privilegiato un intervento di rinforzo strutturale al fine di garantire la messa in sicurezza delle strutture della volta sottostante il presbiterio attraverso il completamento delle lacune murarie, la ‘sutura’ delle lesioni ivi esistenti, la messa in opera di strutture di rinforzo della volta stessa, la messa in opera di un solaio leggero in acciaio zincato, a sostegno del sovrastante piano di calpestio. Tali interventi, fondati sui principi di reversibilità e compatibilità con la struttura esistente, hanno privilegiato la de-costruzione e ricostruzione di eventuali parti dell’apparecchio murario lesionato, nelle porzioni compromesse dal punto di vista statico, secondo canoni costruttivi coerenti con l’esistente, l’impiego di materiali compatibili, reversibili e non invasivi, apparecchi murari di consolidamento coerenti con quelli esistenti, utilizzando gli stessi elementi laterizi e/o lapidei e il rifacimento delle malte di allettamento della muratura con malte di calce; la messa in opera di presidi statici per prevenire eventuali dissesti per azioni esterne (in particolare l’azione sismica) mediante catene di ferro, con piastre di ancoraggio, chiavarde e/o bolzoni a salvaguardia degli elementi murari in precarie condizioni di equilibrio statico; il rinforzo della volta stessa realizzato con archi murari all’intradosso della volta, aventi la stessa geometria, poggianti su pilastri in muratura laterizia con malta di calce; la messa in opera di un solaio di acciaio zincato a traliccio, semplicemente appoggiato alle strutture esistenti, e a un sistema di ‘muricci’ realizzati in corrispondenza dei nuovi archi murari di sostegno per sostenere le sovrastanti strutture orizzontali; un solaio a traliccio di acciaio zincato messo in opera per mezzo di bullonature che garantiscono un suo eventuale smontaggio, ove ritenuto necessario. Tali interventi sono stati progettati per garantire la salvaguardia del bene nel tempo e realizzati secondo le norme del buon costruire, la consapevolezza dell’antico costruttore e le regole dell’arte, privilegiando in questo modo la sicurezza in sede di esercizio, la durata e la reversibilità dei nuovi interventi strutturali che comunque non devono essere invasivi e generare stati di sollecitazione in grado di aumentare il cimento statico delle strutture esistenti, in conformità al comportamento meccanico e resistente delle strutture come riscontrato nelle analisi svolte in sede di progettazione dell’intervento di consolidamento.

La tecnica di rinforzo della volta ha previsto l’impiego di materiali compatibili con quelli esistenti; in particolare si è provveduto alla ricucitura delle lesioni con malta di calce iniettata in pressione, al completamento delle lacune murarie con gli stessi materiali recuperati in loco o con materiali similari che garantiscono lo stesso comportamento strutturale. Per aumentare la capacità portante della volta in muratura esistente si è operato invece introducendo un sistema di quattro sotto-archi, in muratura di mattoni, a sostegno della volta in muratura esistente. Tali archi sono stati posti a interassi costanti e pari a 1,20 m, due dei quali in corrispondenza della posizione dell’altare seicentesco; la volta è stata collegata alle nuove strutture ad arco mediante un riempimento in mattoni e malta di calce e poi messa in forza con cunei di legno in modo da formare un sistema strutturale collaborante in grado di sostenere il pesante altare. Al fine del dimensionamento delle nuove strutture è stata svolta un’analisi statica che riprende la teoria sviluppata da Jacques Heyman (1925 -) nei suoi scritti sugli archi in muratura [Heyman 1982; 1995] e in seguito sviluppata, tra gli altri, da Corradi *et alii* [Corradi, Foce, Sinopoli 1997].



Fig. 3 Archi murari: sistema strutturale collaborante e di sostegno della volta esistente.

Il sistema di archi murari in numero di quattro è costituito da archi in muratura larghi 25 cm e a tre teste di spessore pari a 38 cm disposti su pilastri in muratura, aventi le stesse dimensioni; alla sommità dei pilastri sono stati posti dei

conci di imposta in materiale lapideo, calcari compatti, con geometria assegnata, e dotati di tirante in acciaio ancorato ai supporti lapidei di appoggio degli archi con piastre di ancoraggio bullonate agli stessi nei quali sono state inserite le catene in ferro in modo da realizzare una struttura a spinta eliminata e non gravare quindi sulle pareti perimetrali di sostegno della volta esistente. I carichi verticali così ottenuti sono trasmessi in fondazione, a suo tempo realizzata, in un intervento precedente a questo, con una struttura a trave rovescia in cemento armato su micropali. Gli archi semicircolari estradosati parallelamente riprendono la geometria della volta e hanno una luce di 6,10 m con una monta di 1,25 m e ribassamento a 1/5; il raggio di estradosso (R) è pari a 4,72 m, quello di intradosso (r) è pari a 4,34 m e il rapporto $K = R/r$ è pari a $K = 1,09$. Gli archi hanno geometria regolare e per garantire una continuità di appoggio della sovrastante volta a botte sono stati sovra caricati da una muratura in mattoni pieni messa in forza con la volta esistente per mezzo di cunei di legno forte ben stagionato, al fine di evitare fenomeni di abbassamento della struttura esistente all'atto della messa in opera della pavimentazione sovrastante e dell'altare.

Il calcolo della struttura ha previsto l'analisi del comportamento globale delle strutture murarie attraverso l'uso di idonei software di calcolo: si è eseguita una analisi dell'azione sismica e del comportamento resistente delle nuove strutture murarie ad arco, si è analizzata la possibilità di formazione di meccanismi di collasso per effetto dell'azione combinata dei carichi verticali e di quelli orizzontali, si è proceduto alle verifiche di resistenza e stabilità del sistema costruttivo costituito dalle nuove strutture ad arco e dalla volta esistente collaborante.

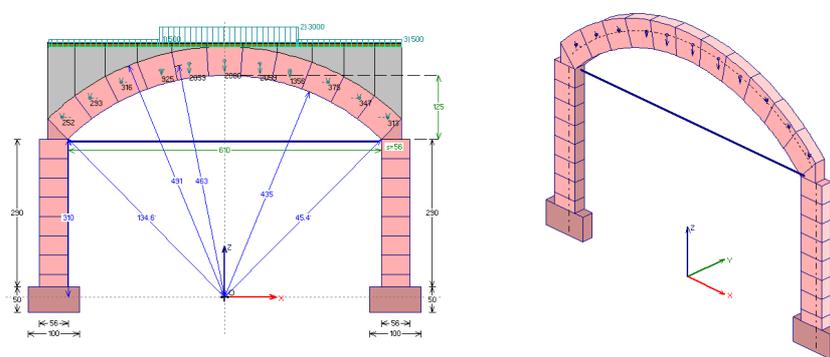


Fig. 4 Geometria del modello di calcolo.

Per quanto riguarda le verifiche locali sulla volta in muratura si è proceduto all'esame del comportamento strutturale in presenza e in assenza di ammassatura delle murature trasversali per mezzo di programmi di calcolo, utilizzati anche per le verifiche di resistenza delle nuove strutture ad arco in muratura. Nel caso in questione, in ottemperanza al recente D.P.C.M. del 9 febbraio 2011 “Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008” (GU n. 47 del 26-2-2011 - Suppl. Ordinario n.54) e in accordo con il D.M. del 14 gennaio 2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” (N.T.C.) e la relativa Circolare applicativa del 2 febbraio 2009 n. 617, si è eseguita l'analisi del comportamento strutturale della volta esistente attraverso lo sviluppo di modelli locali estesi all'intera struttura significativa dal punto di vista del comportamento resistente e dell'eventuale comportamento a collasso, e si è preso atto che la struttura esistente non è più in grado di svolgere il suo compito strutturale se non con l'ausilio di interventi locali di rinforzo.

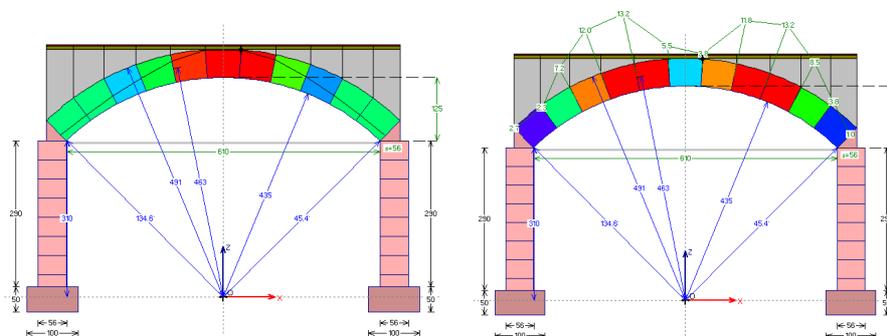


Fig. 5 Curva delle pressioni e angoli di scorrimento.

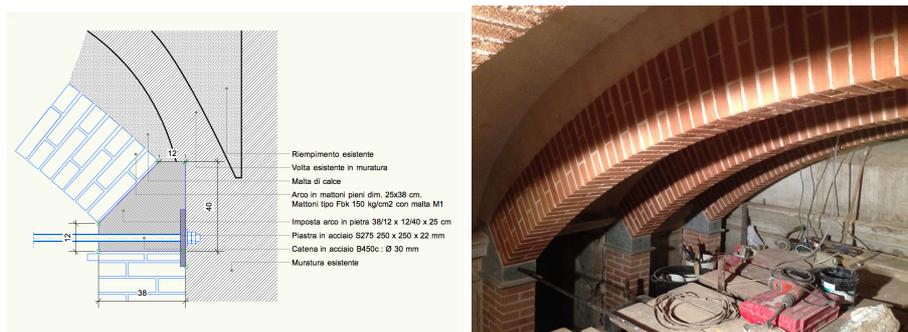


Fig. 9 Schema dell'ancoraggio delle catene.

Conclusioni

Il risultato ottenuto, per così dire “innovativo”, è quello di avere ottenuto una nuova struttura, collaborante con quella esistente dal punto di vista strutturale e compatibile per materiali e geometria. Inoltre, si sono conseguiti altri importanti risultati quali un sicuro minor impegno finanziario, una riduzione dei tempi di esecuzione e ultimo ma non ultimo la riacquisizione della fruibilità del locale sottostante al presbiterio.

L'*escursus* svolto nell'analisi dei progetti che sono stati prodotti, lungi da esprimere giudizi in merito ai professionisti che li hanno redatti, è stato solo uno spunto di riflessione in merito alla fondamentale necessità della conoscenza per un confronto con l'esistente scevro da formalismi “artistico-culturali” e/o scientifici e rigide formulazioni matematiche, che avrebbero sicuramente ‘segnato’ l'immagine e la sostanza dell'architettura e delle strutture esistenti. Infatti, l'esigenza di sostenere un altare del peso di circa sedici tonnellate, oltre i carichi previsti per legge, non può e non deve essere l'alibi per “perdere” un bene esistente.

References

1. Alessandra Cabella e Simone Repetto (a cura di), *Rossiglione. Il patrimonio storico artistico. Storia, arte, restauri*. Ed. Erredi Grafiche Editoriali, Genova, 2009
2. Jaques Heyman, *The masonry Arch*. Chichester, Ellis Horwood, 1982
3. Jaques Heyman, *The stone skeleton*. Cambridge University Press, 1995
4. Massimo Corradi, Federico Foce, Anna Sinopoli, Modern Formulation for Preelastic Theories on Masonry Arches. *Journal of Engineering Mechanics* 03/1997; 123(3), 204-213.