



Mitigazione della vulnerabilità sismica mediante la tecnica dell'isolamento: il caso studio della stazione Cosenza Vaglio Lise

Mitigation of seismic vulnerability through the isolation technique: the case study of the Cosenza Vaglio Lise station

Andrea VECCHI ^(*)

Francesco IODICE ^(*)

Feliciano PROPATO ^(*)

Leonardo CIAMPICHETTI ^(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.0708.2025.ART.1>)

Sommario - L'entrata in vigore dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei ministri n. 3274/03 [1] ha normato, per la prima volta in Italia, l'applicazione dei dispositivi di isolamento sismico, permettendo di fatto ai progettisti l'utilizzo dei suddetti sistemi di protezione sismica passiva, senza dover incorrere nel complesso iter procedurale che si concludeva con il parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. I principi introdotti dall'Ordinanza vengono recepiti come prescrizioni a seguito del terremoto che ha colpito il territorio aquilano, con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008 [2] e l'abrogazione definitiva delle norme approvate con il Decreto Ministeriale 09/01/1996 [3]. Gli eventi appena rappresentati hanno permesso nell'ultimo decennio la diffusione dei sistemi di isolamento sul territorio nazionale sia con riferimento alle strutture di nuova realizzazione che agli interventi di retrofit delle strutture esistenti, oggetto del presente studio.

1. Introduzione

L'isolamento sismico agisce attraverso l'incremento del periodo fondamentale di vibrazione di un sistema strutturale allo scopo di abbattere significativamente le accelerazioni a cui la struttura è sottoposta all'occorrenza di un sisma e mediante un'ulteriore riduzione delle suddette accelerazioni qualora i dispositivi abbiano anche capacità dissipativa. Rispetto ad un intervento di rinforzo di tipo tradizionale, in linea generale i vantaggi che si ottengono sono essenzialmente tre:

- 1) la ridotta domanda sismica consente alla sovrastruttura, ovvero quella parte di struttura posta al di sopra dei dispositivi d'isolamento, di rimanere sostanzialmente in campo elastico in seguito ad un evento sismico di

Summary - The entry into force of the Ordinance of the President of the Council of Ministers no. 3274/03 [1], for the first time in Italy, regulated the application of seismic isolation devices, allowing designers to use the aforementioned passive seismic protection systems, without having to go through the complex procedural process that ended with the opinion of the Higher Council of Public Works. The principles introduced by the Ordinance are transposed as requirements following the earthquake that struck the territory of L'Aquila, with the entry into force of the Technical Standards for Construction of 2008 [2] and the definitive repeal of the rules approved by Ministerial Decree 09/01/1996 [3]. The events just represented have allowed the spread of isolation systems throughout the country over the last decade, both with reference to newly built structures and to the retrofitting of existing structures that are the subject of this study.

1. Introduction

Seismic isolation acts by increasing the fundamental period of vibration of a structural system in order to significantly reduce the accelerations to which the structure is subjected in the event of an earthquake and by further reducing the aforementioned accelerations if the devices also have dissipative capacity. In general, the advantages obtained are essentially three compared to a traditional type of reinforcement intervention:

- 1) the reduced seismic demand allows the superstructure, or that part of the structure placed above the isolation devices, to remain substantially in the elastic field following a seismic event of intensity close to the maximum design intensity, or for severe earthquakes with low probability of occurrence;

^(*) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Ponti e Strutture, Roma.

^(*) RFI (Rete Ferroviaria Italiana) Bridges and Structures, Rome.

intensità prossima a quella massima di progetto, ovvero per terremoti severi con bassa probabilità di accadimento;

- 2) per terremoti più frequenti, ma di minore intensità, la sovrastruttura si comporta quasi come un corpo rigido in cui la deformabilità è concentrata tutta nei dispositivi di isolamento, con una significativa riduzione degli spostamenti di interpiano e di conseguenza della probabilità di danneggiamento delle apparecchiature sensibili. Tale aspetto è di essenziale importanza ai fini del mantenimento delle funzionalità dell'organismo edilizio post-terremoto;
- 3) il basso impatto dell'intervento sulla sovrastruttura limita l'interruzione delle attività anche durante la fase transitoria di realizzazione dei lavori.

Nel presente articolo, gli aspetti innanzi rappresentati mettono in evidenza l'efficacia dell'isolamento sismico applicato ad un caso reale di retrofit di un aggregato edilizio composto da più unità strutturali: trattasi, nello specifico, della stazione ferroviaria della città di Cosenza, posta al km 65+880 della linea ferroviaria Sibari – Cosenza (Fig. 1).

2. Stato di fatto

Il complesso oggetto del presente studio è costituito da cinque unità strutturalmente indipendenti, grazie alla presenza di opportuni giunti sismici (Fig. 2), ma caratterizzate dagli stessi schemi statici e dal medesimo sistema costruttivo.

Il progetto esecutivo risale al periodo tra il 1971 ed il 1972 ed è stato elaborato dagli architetti S. Rossi e C. TROPEA, con la consulenza strutturale dello studio dell'Ing. P. L. NERVI. I lavori di costruzione vennero completati nel 1978 e l'entrata in servizio avvenne nel 1987. Vale la pena sottolineare che l'opera in oggetto non rientra nelle usuali tipologie costruttive adottate per gli edifici in conglomerato cementizio armato dell'epoca, in ragione delle molteplici peculiarità che si avrà modo di sottolineare nel seguito.

Lo stato di fatto del fabbricato è stato ricostruito a partire dalla documentazione progettuale e dai risultati di una campagna di indagini e prove strutturali e geotecniche volta a migliorare la conoscenza dell'opera.

Ciascuna unità è costituita da una maglia di pilastri in c.a. a sezione cruciforme con angoli smussati aventi interasse di 10 m in entrambe le direzioni principali, collegati da travi rettangolari anch'esse in c.a. a formare telai quasi sempre spaziali (telai sismo-resistenti in entrambe le direzioni).

Si sottolinea come i pilastri non rastremano in altezza e, in corrispon-

- 2) *for more frequent, but less intense earthquakes, the superstructure behaves almost like a rigid body in which deformability is all concentrated in the isolation devices, with a significant reduction in inter-storey displacements and consequently in the probability of damage to sensitive equipment. This aspect is of essential importance in order to maintain the functions of the post-earthquake building system;*
- 3) *the low impact of the intervention on the superstructure limits the interruption of activities even during the transitional phase of construction work.*

In this article, the above aspects highlight the effectiveness of seismic isolation applied to a real case of retrofitting a building complex composed of several structural units. In this specific case, it is the railway station of the city of Cosenza, located at km 65+880 of the Sibari – Cosenza railway line (Fig.1).

2. State of facts

The complex object of this study consists of five structurally independent units, thanks to the presence of appropriate seismic joints (Fig. 2), but characterised by the same static diagrams and the same construction system.

The executive project dates back to the period between 1971 and 1972 and was drawn up by the architects S. Rossi and C. TROPEA, with the structural consultation of Eng. P. L. NERVI. The construction works were completed in 1978, and service began in 1987. It is worth noting that the work in question does not fall within the usual construction types adopted for reinforced concrete buildings of the time, due to the many peculiarities that will be highlighted below.

The actual condition of the building has been reconstructed from the design documentation and the results of a campaign of structural and geotechnical investigations and tests aimed at improving knowledge of the work.

Each unit consists of a mesh of cross-shaped section reinforced concrete pillars with chamfered corners with



Figura 1 – Stazione ferroviaria di RFI della città di Cosenza – Immagine aerea.

Figure 1 – RFI railway station in the city of Cosenza – Aerial picture.

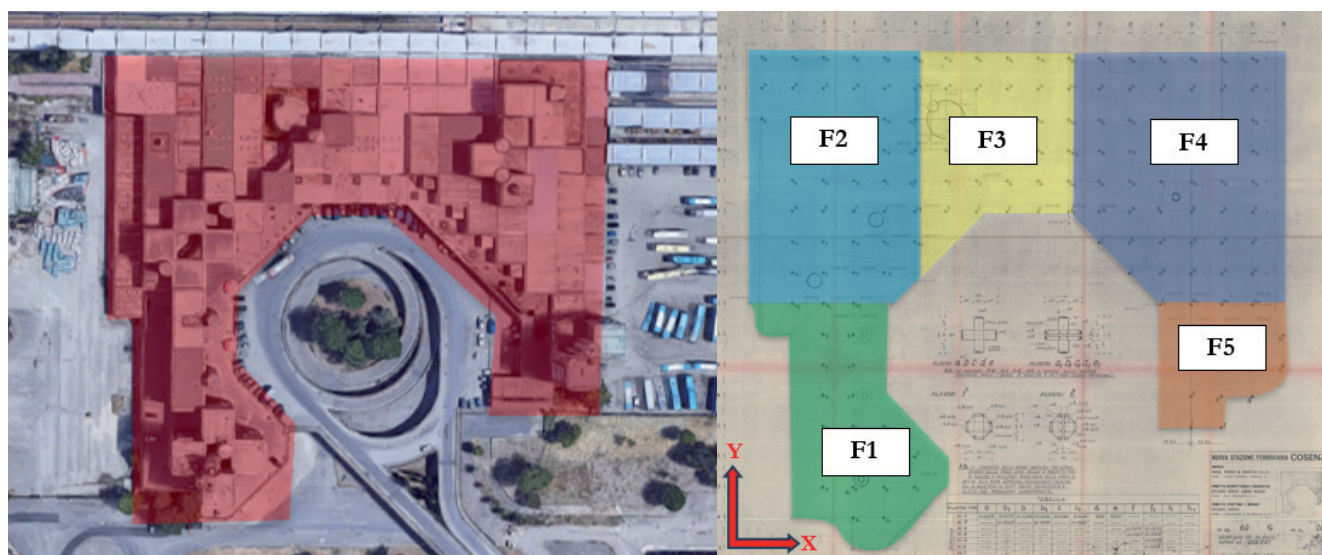


Figura 2 – Vista dall’alto con evidenza dell’opera (sinistra) e distinzione delle unità strutturali che la compongono (destra).
 Figure 2 – Top view with evidence of the work (left) and distinction of the structural units that compose it (right).

denza dei giunti, la sezione cruciforme è suddivisa a metà dando luogo a due elementi più “deboli” aventi sezione a T; le travi hanno una larghezza costante di 30 cm ed altezza variabile da 130 cm al primo impalcato fino a 105 cm ai livelli superiori; la larghezza si dimezza in corrispondenza dei giunti, come avviene per i pilastri.

Tutti i corpi presentano delle peculiarità strutturali tali da essere classificati come edifici fortemente irregolari sia in pianta che in elevazione. A tal proposito, anche senza ripercorrere la classificazione fornita dalle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 (NTC18 nel seguito) [4], basti pensare ai vari torrioni sopraelevati, ai piani pilotis, alla presenza di nuclei in c.a. in posizione eccentrica e all’esistenza di elementi “in falso” su impalcati intermedi.

3. Isolamento sismico dell’opera

3.1. Idea progettuale

L’esito della verifica di vulnerabilità sismica evidenzia l’insufficienza dell’opera in termini di resistenza e duttilità in fase sismica nonché, tra le maggiori criticità, il martellamento strutturale tra i corpi adiacenti in caso di sisma severo, che imporrebbe il ricorso ad interventi molto invasivi al fine di irrigidire sensibilmente il sistema strutturale.

Da queste premesse nasce l’idea progettuale in questione, che prevede il collegamento di tutti i corpi di fabbrica in corrispondenza del piano da isolare, attraverso la realizzazione di uno “zatterone di fondazione sopraelevato” dotato di elevata rigidità nel proprio piano. Inserendo al di sotto di tale elemento dei dispositivi molto più deformabili lateralmente rispetto al sistema strutturale esistente, si otterrà che ciascuna sovrastruttura, sebbene indipendente, tenderà a muoversi rigidamente e in fase con le altre, in quanto la dinamica del moto sarà influenzata principalmente dalla

a distance of 10 m in both main directions, connected by rectangular beams also made of reinforced concrete, to form almost always spatial frames (earthquake-resistant frames in both directions).

It should be noted that the pillars do not taper in height and, at the joints, the cross-shaped section is divided in half giving rise to two “weaker” elements with a T-section; the beams have a constant width of 30 cm and a variable height of 130 cm at the first deck up to 105 cm at the upper levels; the width is halved at the joints, as is the case for the pillars.

All the bodies have structural peculiarities such as to be classified as highly irregular buildings both in plan and in elevation. In this regard, even without retracing the classification provided by the 2018 Technical Standards for Construction (NTC18 below) [4], just think of the various raised towers, the stilt floors, the presence of reinforced concrete cores in an eccentric position and the existence of “false” elements on intermediate decks.

3. Seismic isolation of the work

3.1. Design idea

The outcome of the verification of seismic vulnerability highlights the insufficiency of the work in terms of resistance and ductility in the seismic phase as well as, among the major critical issues, the structural hammering between adjacent bodies in the event of a severe earthquake, which would require the use of very invasive interventions in order to significantly stiffen the structural system.

The project idea in question arises from these premises, which envisages the connection of all the buildings in correspondence with the floor to be isolated, through the creation of a “raised foundation raft” with high rigidity in its own floor. By introducing much more laterally deformable devic-

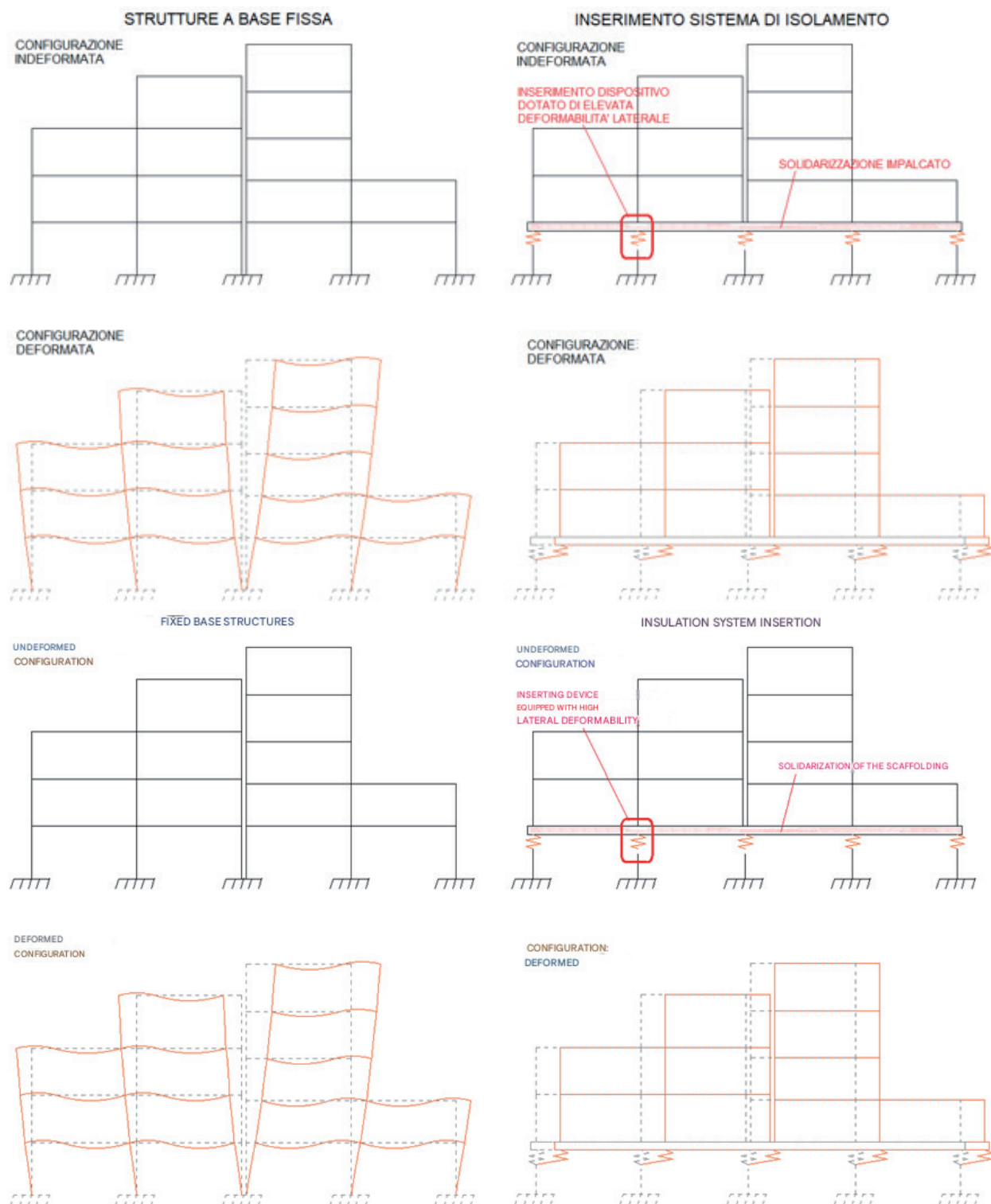


Figura 3 – Schematizzazione dell'idea progettuale alla base dell'intervento.

Figure 3 – Schematisation of the design idea underlying the intervention.

deformabilità dei dispositivi di isolamento. Lo schema rappresentato in Fig. 3 chiarisce ulteriormente l'idea progettuale appena descritta: a sinistra si mostra una deformata qualitativa di due strutture indipendenti a base fissa sogget-

es below this element than the existing structural system, will result in each superstructure, although independent, tending to move rigidly and in phase with the others, as the dynamics of the motion will be mainly influenced by the

te alle azioni orizzontali in corrispondenza degli orizzontamenti, mentre a destra si rappresenta il tipo di deformata che ci si attende a seguito dell'inserimento degli isolatori sismici al di sotto di un impalcato reso solidale.

3.2. Dispositivi di isolamento

A partire dall'intradosso delle travi appartenenti all'impalcato di calpestio del piano terra, si realizza il taglio nei pilastri per l'inserimento di isolatori a scorrimento a doppia superficie curva, di seguito denominati "friction pendulum". Il dimensionamento, che sarà dettagliato in seguito, porta all'adozione di n.5 tipologie ad attrito minimo (immagine a sinistra di Fig. 4) più la tipologia denominata a "basso attrito" (immagine a destra), la cui funzione è simile a quella delle slitte nei sistemi accoppiati quando si utilizzano gli isolatori elastomerici. La scelta della tipologia di isolatore è essenzialmente legata ad aspetti di natura economica, alla capacità ricentrante dei dispositivi e alla caratteristica di avere un periodo proprio di vibrazione indipendente dalla massa gravante su di essi, cosicché il centro delle rigidità risulta sempre coincidente con quello delle masse.

Per consentire il corretto posizionamento dei dispositivi, è prevista la realizzazione di un doppio baggiolo: quello inferiore è solidarizzato alla sommità del pilastro "tagliato", mentre superiormente la solidarizzazione avviene alle travi dell'impalcato.

L'interfaccia di isolamento è posta a quote diverse in corrispondenza dei collegamenti verticali, vale a dire nuclei ascensori e rampe scale, il cui "taglio" avviene appena al di sopra del sistema fondale in modo da non interromperne la continuità ed al tempo stesso garantire i requisiti minimi

deformabilità dei dispositivi di isolamento. The diagram shown in Fig. 3 further clarifies the design idea just described: on the left is a qualitative deformation of two independent fixed base structures subject to horizontal actions at the horizontal alignment, while on the right is the type of deformation expected following the introduction of the seismic isolators below an integrated platform.

3.2. Isolating equipment

Starting from the lower surface of the beams belonging to the ground floor walkway, the pillars are cut for the introduction of double curved surface sliding isolators, hereinafter referred to as "friction pendulum". The dimensioning, which will be detailed later, leads to the adoption of 5 types of minimum friction (picture on the left of Fig. 4) plus the type called "low friction" picture on the right), whose function is similar to that of the slides in coupled systems when using elastomeric isolators. The choice of the type of isolator is essentially linked to economic aspects, the recentring capacity of the devices and the characteristic of having a period of vibration independent of the mass weighing on them, so that the centre of stiffness always coincides with that of the masses.

A double support is provided to allow the correct positioning of the devices: the lower one is integrated at the top of the "cut" pillar, while the upper one is integrated in the deck beams.

The isolation interface is placed at different heights at the vertical connections, i.e. elevator points and stair ramps, whose "cutting" takes place just above the bottom system so as not to interrupt its continuity and at the same time

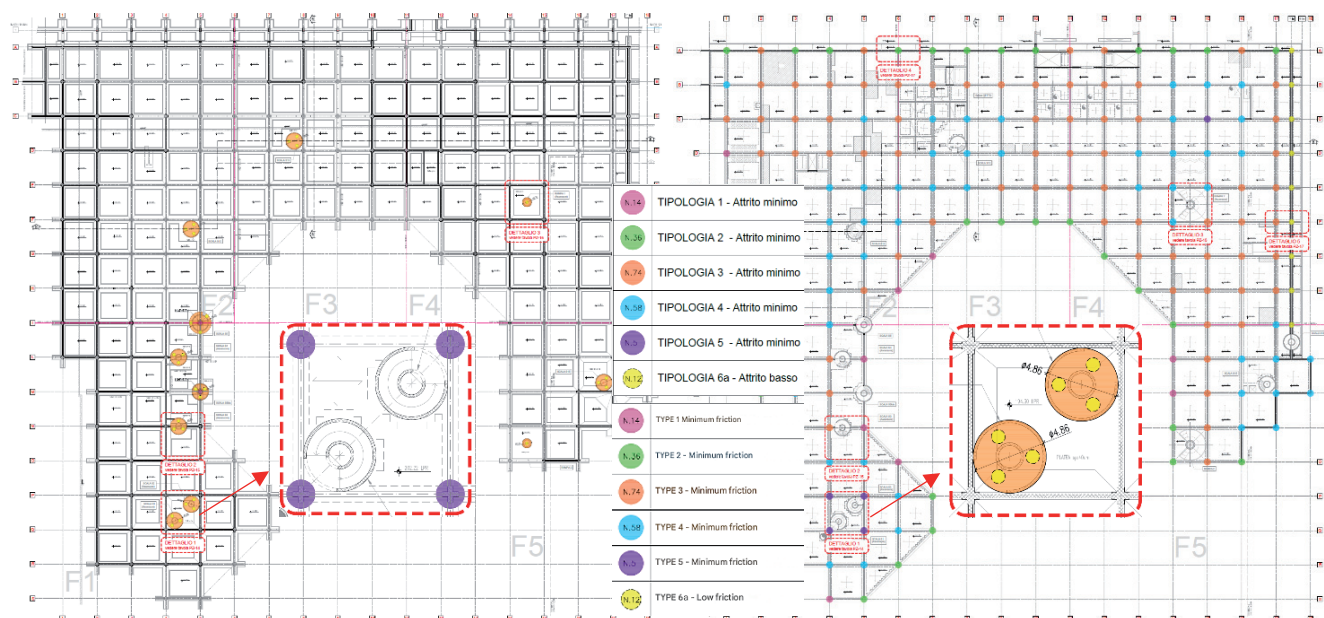


Figura 4 – Stralcio dell'elaborato grafico di progetto: disposizione in pianta dei "friction pendulum" al di sotto del piano isolato (sinistra) e a livello fondazionale (destra)

Figure 4 – Extract from the design graphic: layout of the "friction pendulum" below the isolated floor (left) and at the foundation level (right).

richiesti dalla fossa ascensore per l'ispezionabilità nella fase manutentiva. L'intervento prevede lato nucleo la realizzazione di una nuova soletta di intradosso, lato fondazione l'inserimento di un baggiolo in c.a.; tra questi due nuovi elementi, secondo quanto rappresentato in Fig. 4, immagine a destra, vengono inseriti i dispositivi a "basso attrito" in numero di tre per nucleo. La soluzione che prevedeva un unico dispositivo in asse ai nuclei è stata scartata in quanto avrebbe comportato spostamenti verticali eccessivi nelle zone estremali del nucleo stesso, dovuti alla rotazione flessionale della soletta e al diametro dell'elemento.

3.3. Solidarizzazione e rinforzi

La riuscita dell'intervento di retrofit richiede necessariamente che il primo impalcato da isolare debba essere reso solidale in corrispondenza dei giunti tecnici. A tale scopo si è prevista l'"unione" delle travi emergenti 15x130 cm mediante un'incamiciatura in c.a. ad "U" dello spessore di 7.5 cm, all'interno della quale sono previste, oltre alle barre longitudinali di intradosso, i ferri di parete, l'armatura trasversale e gli spinotti di ancoraggio, secondo quanto rappresentato nel dettaglio in alto di Fig. 5.

È essenziale che la sottostruttura resti in campo elastico anche per eventi di progetto riferiti allo stato limite di collasso (SLC nel seguito) ed al contempo abbia una rigidità laterale tale da soddisfare i requisiti di norma in assenza della realizzazione di un ulteriore orizzontamento. È previsto, allo scopo, un intervento diffuso su tutti i pilastri al di sotto del sistema di isolamento; l'intervento prevede, in coerenza con quanto già indicato per le travi di impalcato in corrispondenza del giunto, l'incamiciatura in c.a. di 7.5 cm per lato, all'interno della quale si predispone armatura longitudinale $\phi 20$ con passo 15 cm ed armatura trasversale $\phi 10$ (barre piegate a mo di staffe) inghisata nel calcestruzzo esistente.

Lo stesso intervento vale anche per i pilastri in corrispondenza dei giunti, con la differenza che in tal caso le armature trasversali sono passanti all'interno dei due elementi affiancati, in modo da pervenire alla solidarizzazione degli stessi. I dettagli degli interventi appena descritti sono mostrati nell'immagine in basso di Fig. 5.

4. Metodi di analisi e definizione degli accelerogrammi

Al fine di riprodurre in maniera accurata la risposta strutturale, si è deciso di adottare il più complesso metodo di analisi previsto dalle NTC, ovvero l'analisi dinamica non lineare, che permette di studiare il comportamento della struttura, istante per istante, durante l'evento sismico di progetto. Parallelamente, sono state eseguite analisi dinamiche lineari con spettro di risposta come strumento di controllo, data la complessità del metodo impiegato e le indicazioni esplicite delle NTC18 in merito ad un confronto dei risultati in termini di tagliante alla base.

guarantee the minimum requirements needed by the elevator pit for inspection purposes in the maintenance phase. On the core side, the intervention involves the construction of a new intrados slab, on the foundation side the introduction of a reinforced concrete support; between these two new elements, three "low friction" devices are introduced per core according to what is represented in Fig. 4, image on the right. The solution that provided for a single device in axis to the cores was discarded as it would have involved excessive vertical displacements in the end areas of the core itself, due to the bending rotation of the slab and the diameter of the element.

3.3. Joints and reinforcements

The success of the retrofit intervention necessarily requires that the first deck to be isolated must be made integral at the technical joints. For this purpose, the "joining" of the 15x130 cm emerging beams was provided by means of a 7.5 cm thick "U-shaped" reinforced concrete casing, inside which, in addition to the longitudinal intrados bars, the wall bars, the transverse reinforcement and the anchoring pins are provided, as shown in detail in Fig. 5 above.

It is essential that the substructure remains in the elastic field also for design events related to the limit state of collapse (SLC below) and at the same time has a lateral stiffness such as to meet the requirements of the rule in the absence of the implementation of a further horizontal alignment. For this purpose, a widespread intervention is provided on all the pillars below the isolation system; the intervention envisages, in line with what is already indicated for the deck beams at the joint, the 7.5 cm reinforced concrete casing per side, within which a $\phi 20$ longitudinal reinforcement with 15 cm pitch and $\phi 10$ transverse reinforcement (bars bent as brackets) grouted in the existing concrete is provided.

The same intervention also applies to the pillars at the joints, with the difference that in this case the transverse reinforcements are passing inside the two side by side elements, in order to make the same integral. The details of the interventions just described are shown in the picture at the bottom of Fig. 5.

4. Methods of analysis and definition of accelerograms

In order to accurately reproduce the structural response, it was decided to adopt the most complex analysis method provided for by the NTCs, namely non-linear dynamic analysis, which allows the behaviour of the structure to be studied, moment by moment, during the design earthquake. At the same time, linear dynamic analyses were performed with a response spectrum as a control tool, given the complexity of the method used and the explicit indications of the NTC18s regarding a comparison of the results in terms of base shear.

In compliance with the requirements of the legislation, the Local Seismic Response study shows that 7 natural ac-

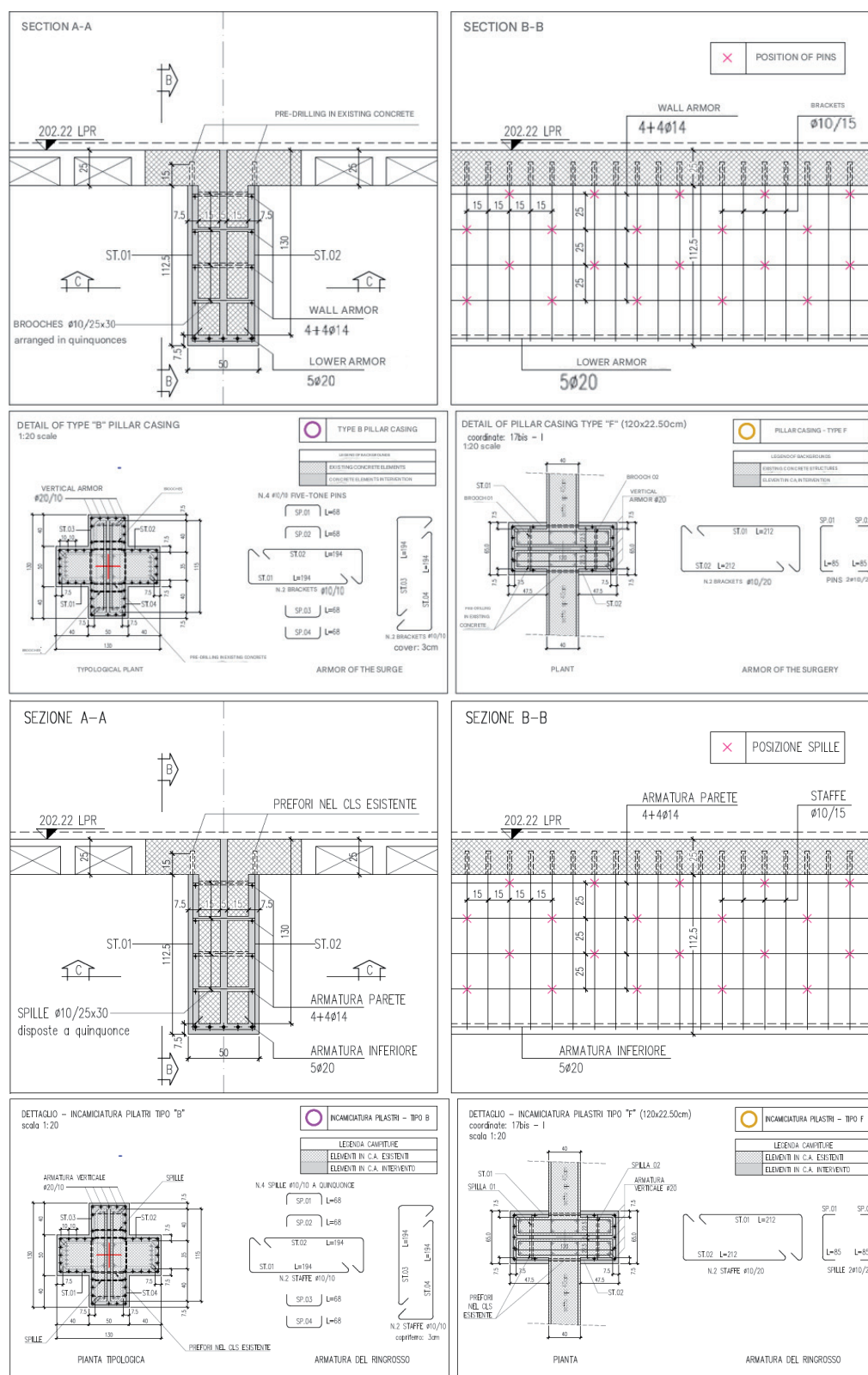


Figura 5 – Stralcio elaborato grafico di progetto. Dettaglio di intervento: in alto su travi giuntate dell'impalcato isolato e in basso su due pilastri adiacenti il giunto tecnico.

Figure 5 – Design graphic excerpt. Detail of intervention: at the top on jointed beams of the isolated deck and at the bottom on two pillars adjacent to the technical joint.

Nel rispetto delle prescrizioni della normativa, dallo studio di Risposta Sismica Locale emerge che sono stati generati n.7 accelerogrammi naturali con l'ausilio del software REXEL a partire da un'analisi di disaggregazione. La procedura permette di trovare i segnali significativi in ragione della magnitudo di situ e della distanza epicentrale, scalandoli opportunamente in modo da garantire la spettro-compatibilità, nel range di periodi $0.1 \div 2.0$ s, con la pericolosità sismica di base del sito di interesse. Nel dettaglio, tale compatibilità è verificata con lo spettro di risposta elastico (coefficiente di smorzamento viscoso equivalente α del 5%), in modo che lo scarto della media delle ordinate spettrali dei singoli segnali amplificati risulti essere al di sopra del 10% (limite inferiore) ed al di sotto del 30% (limite superiore), in tutto l'intervallo dei periodi propri sopra menzionato. Successivamente, i segnali accelerometrici al "bedrock" sono amplificati mediante la procedura iterativa basata sull'ipotesi di modello mono-dimensionale del terreno a comportamento visco-elastico lineare, in condizioni di campo libero e convertiti, mediante trasformata di Fourier, in spettri di risposta. I risultati sono sintetizzati in Fig. 6, dove TH_i rappresenta il segnale spettrale i -esimo convertito a seguito della procedura di amplificazione, SLV_Mean è la media, SLV_NORM lo spettro normalizzato a quello di norma, quest'ultimo indicato con $SLV_NTC2018$.

5. Modellazione strutturale

5.1. Modello Ante Operam

Il modello di calcolo è stato sviluppato mediante il software per il calcolo strutturale SAP2000 (Fig. 7). Di

celerograms were generated with the help of REXEL software based on a disaggregation analysis. The procedure allows finding the significant signals due to the local magnitude and the epicentral distance, scaling them appropriately in order to guarantee the spectrum-compatibility, in the range of $0.1 \div 2.0$ s periods, with the basic seismic hazard of the place of interest. In detail, this compatibility is verified with the elastic response spectrum (5% equivalent viscous damping coefficient α), so that the difference in the average of the spectral ordinates of the individual amplified signals is above 10% (lower limit) and below 30% (upper limit), throughout the range of the periods mentioned above. Subsequently, the accelerometric signals at the "bedrock" are amplified by the iterative procedure based on the hypothesis of a one-dimensional model of the terrain with linear visco-elastic behaviour, under free-field conditions and converted into response spectra, by means of the Fourier transform. The results are summarised in Fig. 6, where TH_i represents the i -eth spectral signal converted following the amplification procedure, SLV_Mean is the average, SLV_NORM the spectrum normalised to that of the norm, the latter indicated with $SLV_NTC2018$ (SLV Life Safety Limit State).

5. Structural modelling

5.1. Ante Operam Model

The calculation model was developed using SAP2000 structural calculation software (Fig. 7). Below is a brief description of the most important features:

- the beams and pillars are represented by "beam" elements with Euler – Bernoulli formulation, provided with plastic hinges concentrated at the two ends, differentiated

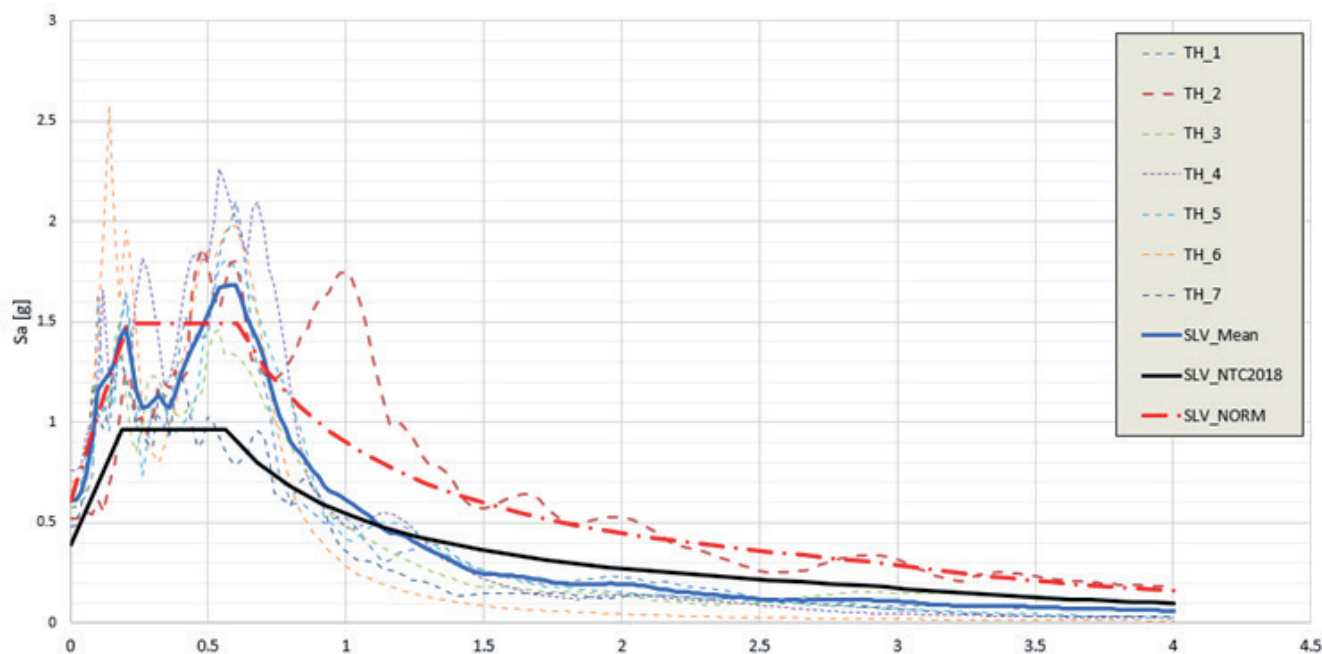


Figura 6 – Segnali spettrali derivanti dai 7 accelerogrammi amplificati e definizione dello spettro medio allo SLV.

Figure 6 – Spectral signals from the 7 amplified accelerograms and definition of the mean spectrum at the SLV.

seguito viene fornita una breve descrizione delle caratteristiche più rilevanti:

- le travi e i pilastri sono rappresentati mediante elementi “beam” con formulazione alla Eulero – Bernoulli, dotati di cerniere plastiche concentrate alle due estremità, differenziate in ragione della sezione trasversale dell’elemento e delle barre di armatura presenti;
- il nucleo circolare che racchiude la chiesa, avente una dimensione sensibilmente maggiore rispetto agli altri nuclei e fondato sul solaio dell’impalcato di calpestio al piano terra, è modellato mediante un graticcio equivalente costituito da elementi *beam* orizzontali a massa nulla (in questo modo non si sovrastima il peso proprio valutato in automatico dal software) ed elementi *beam* verticali a cui è assegnata una cerniera plastica nella mezzeria in ragione dell’armatura presente lungo lo sviluppo di interesse. La Fig. 8 mostra a sinistra un dettaglio della modellazione siffatta;
- non essendo possibile ipotizzare un comportamento rigido degli impalcati a ciascun livello, in ragione delle molteplici irregolarità presenti quali fori nei solai, differenze di quota, concavità in pianta, si è optato per una modellazione degli orizzontamenti mediante elementi “truss” diagonali a comportamento lineare, la cui rigidità estensionale è legata allo spessore della cappa dei solai latero-cementizi. In Fig. 8 è evidente la presenza di tali elementi nella modellazione degli im-

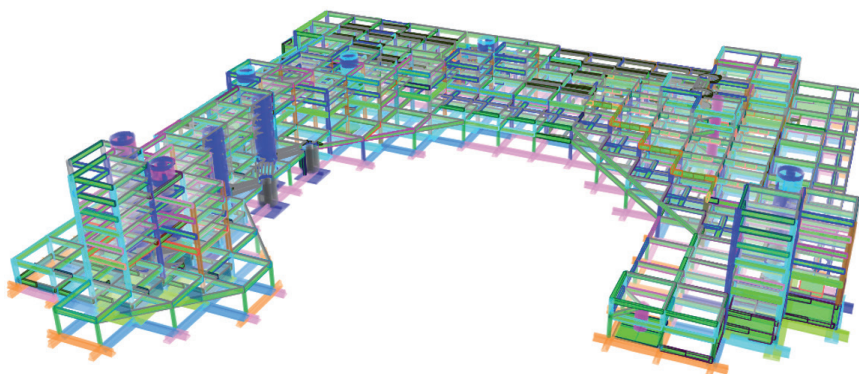


Figura 7 – Modello agli elementi finiti rappresentativo dell’Ante Operam.
Figure 7 – Representative finite elements model of Ante Operam.

by the cross section of the element and the existing reinforcement bars;

- the circular core that encloses the church, significantly larger in size than the other cores and based on the slab of the walkway deck on the ground floor, is modelled by an equivalent lattice consisting of horizontal beam elements with zero mass (in this way the weight automatically evaluated by the software is not overestimated) and vertical beam elements to which a plastic hinge is assigned in the middle because of the reinforcement present along the development of interest. Fig. 8 shows a detail of such modelling on the left;
- since a rigid behaviour of the decks at each level cannot be hypothesised, due to the existing multiple irregularities such as holes in the floors, differences in height, concavities in the plan, we opted for a modelling of the

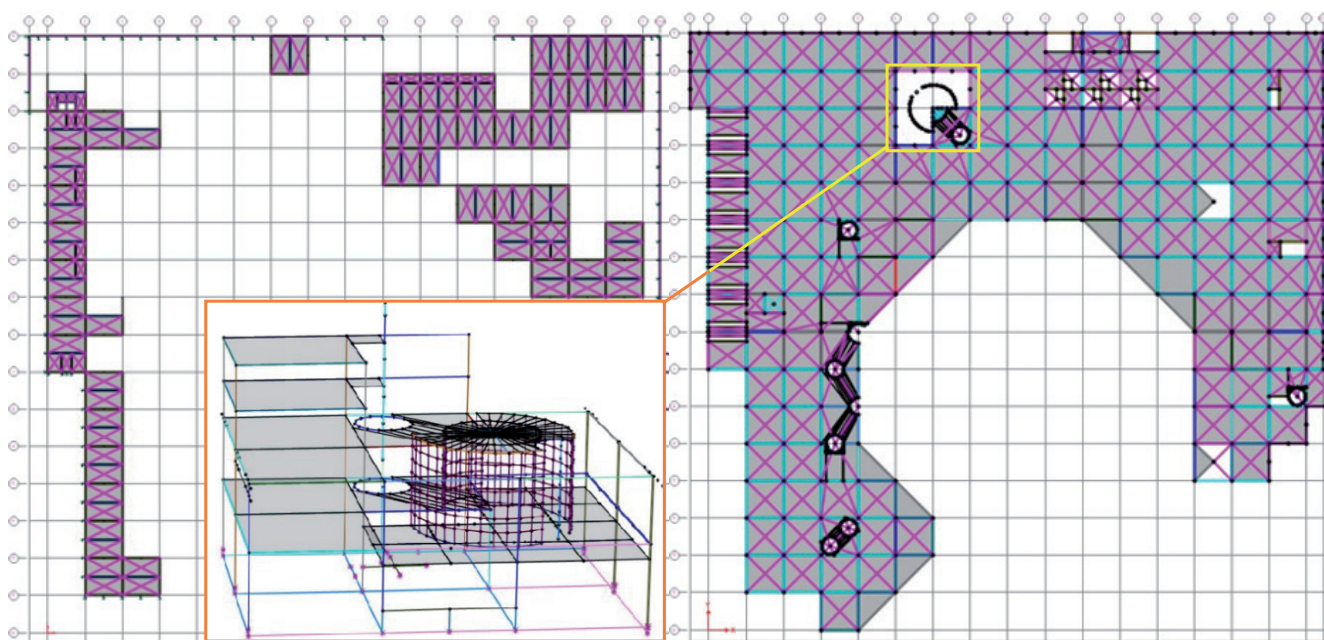


Figura 8 – Vista in pianta degli impalcati ai piani mezzanino (sinistra) e terra (destra) con dettaglio di modellazione del corpo chiesa.

Figure 8 – Plan view of the decks on the mezzanine (left) and ground floors (right) with church body modelling detail.

palcati mezzanino e di calpestio del piano terra (quota piazzale).

5.2. Modello Post Operam

Il modello Ante Operam è stato opportunamente modificato per riprodurre gli effetti degli interventi descritti al §2 e denominato, da qui in avanti, di Post Operam. Di seguito si esprime una sintesi delle modifiche apportate:

- inserimento di elementi "Nonlinear Link" rappresentativi dei dispositivi di isolamento, interposti tra i nodi dei frame dell'impalcato isolato e quelli dei pilastri in corrispondenza del taglio (Fig. 9). Il medesimo inserimento si esegue per i nuclei scala ed ascensore, ma in tal caso l'elemento è interposto tra il nodo delle travi di fondazione ed il nodo inferiore dell'elemento column;
- unione delle travi di giunto appartenenti all'impalcato isolato. Tale operazione si esegue eliminando i due beam ravvicinati e sostituendoli con un elemento unico a cui vanno assegnate le nuove proprietà geometriche e dei materiali previste in progetto. Alla nuova trave si assegnano inoltre le cerniere plastiche concentrate alle estremità;
- modifica delle proprietà e della geometria dei pilastri rinforzati della sottostruttura, i quali beneficiano di un intervento di incamiciatura in cemento armato. Allo stesso modo, in corrispondenza dei giunti, i due pilastri adiacenti, con sezione a T, vengono sostituiti da un elemento beam unico con sezione cruciforme. In entrambi i casi, la sezione trasversale "trasformata" è rappresentata nel dettaglio di Fig. 9 estratto dall'applicativo "Section Designer" del software SAP2000.

horizontal alignments by means of diagonal "truss" elements with linear behaviour, whose extensional stiffness is linked to the thickness of the brick and concrete capping slabs. Fig. 8 shows the presence of these elements in the modelling of the mezzanine and walkway decks of the ground floor (square height).

5.2. Post Operam Model

The Ante Operam model has been appropriately modified to reproduce the effects of the interventions described in §2 and hereinafter referred to as Post Operam. Below is a summary of the changes made:

- introduction of "Nonlinear Link" elements representative of the isolation devices, interposed between the nodes of the frames of the isolated deck and those of the pillars at the cut (Fig. 9). The same insertion is carried out for the staircase and elevator cores, but in this case the element is interposed between the knot of the foundation beams and the lower knot of the column element;
- joining of the joint beams belonging to the isolated deck. This operation is carried out by eliminating the two close beams and replacing them with a single element to which the new geometric and material properties envisaged in the project must be assigned. The new beam is also assigned plastic hinges concentrated at the ends;
- modification of the properties and geometry of the reinforced pillars of the substructure, which benefit from a reinforced concrete casing intervention. In the same way, at the joints, the two adjacent pillars, with a T-section, are replaced by a single beam element with a cross-shaped section. In both cases, the "transformed" cross section is represented in detail in Fig. 9 extracted from the "Section Designer" application of the SAP2000 software.

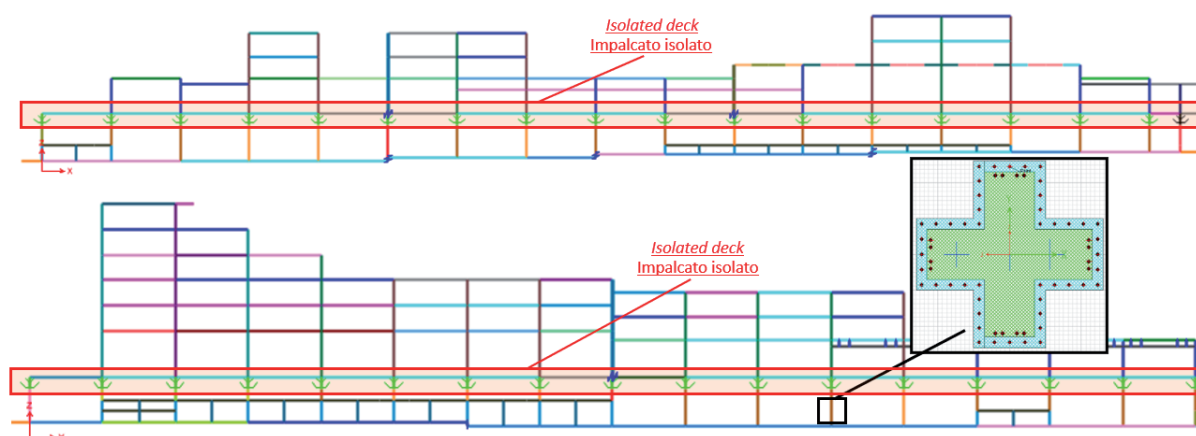


Figura 9 – Modello FEM Post Operam con evidenza dell'impalcato isolato e dettaglio di modellazione di un pilastro all'interno del "Section Designer" di SAP2000: telaio E (dir. X) in alto e telaio 4 (dir. Y) in basso.

Figure 9 – Post Operam FEM model with evidence of the isolated deck and detail of modelling of a pillar within the "Section Designer" of SAP2000: frame E (X direction) at the top and frame 4 (Y direction) at the bottom.

5.3. Nonlinear Link rappresentativi dei dispositivi di isolamento

Prima di passare alla descrizione dei risultati, è opportuno dettagliare le proprietà dei “Nonlinear Link” che simulano il comportamento dei dispositivi di isolamento. Il software SAP2000 prevede nella sua libreria un elemento dedicato definito “friction isolator”, per i cui dettagli si rimanda alla manualistica del software. In sintesi, sono presenti 2 finestre di interfaccia all’interno delle quali inserire i dati di ingresso: la prima riguarda le analisi di tipo lineare, dove è sufficiente inserire la rigidezza secante k_e e lo smorzamento equivalente ξ_e , che derivano dalla procedura iterativa discussa nel seguito; nella seconda schermata si inseriscono le proprietà non lineari utili a definire il ciclo isteretico dell’elemento, quali: il raggio di curvatura R della superficie di scorrimento, i coefficienti di attrito massimo μ_{fast} e minimo μ_{slow} (trattati successivamente) e la rigidezza iniziale, vale a dire quella che precede il distacco.

I parametri di ingresso sono ottenuti mediante una procedura di predimensionamento che si può suddividere in 5 step; è utile allo scopo osservare in Fig. 10 il legame tipico forza-spostamento e le relazioni che legano k_e e ξ_e allo spostamento X del dispositivo, attraverso il raggio di curvatura R della superficie di scorrimento e il coefficiente di attrito medio μ .

Step 1: scelta di R e di μ . Nell’ipotesi di sistema *Single Degree of Freedom* (SDOF), fissata l’accelerazione massima allo SLV da “filtrare” alla sovrastruttura attraverso l’interfaccia degli isolatori, è possibile determinare il periodo di isolamento minimo T_{is} e lo spostamento massimo di progetto d_{SLC} . Noti questi valori, sfruttando le relazioni di Fig. 10, si determinano R e μ ; la procedura è iterativa, vista la dipendenza di k_e e di ξ_e (quest’ultimo agisce attraverso la modifica dello spettro di risposta) dallo spostamento del sistema. In Fig. 11 si mostrano i risultati ottenuti alla fine della procedura a partire dall’accelerazione obiettivo fissata in 0.07g, da cui emerge la scelta di isolatori a doppia superficie di scorrimento caratterizzati da: $R=3700$ mm; $\mu=4\%$.

Step 2: definizione delle tipologie e distribuzione in pianta. Si determina, per l’-esimo isolatore, lo sforzo normale N_i nelle condizioni di esercizio (combinazione quasi permanente dei carichi) mediante un’analisi statica preliminare in SAP2000. L’attività è finalizzata alla valutazione del coefficiente di attrito dinamico $\mu_{fast,i}$ del singolo dispositivo in ragione della

5.3. Nonlinear Link representative of the isolation devices

Before going on to the description of the results, it is worthwhile detailing the properties of the “Nonlinear Links” that simulate the behaviour of the isolation devices. The SAP2000 software includes a dedicated element in its library called “friction isolator”, for details please refer to the software manuals. In summary, there are 2 interface windows within which to enter the input data: the first concerns linear analyses, where it is sufficient to enter the secant stiffness k_e and the equivalent damping ξ_e , which derive from the iterative procedure discussed below; in the second screen the non-linear properties useful to define the hysteretic cycle of the element are introduced, such as: the radius of curvature R of the sliding surface, the maximum μ_{fast} and minimum μ_{slow} friction coefficients (discussed later) and the initial stiffness, i.e. the one preceding the detachment.

The input parameters are obtained by means of a pre-dimensioning procedure that can be divided into 5 steps; it is useful for the purpose of observing the typical force-displacement relationship in Fig. 10 and the relationships that bind k_e and ξ_e to the X displacement of the device, through the

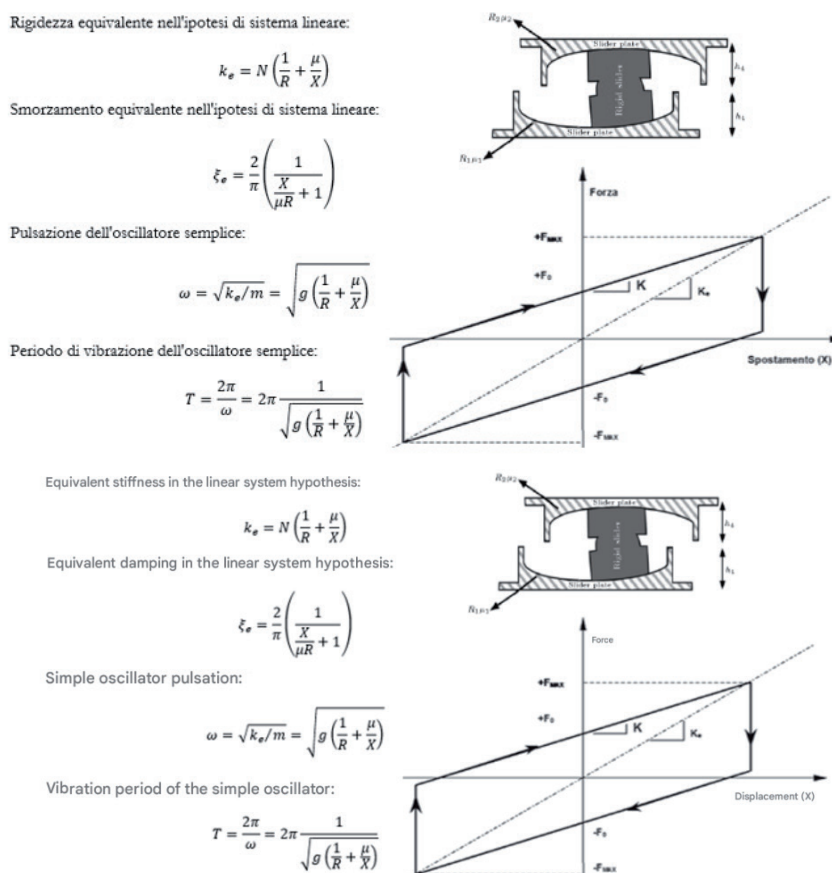


Figura 10 – Diagramma teorico forza-spostamento di un isolatore a scorrimento a doppia superficie curva.

Figure 10 – Theoretical force-displacement diagram of a double curved surface sliding isolator.

PGA	F ₀	T _B	T _C	T _D	S _S	S _T	ξ _{is}	η _{eq}	q	STATO LIMITE LIMIT STATE	ξ _{assa}	T _C *	CATEGORIA DI SUOLO SOIL CATEGORY
-	-	[s]	[s]	[s]	-	-	[%]	-	-	-	[%]	[s]	
0.321	2.449	0.18784	0.56352	2.884	1.228	1	21.66	0.612449	1.5	SLV	5	0.395	C
0.423	2.489	0.198214	0.594643	3.292	1.068	1	21.66	0.612449	1.5	SLC	5	0.428	

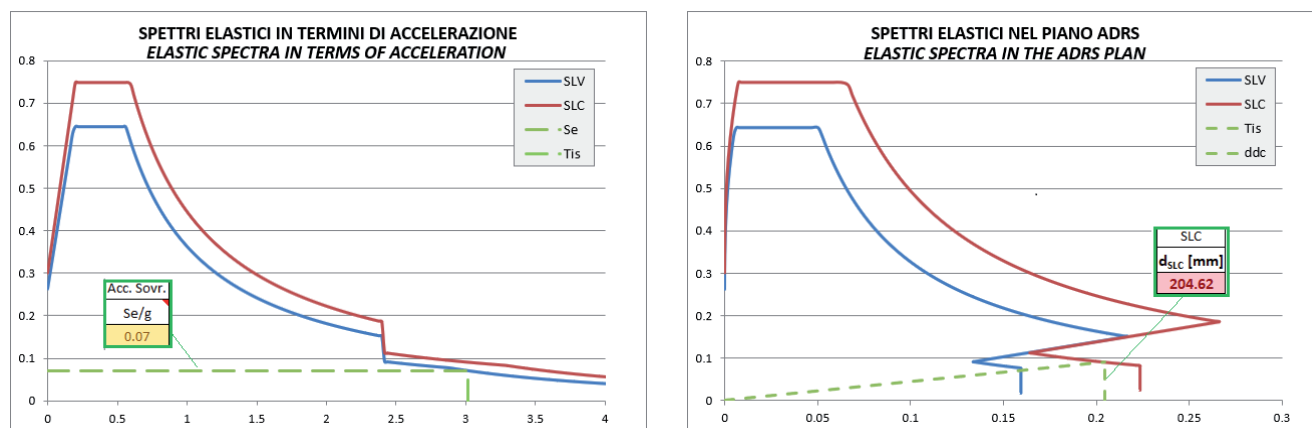


Figura 11 – Predimensionamento sistema isolato: determinazione periodo minimo e spostamento allo SLC del sistema di isolamento per $\xi=21\%$ e $Se/g = 0.07$.

Figure 11 – Pre-dimensioning of the isolated system: determination of the minimum period and displacement to the SLC of the isolation system for $\xi=21\%$ and $Se/g=0.07$.

sua dipendenza dal rapporto $N_i/N_{max, sis}$, essendo quest'ultimo lo sforzo assiale massimo supportabile in presenza di azioni orizzontali. Sia $N_{max, sis}$ che la legge di variazione di μ_{fast} sono forniti dal produttore dell'appoggio e ne caratterizzano le dimensioni in pianta e in altezza; un andamento tipico è mostrato nell'immagine a sinistra di Fig. 12.

Nel caso specifico di sistema complesso, caratterizzato da una elevata variabilità dello sforzo normale nei pilastri, non si può associare ad uno o pochi valori di N_i una tipologia differente di isolatore, poiché antieconomico; si perviene quindi ad una soluzione ottimizzata, caratterizzata dalla scelta di n.5 tipologie denominate *FP1*, *FP...*, *FP5*, la cui distribuzione in pianta (Fig. 13) deve essere tale da rispettare la compatibilità di $N_{max, sis}$ e μ con i valori di N_i e $\mu_{fast, i}$. Inoltre, fissando in prima analisi lo spostamento di ogni isolatore costante e pari al valore di progetto, è possibile determinare per l'i-esimo elemento la rigidezza $k_{e, i}$, quindi controllare che la sommatoria sia tale da non superare il valore globale k_e (legato a T_{is}) determinato allo step n.1.

Step 3: verifica degli spostamenti. Si valutano gli spostamenti massimi di ciascun isolatore tenendo conto della distribuzione in pianta di Fig. 13, controllando che siano al di sotto della soglia di progetto. Il metodo di calcolo si basa sull'ipotesi di impalcato rigido e proiezione dei centri di massa dei piani superiori sull'impalcato da isolare; rispetto allo spostamento d_{SLC} del sistema SDOF valutato al punto 1, bisogna tenere conto degli effetti torsionali mediante l'introduzione dei fattori amplificativi nelle due direzioni ortogonali δx_i e δy_i , le cui espressioni numeriche sono indicate al §7.10.5.3.1 delle NTC18:

radius of curvature R of the sliding surface and the average friction coefficient μ .

Step 1: choice of R and μ . In the case of a Single Degree of Freedom (SDOF) system, setting the maximum acceleration at the SLV to be "filtered" at the superstructure through the isolators interface, the minimum isolation period T_{is} and the maximum d_{SLC} project displacement can be determined. Knowing these values, exploiting the relationships of Fig. 10, R and μ are determined; the procedure is repeated, given the dependence of k_e and ξ_e (the latter acts through the modification of the response spectrum) on the displacement of the system. Fig. 11 shows the results obtained at the end of the procedure starting from the target acceleration set at $0.07g$, from which the choice of double sliding surface isolators emerges characterised by: $R=3700$ mm; $\mu=4\%$.

Step 2: definition of the types and distribution in the plan. The normal stress N_i under the operating conditions (quasi-permanent combination of loads) is determined for the i -eth isolator by a preliminary static analysis in SAP2000. The activity is aimed at evaluating the dynamic friction coefficient $\mu_{fast, i}$ of the individual device due to its dependence on the $N_i/N_{max, sis}$ ratio, the latter being the maximum axial stress tolerable in the presence of horizontal actions. Both $N_{max, sis}$ and the law of variation of μ_{fast} are provided by the manufacturer of the support and characterise its dimensions in plan and height; a typical trend is shown in the image on the left of Fig. 12.

In the specific case of a complex system, characterised by a high variability of the normal stress in the pillars, one or a few N_i values cannot be associated with a different type of isolator; as it is uneconomic; an optimised solution is therefore achieved, characterised by the choice of 5 types called *FP1*, *FP...*, *FP5*, whose distribution in plan (Fig. 13) must be

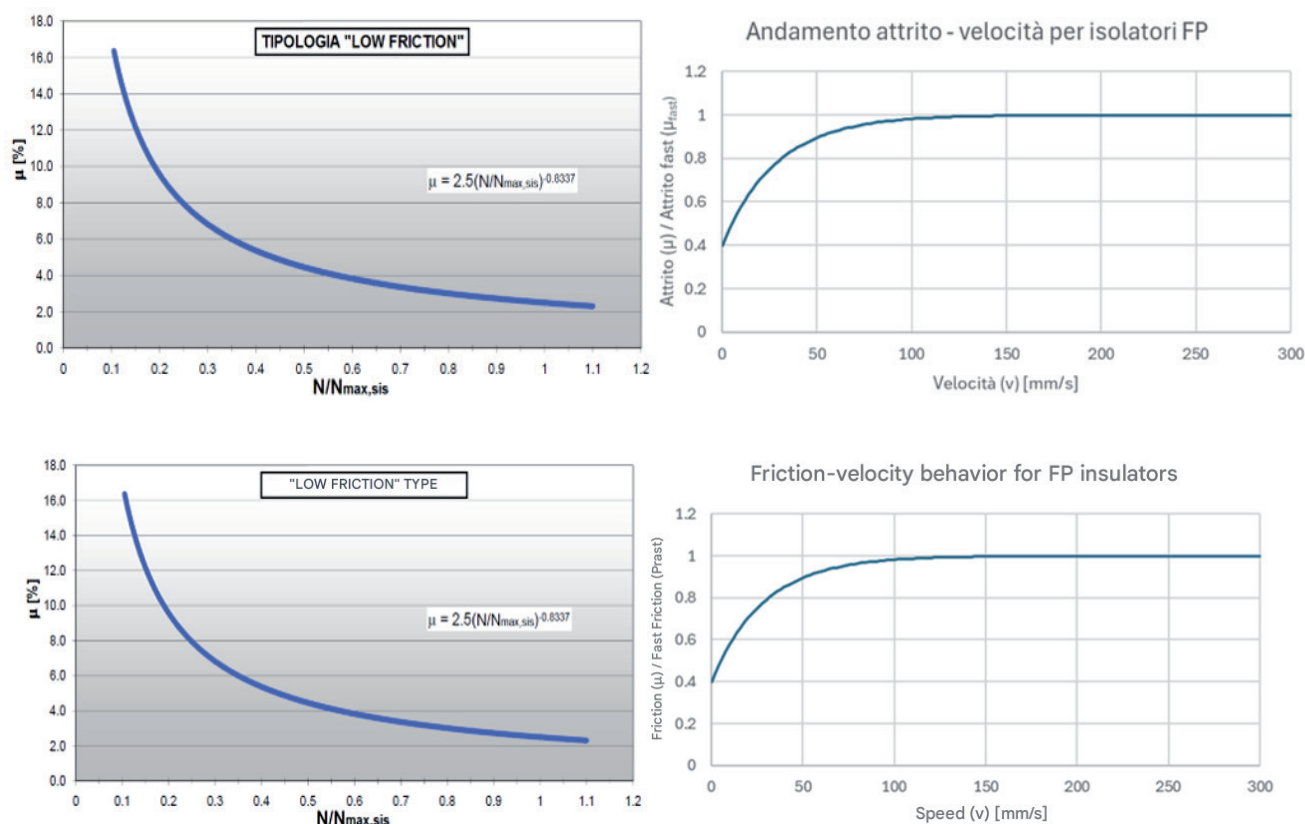


Figura 12 – Dipendenza del coefficiente di attrito: dal carico verticale di esercizio (sinistra) e dalla velocità di scorrimento (destra).

Figure 12 – Dependence of the friction coefficient: on the vertical operating load (left) and on the sliding speed (right).

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_x^2} y \quad \delta_{yi} = 1 + \frac{e_{tot,x}}{r_y^2} x_i$$

dove: x_i, y_i sono le coordinate del dispositivo rispetto al centro di rigidezza; $e_{tot,x,y}$ è l'eccentricità totale nella direzione x, y , inclusa quella accidentale; $r_{x,y}$ sono le componenti del raggio torsionale del sistema di isolamento, date dalle espressioni:

$$r_x^2 = \sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi}) / \sum K_{yi} \quad r_y^2 = \sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi}) / \sum K_{xi}$$

Lo spostamento massimo dell'isolatore i -esimo è ottenuto mediante l'espressione sotto riportata, che contempla la combinazione degli effetti indicata dalle NTC2018 per le analisi spettrali (regola del 100% sisma prevalente + 30% sisma ortogonale):

$$d_i = \max \left(\sqrt{(d_{dc} \cdot \delta_{xi})^2 + (0.3 \cdot d_{dc} \cdot \delta_{yi})^2}; \sqrt{(0.3 \cdot d_{dc} \cdot \delta_{xi})^2 + (d_{dc} \cdot \delta_{yi})^2} \right)$$

In Fig. 13 è rappresentata la soluzione finale ottenuta a seguito della procedura iterativa, dove ad ogni iterazione bisogna correggere le rigidità $k_{e,i}$ e gli smorzamenti $\xi_{e,i}$ in

such as to respect the compatibility of $N_{max, sis}$ and μ with the values of N_i and $\mu_{fast,i}$. Furthermore, by fixing the displacement of each isolator constant and equal to the design value, in the first analysis, we can determine the stiffness $k_{e,b}$ for the i -eth element, then check that the sum is such as not to exceed the overall value k_e (linked to T_{is}) determined in step 1.

Step 3: verification of movements. The maximum displacements of each isolator are evaluated taking into account the layout of Fig. 13, checking that they are below the design threshold. The calculation method is based on the assumption of a rigid deck and projection of the centres of mass of the upper floors on the deck to be isolated; with respect to the d_{SLC} displacement of the SDOF system evaluated in point 1, the torsional effects must be taken into account by introducing the amplifying factors in the two orthogonal directions δ_{xi} and δ_{yi} , whose numerical expressions are indicated in § 7.10.5.3.1 of the NTC18s:

$$\delta_{xi} = 1 + \frac{e_{tot,y}}{r_x^2} y \quad \delta_{yi} = 1 + \frac{e_{tot,x}}{r_y^2} x_i$$

where: x_i, y_i are the coordinates of the device with respect to the centre of rigidity; $e_{tot,x,y}$ is the total eccentricity in the x, y direction, including the accidental one; $r_{x,y}$ are the components of the torsional radius of the isolation system, given by the expressions:

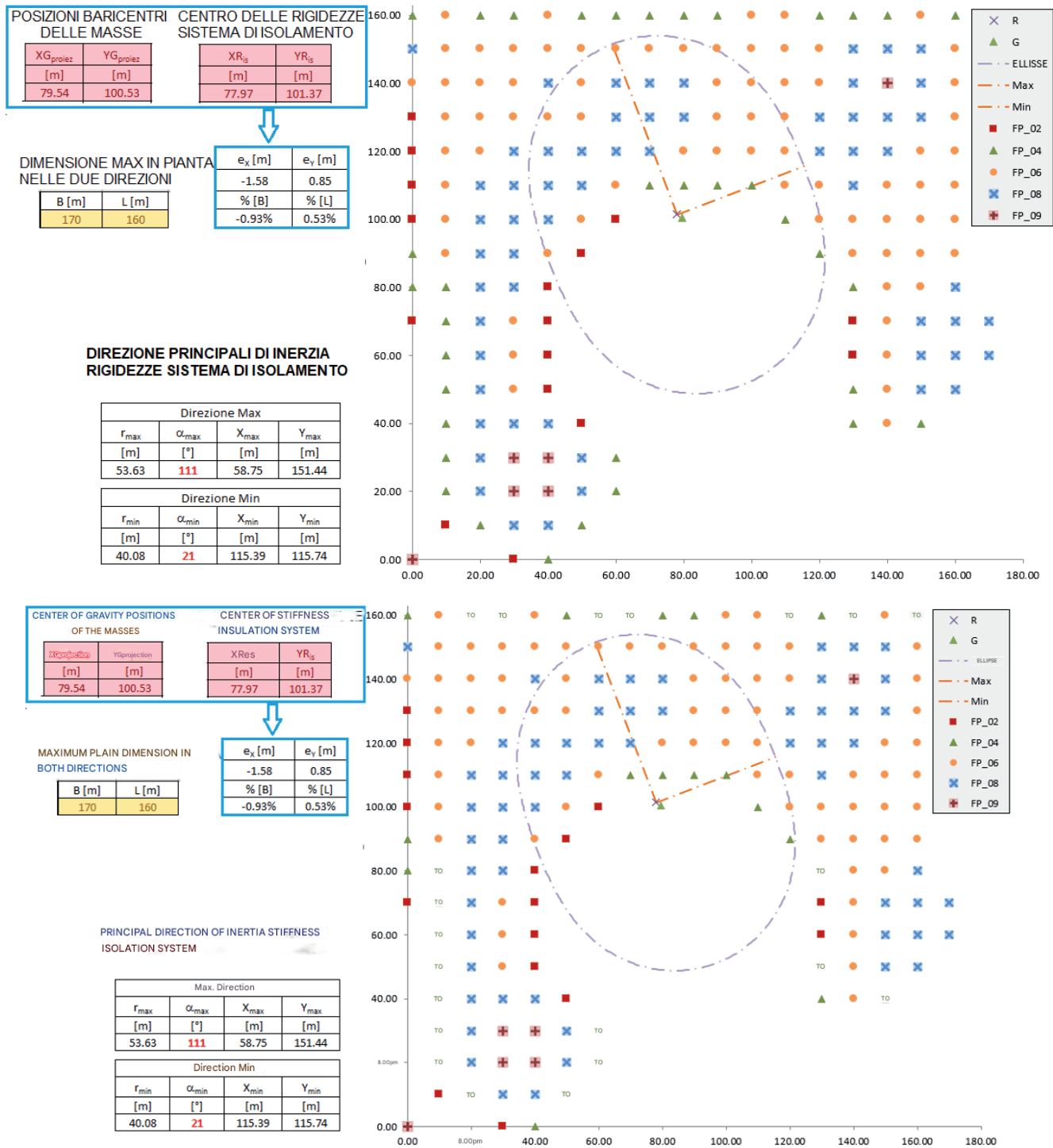


Figura 13 – Disposizione in pianta delle tipologie dei dispositivi di isolamento ottenuta dal predimensionamento con sovrapposizione del centro delle rigidzze e dell'ellisse centrale d'inerzia.

Figure 13 – Plan layout of the types of isolation devices obtained from the pre-dimensioning with superposition of the centre of the stiffnesses and the central ellipse of inertia.

funzione degli spostamenti ottenuti al passo precedente. L'immagine, oltre a mostrare la disposizione in pianta delle 5 tipologie adottate, evidenzia la pressoché coincidenza tra baricentro delle rigidzze e centro delle masse (come ci

$$r_x^2 = \frac{\sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi})}{\sum K_{yi}} \quad r_y^2 = \frac{\sum (x_i^2 K_{yi} + y_i^2 K_{xi})}{\sum K_{xi}}$$

The maximum displacement of the *i*-eth isolator is obtained by the expression below, which contemplates the

si attendeva) ed individua gli assi centrali di inerzia, le cui direzioni sono quelle x e y di interesse.

Step 4: definizione del coefficiente di attrito μ_{slow} . Per tenere conto della variabilità del coefficiente di attrito dalla velocità di scorrimento d, il software richiede l'inserimento del coefficiente di minimo μ_{slow} e del parametro r dipendente dalle superfici a contatto, secondo l'espressione numerica:

$$\mu = \mu_{\text{fast}} + (\mu_{\text{fast}} - \mu_{\text{slow}})e^{rd}$$

In Fig. 12, immagine a destra, è riportato il grafico ottenuto nel caso di interesse, in genere fornito dai produttori, che mostra come soltanto al di sopra dei 150 mm/s l'attrito rimane costante, mentre durante le fasi di primo distacco o di inversione del moto, si registra una sensibile riduzione.

Step 5: variabilità nel tempo dell'attrito. Le NTC2018 indicano in maniera esplicita di tener conto della variabilità nel tempo dei parametri che influenzano maggiormente la risposta dei dispositivi; nel caso dei "friction pendulum" è indubbio che ci si riferisca all'attrito tra le due superfici a contatto. Bisogna quindi individuare due valori di soglia, massimo e minimo, denominati dalle norme internazionali rispettivamente *Upper Bound Design Properties* (UBDP) e *Lower Bound Design Properties* (LBDP). L'Eurocodice 8 - Parte 2 [5], all'Appendice J, fornisce un metodo per la stima dell'UBDP a partire dal valore nominale DP_{nom} :

$$UBDP = \max DP_{\text{nom}} \lambda_{U,f1} \cdot \lambda_{U,f2} \dots \lambda_{U,fi}$$

dove:

$$\lambda_{U,f1} = 1 + (\lambda_{\text{max},fi} - 1)\psi_{fi}$$

$\psi_{fi} = 0.7$ è il coefficiente che tiene conto della simultaneità delle condizioni di variabilità degli isolatori.

In Fig. 14 sono riportati i coefficienti indicati nell'appendice J delle UNI EN 15129 [6] e riguardano i 4 fattori che influenzano maggiormente la tipologia di dispositivi prescelta, vale a dire: f_1 : coefficiente di invecchiamento; f_2 : coefficiente di temperatura; f_3 : coefficiente di contaminazione; f_4 : coefficiente di variabilità della fornitura.

L'applicazione delle espressioni precedenti porta a concludere che i valori nominali, desunti dalla procedura di predimensionamento, devono essere incrementati/ridotti mediante l'applicazione delle seguenti percentuali: UBDP: +40%; LBDP: -20%. Ai fini delle analisi, i valori in UBDP sono utilizzati per massimizzare gli effetti sulla sovrastruttura, mentre le condizioni più severe per gli scorrimenti dei dispositivi si ottengono con le proprietà in LBDP.

6. Risultati significativi delle analisi Post Operam

Al fine di valutare se l'edificio nella configurazione Post Operam è in grado di resistere alle azioni sismiche di progetto, sono state condotte tutte le verifiche imposte dalla normativa vigente, oltre ad una serie di controlli utili a valutare l'efficacia degli interventi proposti. Nel seguito si

Coefficienti di variabilità per dispositivi di isolamento sismico		
Valore Upper Bound	Coefficiente	Valore Lower Bound
1.1	f_1	1
1.1	f_2	0.8
1.1	f_3	1
1.2	f_4	0.8

Variability coefficients for seismic isolation devices		
Upper Bound Value	Coefficient	Valore Lower Bound
1.1	f_1	1
1.1	f_2	0.8
1.1	f_3	1
1.2	f_4	0.8

Figura 14 – Coefficienti di variabilità adottati per l'attrito dei dispositivi "friction pendulum".

Figure 14 – Coefficients of variability adopted for the friction of "friction pendulum" devices.

combination of the effects indicated by the NTC2018 for spectral analyses (rule of 100% prevailing earthquake + 30% orthogonal earthquake):

$$d_i = \max \left(\sqrt{(d_{dc} \cdot \delta_{xi})^2 + (0.3 \cdot d_{dc} \cdot \delta_{yi})^2} ; \sqrt{(0.3 \cdot d_{dc} \cdot \delta_{xi})^2 + (d_{dc} \cdot \delta_{yi})^2} \right)$$

Fig. 13 shows the final solution obtained following the iterative procedure, where at each iteration the stiffnesses $k_{e,i}$ and the damping $\xi_{e,i}$ must be corrected as a function of the displacements obtained in the previous step. The image highlights the almost coincidence between the centre of gravity of the stiffnesses and the centre of the masses (as expected), in addition to showing the layout of the 5 types adopted, and identifies the central axes of inertia, whose directions are those x and y of interest.

Step 4: definition of the coefficient of friction μ_{slow} . To take into account the variability of the friction coefficient from the sliding speed, the software requires the input of the minimum μ_{slow} coefficient and the parameter r dependent on the contact surfaces, according to the numerical expression.

$$\mu = \mu_{\text{fast}} + (\mu_{\text{fast}} - \mu_{\text{slow}})e^{rd}$$

Fig. 12, image on the right, shows the graph obtained in the case of interest, generally provided by the manufacturers, which shows that the friction remains constant only above 150 mm/s, while during the phases of first detachment or reversal of motion, there is a significant reduction.

Step 5: variability in friction time. The NTC2018s explicitly indicate to take into account the variability over time of the parameters that most influence the response of the devices; in the case of "friction pendulum" there is no doubt that it refers to the friction between the two surfaces in contact. It is therefore necessary to identify two threshold values, maximum and minimum, named by international standards respectively *Upper Bound Design Properties* (UBDP) and *Low-*

mostrano i principali risultati ottenuti, da cui è possibile apprezzare i benefici ottenuti con la tecnica dell'isolamento.

6.1. Il bilancio energetico come strumento preliminare di verifica

Un utile elemento di controllo, sia in termini di validità delle analisi time history eseguite che in termini di efficacia dell'intervento di retrofit, è rappresentato dalla lettura dei diversi contributi energetici presenti durante il moto. Prima di procedere alla discussione dei risultati, è opportuno riportare le equazioni del moto, con riferimento ad un sistema SDOF elastico:

$$m\ddot{u} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}_g$$

essendo:

- u lo spostamento assoluto nella direzione del moto;
- u_g lo spostamento assoluto del suolo;
- c lo smorzamento viscoso;
- $x=u-u_g$ lo spostamento relativo del sistema strutturale rispetto al suolo;
- m e k rispettivamente la massa e la rigidezza laterale del sistema SDOF.

Moltiplicando entrambi i termini dell'equazione per l'infinitesimo dt e integrando, si perviene, attraverso passaggi matematici omissi per brevità, al bilancio energetico, secondo cui, a ogni istante di tempo, l'energia sismica in ingresso E_I , deve essere eguagliata dalle altre forme energetiche presenti, che nel caso di sistema elasto-plastico si trasforma in:

$$E_I = E_k + E_d + (E_p + E_H)$$

dove:

- $E_I = -\int_0^t m\ddot{u}_g \dot{u} dt$ è l'energia in ingresso;
- $E_k = \frac{1}{2} m \dot{u}^2$ è l'energia cinetica legata al prodotto della massa del sistema per la velocità assoluta;
- $E_d = \int_0^t c \dot{x}^2 dt$ è l'energia viscosa. Poiché sia il coefficiente c che il quadrato della velocità sono termini positivi, è evidente che tale tipo di energia si accumula nel tempo; pertanto, non può che crescere durante il moto e rappresenta la dissipazione legata ai fenomeni viscosi;
- $E_p = \frac{1}{2} k x^2$ è l'energia elastica del sistema o energia potenziale, che viene accumulata o rilasciata durante il moto;
- E_H rappresenta l'ulteriore termine che nasce qualora il sistema da elastico diventi elasto-plastico. In tal caso, E_p si scompone in due aliquote, con l'aggiunta dell'energia dissipata per isteresi, anche questa sempre positiva e pertanto crescente nel tempo.

L'espressione energetica fornisce una lettura alternativa utile per la scelta degli interventi. In effetti, il moto del sistema e quindi l'espressione dello stato di sforzo a cui

er Bound Design Properties (LBDP). Eurocode 8 - Part 2 [5], in Appendix J, provides a method for estimating the UBDP starting from the nominal value DP_{nom} :

$$UBDP = \max DP_{nom} \lambda_{U,f1} \cdot \lambda_{U,f2} \dots \lambda_{U,fi}$$

where:

$$\lambda_{U,f1} = 1 + (\lambda_{max,fi} - 1) \psi_{fi}$$

$\psi_{fi} = 0.7$ is the coefficient that takes into account the simultaneity of the variability conditions of the isolators.

Fig. 14 shows the coefficients indicated in Appendix J of UNI EN 15129 [6] and concern the 4 factors that most influence the type of devices chosen namely: f_1 : aging coefficient; f_2 : temperature coefficient; f_3 : contamination coefficient; f_4 : supply variability coefficient.

The application of the previous expressions leads to the conclusion that the nominal values, derived from the pre-dimensioning procedure, must be increased/reduced by applying the following percentages: UBDP: +40%; LBDP: -20%. For the purposes of the analyses, the values in UBDP are used to maximise the effects on the superstructure, while the most severe conditions for the sliding of the devices are obtained with the properties in LBDP.

6. Important Post Operam analyses results

All the checks imposed by current legislation have been carried out in order to evaluate whether the building in the Post Operam configuration is able to withstand the seismic actions of the project, as well as a number of checks useful to evaluate the effectiveness of the proposed interventions. The main results obtained are shown below, from which the benefits obtained with the isolation technique can be appreciated.

6.1. The energy balance as a preliminary verification tool

A useful control element is represented by the reading of the different energy contributions present during the motion, both in terms of the validity of the time history analyses performed and in terms of the effectiveness of the retrofit intervention. Before proceeding to the discussion of the results, it is worthwhile reporting the equations of motion, with reference to an elastic SDOF system:

$$m\ddot{u} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{u}_g$$

where:

- u is the absolute displacement in the direction of motion;
- u_g is the absolute displacement of the soil;
- c is the viscous damping;
- $x=u-u_g$ is the relative displacement of the structural system with respect to the ground;
- m and k are respectively the mass and lateral stiffness of the SDOF system.

Multiplying both terms of the equation by the infinites-

è sottoposto, è rappresentato principalmente dall'energia cinetica; a parità di energia in ingresso, al fine di ridurre il termine E_K si può agire incrementando E_d (inserimento di dissipatori fluido-viscosi) o, come nel caso in esame, il termine E_H attraverso l'inserimento di appositi elementi dotati di cicli di isteresi ampi e stabili.

Il software è in grado di valutare, mediante integrazione numerica al passo, i contributi energetici esposti. A titolo di esempio, in Fig. 15 si riporta la risposta energetica riferita all'analisi denominata TH1, di durata 70 s. La lettura del grafico porta alle seguenti considerazioni:

- il termine "Input" rappresenta tutta l'energia in ingresso nel sistema;
- il termine "Potential" rappresenta l'energia potenziale;
- l'energia cinetica ("Kinetic"), rappresentata con colorazione arancione, è prevalente nella parte iniziale del moto, quando le accelerazioni in ingresso sono ancora modeste e il sistema di isolamento non si è attivato o si è attivato solo in parte; successivamente si riduce sensibilmente al crescere del contributo energetico dissipativo illustrato nei punti successivi;
- il termine indicato con "Error", vale a dire la sommatoria algebrica di tutte le forme energetiche, è sempre prossimo allo zero, segno che le analisi numeriche convergono e l'equilibrio energetico è rispettato a ogni istante di tempo;

imal dt and integrating the energy balance, through mathematical steps omitted for brevity, according to which, at each moment of time, the incoming seismic energy E_I , must be equalled by the other existing energy forms, which in the case of an elastoplastic system is transformed into:

where:

$$E_I = E_K + E_d + (E_p + E_H)$$

- $E_I = -\int_0^t m \ddot{u}_g \dot{u} dt$ is the input energy;
- $E_K = \frac{1}{2} m \dot{u}^2$ is the kinetic energy linked to the product of the mass of the system times the absolute speed;
- $E_d = \int_0^t c \dot{x}^2 dt$ is the viscous energy. Since both coefficient c and the square of the speed are positive terms, it is evident that this type of energy accumulates over time; therefore, it can only grow during motion and represents the dissipation linked to viscous phenomena;
- $E_p = \frac{1}{2} k x^2$ is the elastic energy of the system or potential energy, which is accumulated or released during motion;
- E_H represents the further term that arises if the elastic system becomes elastic-plastic. In this case, E_p is broken down into two rates, with the addition of the energy dissipated by hysteresis, which is also always positive and therefore increasing over time.

The energetic expression provides an alternative reading useful for the choice of interventions. In fact, the motion of the system and therefore the expression of the condition of stress to which it is subjected, is mainly represented by ki-

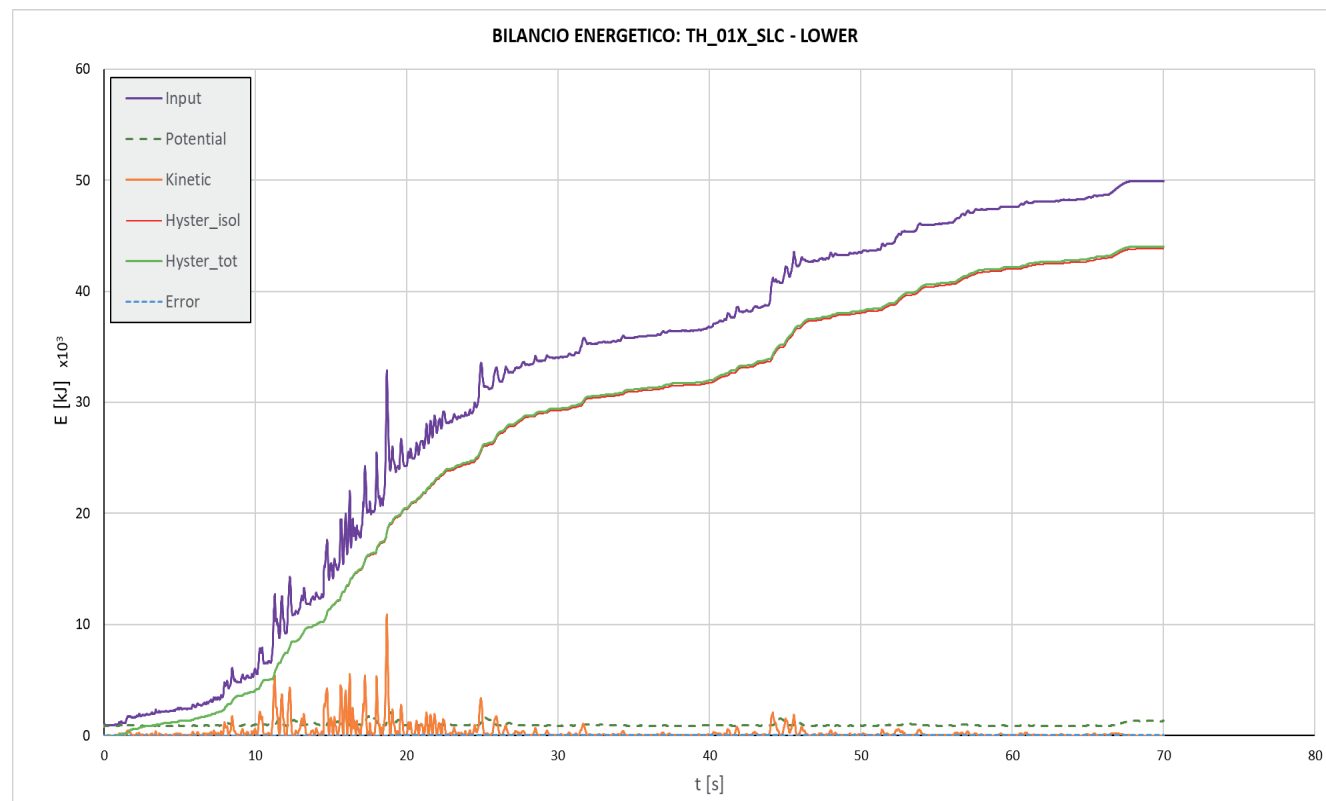


Figura 15 – Andamento temporale delle varie forme energetiche nella TH1 in direzione x allo SLC in Lower Bound.
Figure 15 – Time trend of the various energy forms in TH1 in the x direction at the SLC in Lower Bound.

- l'energia isteretica totale ("Hyster_tot"), rappresentata con colorazione verde, segue da vicino l'andamento dell'energia in ingresso, segno dell'efficacia dei dispositivi adottati. In effetti, tale energia comprende tutte le dissipazioni isteretiche presenti all'interno del software, comprese quelle legate alla formazione delle cerniere plastiche in travi e pilastri. Al fine di comprendere quale sia il contributo preponderante, sono state eseguite nuove analisi, questa volta mantenendo sia la sovrastruttura che la sottostruttura in campo elastico, ottenendo il contributo legato ai soli "friction pendulum", rappresentato in grafico con colorazione rossa ("Hyster_isol"). Poiché i due andamenti sono pressoché coincidenti, significa che la quasi totalità dell'energia dissipata per isteresi è dovuta agli isolatori, a riprova del fatto che il sistema strutturale resta essenzialmente in campo elastico.

6.2. Controllo degli spostamenti sismici differenziali sovrastruttura – sottostruttura

In merito ai sistemi isolati alla base, le NTC18 [4] al §7.10.4.3 richiedono un requisito di rigidità al sistema delle sottostrutture qualora non sia presente un orizzontamento rigido al di sotto dei dispositivi. Tale requisito consiste nel verificare che il massimo spostamento del generico pilastro al di sotto dell'isolatore sia inferiore a 1/20 dello spostamento massimo subito dall'isolatore stesso durante il moto.

Nel caso in esame, la condizione maggiormente severa si ha per il pilastro il cui dispositivo di isolamento registra spostamenti più contenuti (in questo modo il limite si abbassa). Nel grafico di Fig. 16, con linea leggera tratteggiata è indicato lo spostamento temporale dell'isolatore in questione, il cui massimo fornisce la soglia di 1/20 (circa 2.5 mm) mostrata con linee orizzontali in grassetto sia per spostamenti positivi che negativi; poiché lo spostamento del pilastro opportunamente rinforzato, rappresentato nel grafico suddetto con oscillazioni di colorazione blu, oscilla nel range 1.0 ÷ 1.2 mm, la verifica è da ritenersi abbondantemente soddisfatta:

$$d_{pil,max} = 1.2mm < \frac{1}{20d_{is,max}} = 2.5 mm$$

6.3. Verifica degli isolatori in termini di forze e spostamenti allo SLC

Le verifiche dei dispositivi di isolamento allo stato limite di collasso consistono nel controllo dei seguenti aspetti:

- si verifica che il massimo spostamento all'interno del ciclo di isteresi di ogni isolatore sia inferiore allo spostamento di progetto (± 300 mm). A titolo esemplificativo, si riporta in Fig. 17 una delle risposte ottenute, che evidenziano un comportamento compatibile con il legame teorico mostrato in Fig. 10. In più, è possibile notare la presenza di picchi ad ogni inversione del moto, che derivano dalla variabilità del coefficiente di attrito con la velocità di scorrimento;

netic energy; with the same input energy, in order to reduce the term E_K , it is possible to act by increasing E_d (introduction of fluid-viscous dampers) or, as in the case in question, the term E_H through the introduction of special elements provided with large and stable hysteresis cycles.

The software can evaluate the exposed energy contributions, by means of numerical integration. By way of example, Fig. 15 shows the energy response referred to the analysis called TH1, lasting 70 s. Reading the graph leads to the following considerations:

- the term "Input" represents all the energy input into the system;
- the term "Potential" represents potential energy;
- the kinetic energy ("Kinetic"), represented with orange colouring, is prevailing in the initial part of the motion, when the incoming accelerations are still modest and the isolation system has not been activated or has been activated only partially; subsequently it is significantly reduced as the dissipative energy contribution illustrated in the following points increases;
- the term indicated with "Error", i.e. the algebraic sum of all energy forms, is always close to zero, an indication that the numerical analyses converge and the energy balance is respected at all times;
- the total hysteretic energy ("Hyster_tot"), represented with green colouring, closely follows the trend of the incoming energy, an indication of the effectiveness of the devices adopted. In fact, this energy includes all the hysteretic dissipations present within the software, including those related to the formation of plastic hinges in beams and pillars. In order to understand what the predominant contribution is, new analyses were carried out, this time maintaining both the superstructure and the substructure in the elastic field, obtaining the contribution linked to the "friction pendulum" alone, represented in a graph with red colour ("Hyster_isol"). Since the two trends are almost coinciding, it means that almost all the energy dissipated by hysteresis is due to the isolators, proving that the structural system remains essentially in the elastic field.

6.2. Control of differential seismic displacements of superstructure – substructure

Regarding the isolated systems at the base, the NTC18s [4] in § 7.10.4.3 require a rigidity requirement to the substructure system if there is no rigid horizontal alignment below the devices. This requirement consists of verifying that the maximum displacement of the generic pillar below the isolator is less than 1/20 of the maximum displacement suffered by the isolator itself during motion.

In the case in question, the most severe condition is for the pillar whose isolation device registers smaller displacements (in this way the limit is lowered). The temporal displacement of the isolator in question is indicated with a

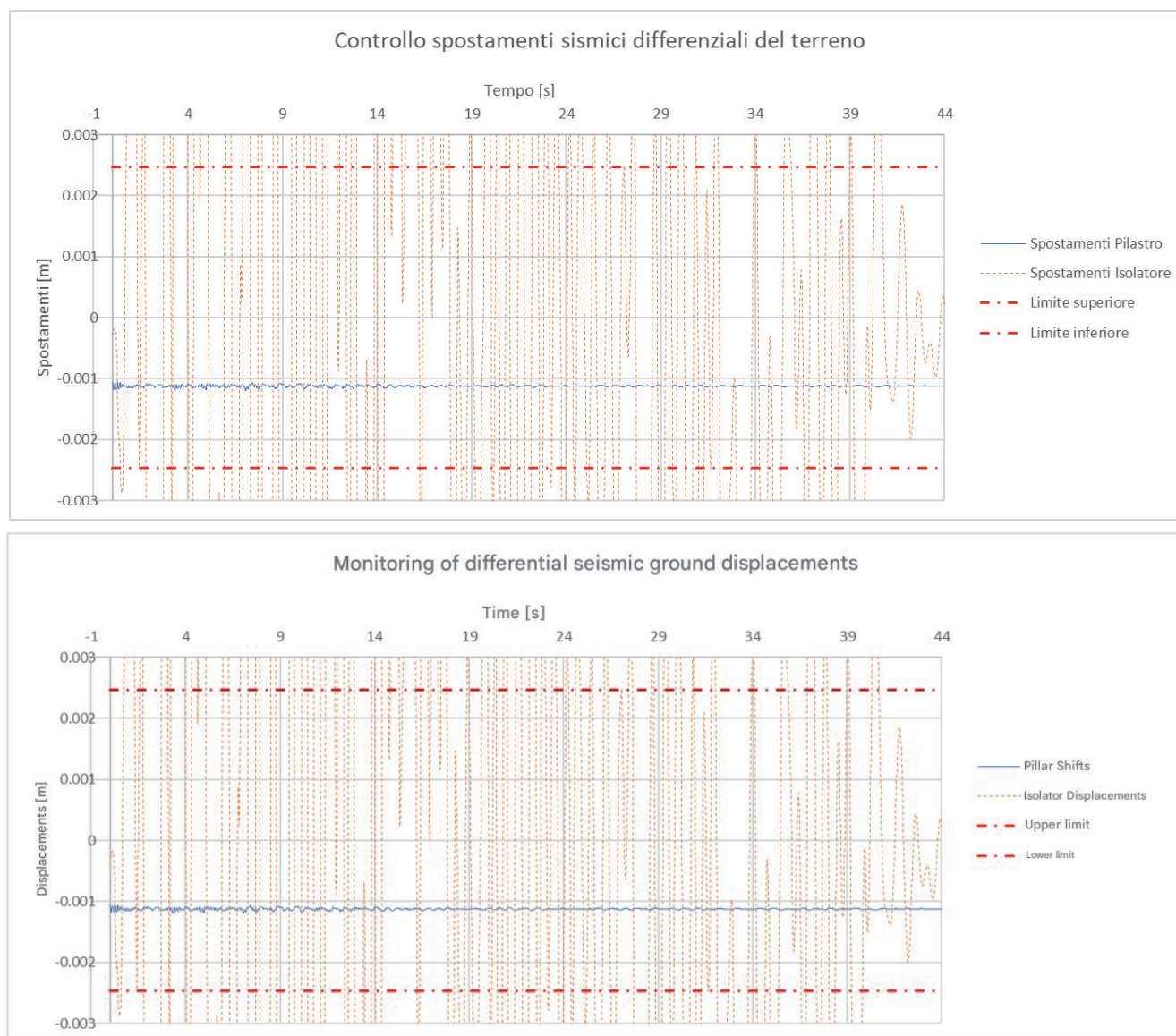


Figura 16 – Verifica dello spostamento massimo in testa ad un pilastro significativo in relazione allo spostamento dell'isolatore soprastante nella Time History 3 in direzione Y allo SLC.

Figure 16 – Verification of the maximum displacement at the head of a significant pillar in relation to the displacement of the isolator above in Time History 3 in direction Y at the SLC.

- si verifica l'assenza di sforzi di trazione, che altrimenti indicherebbero azioni di sollevamento nell'isolatore, non accettabili;
- si verifica che il massimo sforzo assiale di compressione a cui sono sottoposti i dispositivi non superi lo sforzo normale di progetto.

Le verifiche sono state eseguite su tutti i 189 dispositivi rappresentati dai *Nonlinear Link*, di cui si riporta uno stralcio dei tabulati di verifica su foglio elettronico in Fig. 18. Nella tabella, lo sforzo assiale è rappresentato dal simbolo P_{med} , mentre i termini $U2_{med}$ e $U3_{med}$ si riferiscono agli spostamenti nelle direzioni 2 e 3 del sistema di riferimento

light dotted line in the graph of Fig. 16, the maximum of which provides the threshold of $1/20$ (approximately 2.5 mm) shown with horizontal lines in bold for both positive and negative displacements; since the displacement of the appropriately reinforced pillar, represented in the aforementioned graph with blue colouring oscillations, oscillates in the $1.0 \div 1.2$ mm range, the verification is to be considered abundantly satisfied:

$$d_{pil,max} = 1.2\text{mm} < \frac{1}{20d_{is,max}} = 2.5\text{ mm}$$

6.3. Verification of isolators in terms of forces and displacements at the SLC

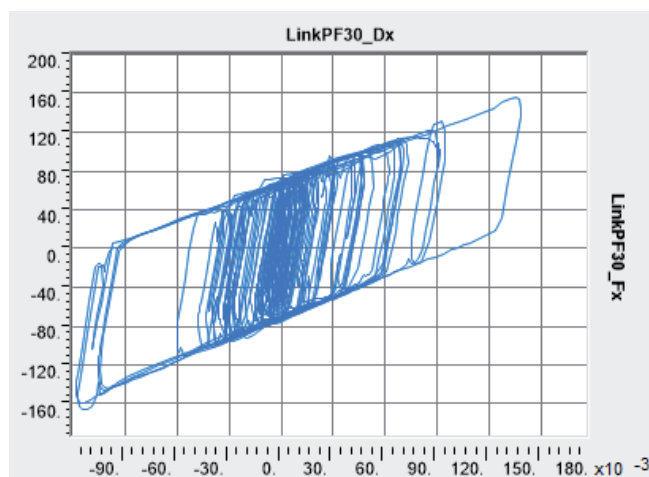


Figura 17 – Ciclo di isteresi di un Nonlinear Link in SAP2000. Spostamenti sulle ascisse [mm] e forze sulle ordinate [kN].

Figure 17 – Hysteresis cycle of a Nonlinear Link in SAP2000. Displacements on axes [mm] and forces on ordinates [kN].

locale; il pedice “med” indica che si tratta del valore medio dei massimi sforzi o spostamenti ottenuti dall'applicazione di ciascuno dei 7 accelerogrammi TH.

In ragione degli spostamenti attesi tra sottostruttura e sovrastruttura allo stato limite SLC, è opportuno fare un cenno sull'importanza dell'integrazione tra la progettazione impiantistica e quella strutturale. La prima, infatti, dovrà necessariamente prevedere, in corrispondenza delle zone interferenti, il taglio delle tubazioni rigide e l'interposizione di elementi di natura flessibile, in grado di garantire la sicurezza della rete impiantistica anche a seguito di sisma severo.

6.4. Risoluzione del problema del martellamento tra corpi giuntati

Come detto nella parte introduttiva, uno dei benefici significativi che ci si aspetta dalla tecnica dell'isolamento è l'assenza di martellamento nei giunti. Indicando con $d_{x,i}$ e $d_{x,j}$ gli spostamenti in direzione X dei nodi adiacenti ma appartenenti rispettivamente al corpo i e al corpo j, la verifica del giunto in direzione ortogonale (Y) consiste nel controllare la seguente espressione:

$$|d_{x,j} - d_{x,i}| \leq a_y$$

dove a rappresenta la dimensione del giunto tecnico esistente, pari a 5 cm. Per i giunti orditi parallelamente all'asse X, vale la stessa espressione di verifica, ovvero:

$$|d_{y,j} - d_{y,i}| \leq a_x$$

In Fig. 19 si riporta il grafico dello spostamento relativo di nodo di uno dei telai (allineamento E) in prossimità dell'intersezione del giunto ortogonale n.6, per effetto del segnale accelerometrico risultato più gravoso. È evidente l'assenza di contatto tra i nodi, dal momento che la rispo-

The verifications of the isolation devices in the limit state of collapse consist of checking the following aspects:

- Verification is carried out that the maximum displacement within the hysteresis cycle of each isolator is less than the design displacement (± 300 mm). By way of example, one of the answers obtained is shown in Fig. 17, which indicate a behaviour compatible with the theoretical link shown in Fig. 10. In addition, the presence of peaks at each reversal of motion can be observed, which derive from the variability of the friction coefficient with the sliding speed;
- the absence of tensile stresses is checked, which would otherwise indicate lifting actions in the isolator, which are not acceptable;
- verification is carried out that the maximum axial compressive stress to which the devices are subjected does not exceed the normal design stress.

The verifications were carried out on all 189 devices represented by the Nonlinear Links, of which an excerpt of the verification tables on the spreadsheet is shown in Fig. 18. In the table, the axial stress is represented by the symbol P_{med} while the terms $U2_{med}$ and $U3_{med}$ refer to displacements in directions 2 and 3 of the local reference system; the subscript “med” indicates that this is the average value of the maximum stresses or displacements obtained from the application of each of the 7 TH accelerograms.

Due to the expected shifts between substructure and superstructure in the SLC limit condition, it is appropriate to mention the importance of integration between plant and structural design. The first, in fact, must necessarily provide for the cutting of rigid pipes and the interposition of flexible elements, at the interfering areas, capable of guaranteeing the safety of the plant network even following a severe earthquake.

6.4. Solving the problem of hammering between joined bodies

As mentioned in the introductory part, one of the significant benefits expected from the isolation technique is the absence of hammering in the joints. By indicating with $d_{x,i}$ and $d_{x,j}$ the displacements in the X direction of the adjacent nodes but belonging respectively to body i and body j, the verification of the joint in the orthogonal direction (Y) consists in verifying the following expression:

$$|d_{x,j} - d_{x,i}| \leq a_y$$

where a represents the size of the existing technical joint, equal to 5 cm. For joints warped parallel to the X axis, the same verification expression applies, namely:

$$|d_{y,j} - d_{y,i}| \leq a_x$$

Fig. 19 shows the graph of the relative joint displacement of one of the frames (alignment E) near the intersection of the orthogonal joint 6, due to the effect of the most burdensome accelerometric signal. The absence of contact between the joints is evident, since the response obtained is at all

Isolatore scelti			Forze - Direzione X		Forze - Direzione Y		Spostamenti - Direzione X		Spostamenti - Direzione Y	
Num. Fili	Tipologia	Nmax, sis	P med	Verifica	P med	Verifica	U2 med	Verifica	U3 med	Verifica
-	-	[kN]	[KN]	-	[KN]	-	[m]	-	[m]	-
PF1	FP_1	710	209.98	OK	210.74	OK	0.190	OK	0.191	OK
PF2	FP_2	1500	426.05	OK	422.33	OK	0.189	OK	0.190	OK
PF3	FP_2	1500	377.56	OK	372.16	OK	0.190	OK	0.190	OK

...

PF187	FP_2	1500	518.29	OK	522.19	OK	0.191	OK	0.189	OK
PF188	FP_4	4400	2059.09	OK	2178.30	OK	0.191	OK	0.190	OK
PF189	FP_4	4400	2237.03	OK	2193.67	OK	0.190	OK	0.190	OK

Chosen insulator			Forces - Direction X		Forces - Y Direction		Movements - Direction X		Movements - Y direction	
Num. Wires	Typology	Nmax, sis	P med	Verify	P med	Verify	U2 med	Verify	U3 med	Verify
-	-	[kN]	[KN]	-	[KN]	-	[m]	-	[m]	-
PF1	FP_1	710	209.98	OK	210.74	OK	0.190	OK	0.191	OK
PF2	FP_2	1500	426.05	OK	422.33	OK	0.189	OK	0.190	OK
PF3	FP_2	1500	377.56	OK	372.16	OK	0.190	OK	0.190	OK

...

PF187	FP_2	1500	518.29	OK	522.19	OK	0.191	OK	0.189	OK
PF188	FP_4	4400	2059.09	OK	2178.30	OK	0.191	OK	0.190	OK
PF189	FP_4	4400	2237.03	OK	2193.67	OK	0.190	OK	0.190	OK

Figura 18 – Estratto della tabella di verifica allo SLC degli isolatori *Friction Pendulum*.*Figure 18 – Extract of the verification table at the SLC of Friction Pendulum isolators.*

sta ottenuta risulta a ogni istante ampiamente al di sotto delle soglie orizzontali rappresentate dalla dimensione a_y .

La conferma della correttezza dei valori numerici è evidente se si osserva la deformata mostrata in Fig. 19, relativa all'istante $t=14$ s in cui lo spostamento di giunto è massimo: è possibile notare come le sovrastrutture dei corpi 1 e 2 oscillino in fase al di sopra dell'impalcato isolato, riducendo sensibilmente i movimenti relativi.

7. Conclusioni

Il presente documento mostra la validità dell'isolamento sismico come tecnica di protezione sismica passiva, nell'ambito dell'intervento di miglioramento sismico della stazione ferroviaria Vaglio Lise della città di Cosenza. Rispetto agli interventi di tipo tradizionale, l'efficacia appare ulteriormente marcata nel caso di interesse, dove le maggiori criticità sono dettate dall'irregolarità strutturale, dall'insufficienza dei giunti tecnici presenti tra i corpi indipendenti che costituiscono l'aggregato edilizio e dall'impossibilità di interrompere le attività durante la fase di realizzazione dei lavori. Dopo aver effettuato un'adeguata campagna di indagine e aver sviluppato un modello agli elementi finiti, opportunamente validato, in grado di cogliere con buona approssimazione le peculiarità del sistema strutturale esistente, sono state svolte analisi lineari preliminari, grazie alle quali dimensionare i dispositivi e definirne tipologia

times well below the horizontal thresholds represented by dimension a_y .

Confirmation of the correctness of the numerical values is evident if we observe the deformation diagram shown in Fig. 19, relative to the instant $t=14$ s in which the joint displacement is maximum: we can observe how the superstructures of bodies 1 and 2 oscillate in phase above the isolated deck, significantly reducing the relative movements.

7. Conclusions

This document illustrates the validity of seismic isolation as a passive seismic protection technique, as part of the seismic improvement intervention of the Vaglio Lise station in Cosenza. Compared to traditional interventions, the effectiveness appears further marked in the case of interest, where the greatest criticalities are dictated by the structural irregularity, the insufficiency of the technical joints present between the independent bodies that make up the building complex and the impossibility of interrupting the activities during the construction phase of the works. Preliminary linear analyses were carried out, after performing a suitable survey campaign and developing a finite element model, appropriately validated, capable of capturing with good approximation the peculiarities of the existing structural system, thanks to which the devices were sized and their arrangements defined; subsequently,

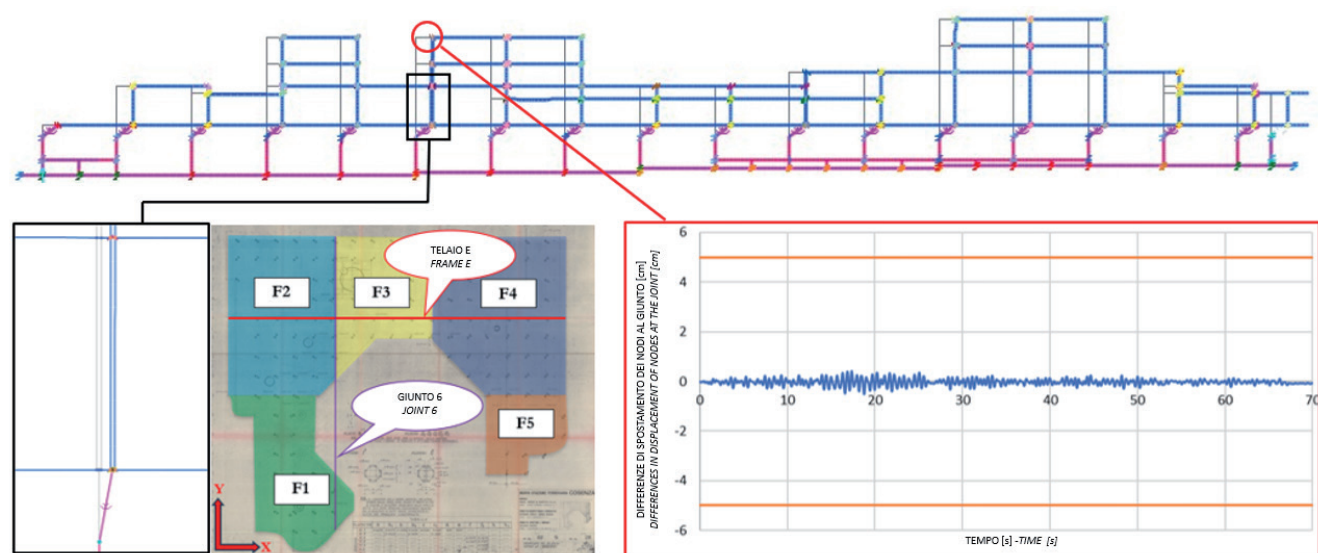


Figura 19 – Controllo del martellamento del giunto 6: deformata all'istante $t=14s$ del telaio E con dettaglio in prossimità del giunto allo SLC.

Figure 19 – Hammering control of joint 6: deformed at instant $t=14s$ of frame E with detail near the joint at SLC.

e distribuzione planimetrica; successivamente si è proceduto ad eseguire le verifiche prestazionali, con riferimento sia agli stati limite ultimi (SLV e SLC) che a quelli di esercizio (SLD e SLO). Tali verifiche sono condotte mediante analisi dinamiche non lineari, inserendo nel modello agli elementi finiti accelerogrammi naturali spettro-compatibili, derivanti da uno studio di risposta sismica locale. I risultati ottenuti evidenziano la bontà dell'idea progettuale e la risoluzione delle criticità precedentemente esposte, difficilmente risolvibili con i metodi tradizionali. Da un lato, gli spostamenti relativi tra i corpi indipendenti in corrispondenza dei giunti si riducono drasticamente e tali da soddisfare con margine le verifiche al martellamento; dall'altro, quasi tutte le lavorazioni si concentrano nel piano seminterrato, adibito a parcheggio evitando interferenze con le attività dei piani superiori. A tale riguardo, i risultati sulla sovrastruttura relativi al modello Post Operam mostrano che gli elementi trave e pilastro restano sostanzialmente in campo elastico e le sollecitazioni di taglio non superano le resistenze ottenute lato armature trasversali, risultando di conseguenza soddisfatti sia i meccanismi duttili, che quelli fragili.

the performance checks were carried out, with reference to both the ultimate limit conditions (SLV and SLC) and those of operation (SLD (damage state limit) and SLO (operation state limit)). These verifications are carried out by means of non-linear dynamic analyses, including spectro-compatible natural accelerograms in the finite element model, deriving from a local seismic response study. The results obtained highlight the goodness of the design idea and the resolution of the previously exposed critical issues, which are difficult to solve with traditional methods. On the one hand, the relative displacements between the independent bodies at the joints are drastically reduced, becoming such as to satisfy the hammering checks with margin; on the other hand, almost all the work is concentrated in the basement, used as a parking lot. In this regard, the results on the superstructure relating to the Post Operam model show that the beam and pillar elements remain substantially in the elastic field and the shear stresses do not exceed the strengths obtained on the transverse reinforcements, consequently both the ductile and fragile mechanisms are satisfied.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] Gazzetta Ufficiale n. 105 dell'8 maggio 2003. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei ministri 20 marzo 2003, n. 3274 – “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica”.
- [2] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (2008), “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”.
- [3] Ministero dei lavori pubblici (1996), “Norme tecniche per il calcolo, l'esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche”.
- [4] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti (2018), “Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”.
- [5] European Committee for Standardization (2005), “Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance” - Part 2: Bridges.
- [6] European Committee for Standardization (2018), “UNI EN 15129. Anti-seismic devices”.