



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO**

**Dipartimento di Ingegneria Civile**

*Dottorato di Ricerca  
in  
Rischio e sostenibilità  
nei sistemi dell'ingegneria civile, edile ed ambientale*

**XXX Ciclo (2014-2017)**

**Abstract and Conclusions**

**Caratterizzazione del Comportamento Statico e Dinamico  
delle Strutture Monumentali**

***Francesco Sicignano***

***Il Tutor***

***Prof. Luigi Petti***

***Il Co-Tutor***

***Prof. Gennaro Miccio***

**Il Coordinatore**

***Prof. Fernando Fraternali***

## ABSTRACT

The study of the static and dynamic behaviour of the architectural heritage of historical-artistic value made up of rigid stone blocks is a topic of particular interest in the field of modern Seismic Engineering. Such knowledge, in fact, is indispensable for the planning of correct maintenance for the conservation of this type of cultural heritage, especially in conditions of natural and human-induced risks.

Among these types of artifacts, the Neptune Temple (also called Poseidònion) located inside the Archaeological Park of Paestum (southern Italy) and a case study of this research, is an emblem for the architectural, sculptural, constructional and structural aspects. It is also unique in the international panorama for its state of conservation, still complete of the whole trabeation and the two pediments.

The work describes the study and the research in progress in this area, illustrating the main results obtained by in-depth theoretical studies of the static and dynamic behaviour of rigid block, from experimental investigations carried out both in the laboratory and on site. These last were conducted under the patronage of ICOMOS Italia and the Archaeological Park of Paestum. These studies and research have the objective of evaluating the static and dynamic behaviour of the main building blocks of the Temple and, also, evaluating their safety about seismic actions.

The present work develops illustrating, first of all, the case study, in particular, the historical and urban aspects of the ancient Greek city of Paestum. The architectural and structural features of the Neptune Temple have been illustrated, and finally, an analysis of the principles and construction techniques used by the ancient Greeks for the realization of these monumental works was carried out.

Hereafter a description of the mathematical and analytical relationships present in the literature and representative of the dynamic behaviour of the individual rigid blocks was conducted. The experimental study carried out on cubic and parallelepiped specimens made by cellular cement is then described. Release tests for the assessment of the mechanical parameters necessary to characterize the dynamic behaviour of the rigid block were carried out to validate the robustness of the theoretical formulations present in the literature representing these parameters.

Subsequently, the on-site experimental investigation is having as object the areas inside and outside the Neptune Temple are described, to provide information for a better interpretation and knowledge of the structures of the Temple, placed below the stylobate (not visible to the observer) and the geology of the area where the Temple is located. In particular, several subsurface surveys were carried out using different survey methods, like GPR (Ground Probing Radar) surveys, geoelectrical surveys (tomography and MASW) and geognostic. Each of these survey methodologies can provide information that will be compared and integrated with the others when an integral model of the whole monument and its substratum will be performed, from the static and dynamic point of view, namely the response of the monument to seismic stress. The experimental investigation is a part of the "*TeSSPACS project*" – *Tendon System for*

*Seismic Protection of the Antique Column Structures*, promoted by the Superintendence for the Archaeological Heritage of Salerno, Avellino, Benevento and Caserta in partnership with the National Archaeological Museum of Paestum and in collaboration with the Universities of Salerno and Kassel (Germany).

The results obtained have allowed, therefore, a preliminary valuation of the safety of the single columns about the expected seismic events, through the use of non-linear static procedures, known as *push-over* analysis.

All the following part that will be illustrated represents the first step of a broader study and research campaign to be conducted by the Department of Civil Engineering of the University of Salerno whose goal is to identify a numerical and analytical model that permits to describe the dynamic behaviour of Monumental structures constituted by rigid blocks.

It will be, therefore, able to carry out the analysis of the seismic vulnerability of such works and then define any actions to be taken for maintenance and conservation of the same.

## **ABSTRACT**

Lo studio del comportamento statico e dinamico del patrimonio architettonico di valore storico-artistico costituito da blocchi lapidei rigidi è un argomento di particolare interesse nell'ambito della moderna ingegneria sismica. Tali conoscenze, infatti, risultano indispensabili per la programmazione di una corretta manutenzione ai fini della conservazione di tale tipologia di patrimonio culturale soprattutto in condizioni di rischio, indotto da hazard naturali ed antropici.

Tra tali tipologia di manufatti il Tempio di Nettuno (detto anche Poseidònion) ubicato all'interno del Parco Archeologico di Paestum e caso studio della presente ricerca, rappresenta un emblema per gli aspetti architettonici, scultorei, costruttivi e strutturali, e risulta inoltre unico nel panorama internazionale per il suo stato di conservazione, completo ancora dell'intera trabeazione e dei due frontoni.

Il lavoro descrive lo studio e la ricerca in corso in tale ambito, illustrando i principali risultati ottenuti da studi teorici di approfondimento del comportamento statico e dinamico del "blocco rigido", da indagini sperimentali svolte sia in laboratorio e sia sito, quest'ultime, sono state condotte con il patrocinio di ICOMOS Italia e del Parco Archeologico di Paestum. Tali studi e ricerche hanno l'obiettivo di valutare il comportamento statico e dinamico dei principali elementi costitutivi il tempio ed inoltre valutare preliminarmente la sicurezza degli stessi nei confronti delle azioni sismiche.

Il presente lavoro si sviluppa illustrando, in primis, il caso studio, in particolar modo sono stati descritti gli aspetti storici ed urbanistici dell'antica città greca di Paestum, sono state illustrate le caratteristiche architettoniche e strutturali del tempio di Nettuno, ed in fine, è stata effettuata

un'analisi dei principi e delle tecniche costruttive utilizzate dagli antichi greci per la realizzazione di tali opere monumentali.

In seguito si è passati a descrivere le relazioni matematiche ed analitiche presenti in letteratura e rappresentative del comportamento dinamico dei singoli blocchi rigidi. Successivamente viene descritto lo studio sperimentale condotto in laboratorio su provini cubici e parallelepipedi in cemento cellulare. Sono state effettuate prove di richiamo e di rilascio per l'assessment dei parametri meccanici necessari a caratterizzare il comportamento dinamico del blocco rigido e validare la robustezza delle formulazioni teoriche presenti in letteratura rappresentative di tali parametri.

Successivamente vengono descritte le prove sperimentali in sito che hanno avuto come oggetto le aree interne ed esterne al tempio di Nettuno, ubicato all'interno del Parco Archeologico di Paestum, al fine di fornire informazioni relative ad una migliore interpretazione e conoscenza delle strutture del tempio poste al di sotto dello stilobate, quindi non visibili all'osservatore, e della geologia dell'area ove è ubicato il tempio. In particolare, sono state eseguite una serie di prospezioni del sottosuolo utilizzando metodologie di indagine differenti, ovvero, indagini GPR (Ground Probing Radar), indagini geoelettriche (tomografia e MASW) e geognostiche. Ognuna di tali metodologie di indagine è in grado di fornire una serie di informazioni che andranno confrontate ed integrate con le altre in previsione di una modellazione integrale del monumento e del suo substrato dal punto di vista del comportamento statico e dinamico dello stesso, ovvero della risposta del monumento alle sollecitazioni sismiche. Parte della campagna sperimentale eseguita confluisce nell'ambito del progetto "TeSSPACS" - Tendon System for Seismic Protection of Antique Column Structures, promosso dalla Soprintendenza Archeologia, belle arti e paesaggio per le province di Salerno e Avellino insieme con il museo archeologico nazionale di Paestum ed in collaborazione con le Università di Salerno e di Kassel (Germania).

I risultati ottenuti hanno permesso, quindi, una stima preliminare della sicurezza delle singole colonne nei confronti degli eventi sismici attesi, mediante l'uso di procedure statiche non lineari, note come analisi push-over.

Quanto verrà di seguito illustrato rappresenta il primo step di una più ampia campagna di studi e ricerche che sarà condotta dal Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno il cui obiettivo è quello di individuare un modello numerico ed analitico che consente di descrivere il comportamento dinamico di strutture monumentali costituite da blocchi rigidi e quindi poter effettuare l'analisi della vulnerabilità sismica di tali opere e quindi definire le eventuali azioni da intraprendere ai fini della manutenzione e conservazione delle stesse.

## **CONCLUSIONS**

The preservation of monumental architectures characterized by complex static and dynamic behaviors, such as structures made of rigid blocks, requires advanced approaches and methods of

analysis, based on the mathematical characterization of the real non-linear behaviour of the several elements that constitute the structure.

The work presented the results of extensive research on the Neptune Temple in Paestum. The studies in progress allow performing numerical models of the behaviour of the rigid block based on experimental results obtained from on-site and laboratory experiments.

In particular, from the tests carried out in the laboratory, the main mechanical parameters descriptive of the dynamic behaviour of the block were found. For example the vibration period, the restitution coefficient and the equivalent damping factor, depend not only on the geometry of the block, but also on the initial conditions of the motion and above all from the type of material on which the block is placed, as the roughness and stiffness influence the response of the block over time. These observations are of particular importance since the descriptive, theoretical formulations of the dynamic behaviour of the block in the literature depend only and exclusively on the geometry of the block itself, and there is no reference to the materials of the block and the surface on which it is placed. Moreover, it is pointed out to the reader that tests in the laboratory on two or more overlapping blocks are underway, with the aim to obtain information on the dynamic behaviour of systems consisting of several blocks and therefore characterized by multiple degrees of freedom.

The experimental investigation led to study the dynamic behaviour of the rigid block. This knowledge is fundamental and of particular importance. For this reason, only downstream it is possible to undertake any action aimed at the maintenance and conservation of the Monumental asset consisting of rigid blocks, as correct planning of any interventions should be made only after an analysis aimed at evaluating the global and local stability of the investigated artifact.

From the tests carried out on site, instead, relevant information of the Temple foundation system, which is made up of travertine blocks placed below the peristyle columns and below the cell, have been obtained. These information, together with the geological data obtained, are fundamental for the continuation of the research waiting for a model of the monument and its substratum from the static and dynamic the point of view, namely the seismic response monument.

Also, characterized the dynamic behaviour of the rigid block and defined the geological conditions of the site of Paestum, it was possible to preliminarily assess the safety factors of the columns of the temple of Neptune about the expected seismic actions through the use of the non-linear static procedure, known as push-over analysis.

From the analyzes carried out, concerning seismic events characterized by a return period of 2475 years, it has been observed that the safety factors preliminarily evaluated for the different collapse mechanisms, that may affect the columns of the Neptune Temple, are particularly high, with values between 7,15 and 8,64. This procedure allowed understanding why these columns, built about 2500 years ago, are still perfectly erect and that the main tangible damage to these structures is due to natural events such as lightning and lightning bolts and, in the worst of, unfortunately, cases are man-induced.

In conclusion, what has been previously described is the first step in a broader study and research to be conducted by the Department of Civil Engineering of the University of Salerno, whose goal is to identify a numerical and analytical model that allows describing the dynamic behaviour of structures monumental constituted by rigid blocks. This model, therefore, could be able to perform the analysis of the seismic vulnerability of such works and then define any actions to be taken for maintenance and conservation of the same.

## CONCLUSIONI

La conservazione di architetture monumentali caratterizzate da comportamenti statici e dinamici complessi, quali le strutture costituite da blocchi rigidi, richiede approcci e metodi di analisi avanzati, basati sulla caratterizzazione matematica del reale comportamento non lineare delle parti che lo costituiscono.

Il lavoro ha presentato i risultati di una vasta ricerca sul tempio di Nettuno a Paestum. Gli studi in corso permettono di eseguire modelli numerici del comportamento del blocco rigido sulla base di risultati sperimentali ottenuti da sperimentazioni in sito ed in laboratorio.

In particolare, dalle prove condotte in laboratorio si è potuto constatare che i principali parametri meccanici descrittivi del comportamento dinamico del blocco, ovvero periodo di oscillazione, coefficiente di restituzione e coefficiente di smorzamento equivalente, dipendono, oltre che dalla geometria del blocco stesso, anche dalle condizioni iniziali del moto e soprattutto dalla tipologia di materiale su cui è posto il blocco, in quanto la scabrezza e la rigidità di quest'ultimo influenzano la risposta nel tempo del blocco. Tali osservazioni risultano di particolare importanza, in quanto le formulazioni teoriche descrittive del comportamento dinamico del blocco presenti in letteratura dipendono solo ed esclusivamente dalla geometria del blocco stesso e non fanno alcun riferimento ai materiali del blocco e dalla superficie su cui esso è posto. Si fa presente al lettore che sono in corso prove di rilascio in laboratorio su due e più blocchi sovrapposti al fine di ottenere informazioni sul comportamento dinamico di sistemi costituiti da più blocchi e quindi caratterizzati da più gradi di libertà.

La campagna sperimentale condotta ha consentito di indagare il comportamento dinamico del blocco rigido. Tale conoscenza risulta estremamente fondamentale e di particolare importanza, pertanto solo a valle di essa è possibile intraprendere qualsiasi azione rivolta alla manutenzione ed alla conservazione del bene monumentale costituito da blocchi rigidi, in quanto una corretta programmazione degli eventuali interventi andrebbe redatta solo a valle di un'analisi finalizzata alla valutazione della stabilità globale e locale del manufatto indagato.

Invece, dalle prove condotte in sito, si sono ottenute importanti informazioni sul sistema di fondazione del tempio che risulta essere costituito da blocchi di travertino posti al di sotto delle colonne del peristilio ed al disotto della cella. Tali informazioni, unitamente a quelle di natura geologica ottenute, risultano fondamentali per il prosieguo della ricerca in previsione di una modellazione integrale del monumento e del suo substrato dal punto di vista del comportamento statico e dinamico dello stesso, ovvero della risposta del monumento alle sollecitazioni sismiche.

In conclusione, caratterizzato il comportamento dinamico del blocco rigido e definite le condizioni geologiche del sito di Paestum, è stato possibile valutare preliminarmente i fattori di sicurezza delle colonne del tempio di Nettuno nei confronti delle azioni sismiche attese mediante l'uso di procedure statiche non lineari, note come analisi push-over.

Dalle analisi effettuate, con riferimento ad eventi sismici caratterizzati da un periodo di ritorno di 2475, si è potuto osservare che i fattori di sicurezza valutati in maniera preliminare per i diversi meccanismi di collasso per ribaltamento che possono interessare le colonne del tempio di Nettuno risultano particolarmente elevati, con valori compresi tra 7,15 ed 8,64. Ciò ci ha permesso di comprendere il motivo per il quale tali colonne, costruite circa 2500 anni fa, risultano ancora perfettamente erette e che i danni principali tangibili su tali strutture risultano ad opera di eventi naturali come i fulmini e le saette e, nella peggiore dei casi, purtroppo, risultano di natura antropica.

Quanto precedentemente esposto rappresenta il primo step di una più ampia campagna di studi e ricerche che sarà condotta dal Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Salerno il cui obiettivo è quello di individuare un modello numerico ed analitico che consente di descrivere il comportamento dinamico di strutture monumentali costituite da blocchi rigidi e quindi poter effettuare l'analisi della vulnerabilità sismica di tali opere e quindi definire le eventuali azioni da intraprendere ai fini della manutenzione e conservazione delle stesse.