



## **When hard sciences help history** **The South-West Quarter of the Palace of Phaistos**

**Paolo Riva - Enrico Ciliberto**  
**University di Bergamo - University of Catania, DSC**

The South-West Quarter is one of the most impressive sectors of the First Palace of Phaistos. Preserved to a total height of 6 meters and divided into three levels (Fig. 1, First Palace of Festòs, South-West Quarter), it was filled after its destruction in part by a fill of cement mixture, called 'astraki', which was so compact that it deformed pickaxes (Fig. 2, First Palace of Festòs, South-West Quarter. Filling in cement mix 'astraki'). For the excavator, Doro Levi, the structure was the result of three different phases of the First Palace, each destroyed by an earthquake and then rebuilt at a higher level, using the astraki as levelling. Levi's hypothesis was not accepted by all scholars: Nicolaos Platon argued that the building was a single palace with three storeys (Nicolaos Platon), while for Athanasia Kanta the astraki was a natural mixture, derived from the collapsed wall mortar hardened by fire. Scientific approaches have made it possible to resolve this debate that has lasted almost 40 years.

### **One palace or three: the engineering approach**

In order to solve the problem of the Levi phases, the engineers Paolo Riva and Sergio Signorini from the University of Bergamo created a three-dimensional solid model of a part of the Levi Quarter, starting from the excavation data (Fig. 3, Finite element model of the central core of the South-West Quarter of the First Palace of Phaistos. Axonometric view from the southwest.). The model was then discretized and analyzed with the finite element code ABAQUS v.5.8 (HKS 1998), using 8-node linear isoparametric solid elements, for a total of 47891 nodes and 35268 elements. The construction behaviour of the architecture and fill was then calculated with reference to what is known for rocks and soils. A seismic analysis was carried out on this model by means of non-linear equivalent static analyses with increasing forces until collapse occurred.

The two hypotheses were then tested. In the first, a three-dimensional model comprising all three planes (Fig. 4, Multi-stage seismic analysis of the Palace. Axonometric view from the southwest) was worked on; in the second, a model analyzing the first and second planes separately (Fig. 5, Seismic analysis of the single multi-storey Palace. Axonometric view from the south-west). The theoretical results obtained were compared with the current state of the ruins in order to observe

whether the collapse mechanism of the structure revealed by the ruins can be interpreted as an evolution of that obtained through numerical analysis.

The elaboration and comparison of the numerical results of these analyses with the current situation observed in situ at Phaistos led to the affirmation that the latter is compatible with the collapse mechanism of a single multi-storey palace, limited to only the first two levels. Not three overlapping buildings, therefore, but a single two-storey building. The third one, which is poorly preserved, could instead be a remake.

Paolo Riva

## **Astraki: the first Portland concrete in history**

**Enrico Ciliberto**  
**University of Catania - DSC**

The astraki appears as a very hard composite material, a real concrete, pinkish-yellow in color, formed from a mortar in which all kinds of inclusions such as fragments of ceramics, stones, material of plant origin are immersed.

In Minoan Crete, astraki was already used in the pre-Palatial period at the end of the Early Palaces for construction purposes as a covering or as a consolidation of wooden structures, as already suggested by Enrica Fiandra. Moreover, at Phaistos astraki was also used for a specific purpose after the earthquake that destroyed the first palace: to fill in the ruins of the ancient building to create a platform on which to build the second.

In order to understand the composition and natural or artificial origin of astraki, Enrico Ciliberto analyzed 15 astraki samples (Fig. 1 and 2) using scanning electron microscopy (SEM), high spatial resolution elemental analysis (EDX), X-ray diffractometry (XRD), thermogravimetry, differential calorimetry and magnetisation measurements at various temperatures (ZFC-FC).

### **The analysis**

The analyses revealed a different composition to that of a mortar normally used in plaster or as a bedding material based on calcium hydroxide, which promotes setting due to interaction with carbon dioxide in the atmosphere. The main element is in fact not calcium as in the case of common air mortars, but silicon, which together with aluminium gives the mixture acidic properties. The ZFC-FC curve showed that the iron oxide contained in astraki is in the form of maghemite, a ferric oxide with the structure of a spinel. In addition, all analyzed samples showed a water loss of about 6 per cent at temperatures between 120°C and 500°C. This suggested the presence of water molecules bound to crystalline silicate phases, namely hydraulic species that caused the material to set by

reaction with water rather than carbon dioxide. It was also demonstrated that the astraki mortar was not subjected to temperatures above 400-500°C during its preparation. The presence of maghemite and aragonite ruled out this possibility. The most plausible hypothesis is that the binder was prepared by mixing calcium oxide (quicklime) with clay and water, thus promoting the extinguishing of lime and the formation of hydraulic species.

## Conclusions

The results of this investigation are of interest because they allowed us to answer the question of whether the astraki was an artificial product or the result of the fire that destroyed the palace. The latter hypothesis was ruled out, as the typical temperatures of devastating fires are above 500°, and the investigation ruled out the possibility that the material had ever been heated in this way. Astraki was therefore an artificial mortar and specifically a hydraulic mortar, unlike the aerial lime used in other contexts. The hydraulic properties of astraki made it possible to fill the cavities formed by masonry bags with a material that set well even in asphyxiated areas and possessed mechanical properties far superior to normal lime mortars.

As in the history of concrete the realisation of hydraulic binders was only realised in modern times by John Smeaton around 1750, it can be said that astraki was the first hydraulic cement in history.

Enrico Ciliberto



## ΟΤΑΝ ΟΙ ΒΑΡΙΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΒΟΗΘΟΥΝ ΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ Η ΝΟΤΙΟΔΥΤΙΚΗ ΣΥΝΟΙΚΙΑ ΤΟΥ ΑΝΑΚΤΟΡΟΥ ΤΗΣ ΦΑΙΣΤΟΥ

**Paolo Riva - Enrico Ciliberto**  
**Πανεπιστήμιο του Μπέργκαμο - Πανεπιστήμιο της Κατάνια, DSC**

Η νοτιοδυτική συνοικία είναι ένας από τους πιο εντυπωσιακούς τομείς του Πρώτου Ανακτόρου της Φαιστού. Διατηρείται σε συνολικό ύψος 6 μέτρων και χωρίζεται σε τρία επίπεδα (Εικ. 1, Πρώτο Ανάκτορο της Φαιστού, Νοτιοδυτική συνοικία), και μετά την καταστροφή του γεμίστηκε εν μέρει με ένα γέμισμα από μίγμα τσιμέντου, το λεγόμενο "αστράκι", το οποίο ήταν τόσο συμπαγές που παραμόρφωνε τις αξίνες (Εικ. 2, Πρώτο Ανάκτορο της Φαιστού, Νοτιοδυτική

συννοικία. Συμπλήρωση με τσιμεντοκονίαμα "αστράκι"). Για την ανασκαφέα Doro Levi, η δομή ήταν το αποτέλεσμα τριών διαφορετικών φάσεων του Πρώτου Ανακτόρου, κάθε μία από τις οποίες καταστράφηκε από σεισμό και στη συνέχεια ανοικοδομήθηκε σε υψηλότερο επίπεδο, χρησιμοποιώντας το αστράκι ως ισοπέδωση. Η υπόθεση του Levi δεν έγινε αποδεκτή από όλους τους μελετητές: Ο Νικόλαος Πλάτων υποστήριξε ότι το κτίριο ήταν ένα ενιαίο ανάκτορο με τρεις ορόφους (Νικόλαος Πλάτων), ενώ για την Αθανασία Κάντα το αστράκι ήταν ένα φυσικό μείγμα, προερχόμενο από το κονίαμα των τοίχων που κατέρρευσαν και στερεοποιήθηκε από τη φωτιά. Οι επιστημονικές προσεγγίσεις κατέστησαν δυνατή την επίλυση αυτής της διαμάχης που διήρκεσε σχεδόν 40 χρόνια.

### **Ένα ανάκτορο ή τρία: η προσέγγιση της μηχανικής**

Προκειμένου να επιλύσουν το πρόβλημα των φάσεων της Λεβής, οι μηχανικοί Paolo Riva και Sergio Signorini από το Πανεπιστήμιο του Μπέργκαμο δημιούργησαν ένα τρισδιάστατο στερεό μοντέλο ενός τμήματος της συννοικίας της Λεβής, ξεκινώντας από τα ανασκαφικά δεδομένα (Εικ. 3, Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του κεντρικού πυρήνα της νοτιοδυτικής συννοικίας του πρώτου ανακτόρου της Φαιστού. Αξονομετρική άποψη από τα νοτιοδυτικά). Στη συνέχεια, το μοντέλο διαχωρίστηκε και αναλύθηκε με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS v.5.8 (HKS 1998), χρησιμοποιώντας γραμμικά ισοπαραμετρικά στερεά στοιχεία 8 κόμβων, για συνολικά 47891 κόμβους και 35268 στοιχεία. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η κατασκευαστική συμπεριφορά της αρχιτεκτονικής και της πλήρωσης με βάση τα γνωστά για τα πετρώματα και τα εδάφη. Στο μοντέλο αυτό πραγματοποιήθηκε σεισμική ανάλυση μέσω μη γραμμικών ισοδύναμων στατικών αναλύσεων με αυξανόμενες δυνάμεις μέχρι να επέλθει κατάρρευση.

Στη συνέχεια ελέγχθηκαν οι δύο υποθέσεις. Στην πρώτη, ένα τρισδιάστατο μοντέλο που περιλάμβανε και τα τρία επίπεδα (Σχ. 4, Σεισμική ανάλυση πολλαπλών σταδίων του παλατιού. Αξονομετρική άποψη από τα νοτιοδυτικά)- στο δεύτερο, ένα μοντέλο που ανέλυε το πρώτο και το δεύτερο επίπεδο χωριστά (Σχ. 5, Σεισμική ανάλυση του ενιαίου πολυώροφου Ανακτόρου. Αξονομετρική άποψη από τα νοτιοδυτικά). Τα θεωρητικά αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με την τρέχουσα κατάσταση των ερειπίων προκειμένου να παρατηρηθεί κατά πόσον ο μηχανισμός κατάρρευσης της δομής που αποκαλύπτεται από τα ερείπια μπορεί να ερμηνευθεί ως εξέλιξη εκείνου που προέκυψε από την αριθμητική ανάλυση.

Η επεξεργασία και η σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων αυτών των αναλύσεων με την τρέχουσα κατάσταση που παρατηρείται επί τόπου στη Φαιστό οδήγησε στην επιβεβαίωση ότι η τελευταία είναι συμβατή με τον μηχανισμό κατάρρευσης ενός ενιαίου πολυώροφου ανακτόρου, που περιορίζεται μόνο στα δύο πρώτα επίπεδα. Επομένως, όχι τρία επικαλυπτόμενα κτίρια, αλλά ένα

ενιαίο διώροφο κτίριο. Το τρίτο, το οποίο σώζεται ελάχιστα, θα μπορούσε, αντίθετα, να είναι μια ανακατασκευή.

Paolo Riva

## **ΤΟ ΑΣΤΡΑΚΙ: ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ**

**Enrico Ciliberto**  
**University of Catania - DSC**

Το αστράκι εμφανίζεται ως ένα πολύ σκληρό σύνθετο υλικό, ένα πραγματικό σκυρόδεμα, ροζ-κίτρινου χρώματος, το οποίο σχηματίζεται από ένα κονίαμα στο οποίο είναι βυθισμένα όλα τα είδη εγκλεισμάτων, όπως θραύσματα κεραμικών, πέτρες, υλικά φυτικής προέλευσης.

Στη μινωική Κρήτη, το αστράκι χρησιμοποιήθηκε ήδη από την προ-ανακτορική περίοδο, στο τέλος των πρώτων ανακτόρων, για κατασκευαστικούς σκοπούς ως επένδυση ή ως παγίωση ξύλινων κατασκευών, όπως έχει ήδη προτείνει η Enrica Fiandra. Επιπλέον, στη Φαιστό το αστράκι χρησιμοποιήθηκε επίσης για έναν συγκεκριμένο σκοπό μετά τον σεισμό που κατέστρεψε το πρώτο ανάκτορο: για να γεμίσει τα ερείπια του αρχαίου κτιρίου ώστε να δημιουργηθεί μια πλατφόρμα πάνω στην οποία θα χτιζόταν το δεύτερο.

Προκειμένου να κατανοήσει τη σύνθεση και τη φυσική ή τεχνητή προέλευση του αστρακίου, ο Enrico Ciliberto ανέλυσε 15 δείγματα αστρακίου (Εικ. 1 και 2) χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), στοιχειακή ανάλυση υψηλής χωρικής ανάλυσης (EDX), περιθλασιμετρία ακτίνων Χ (XRD), θερμοβαρυμετρία, διαφορική θερμιδομετρία και μετρήσεις μαγνήτισης σε διάφορες θερμοκρασίες (ZFC-FC).

### **Η ανάλυση**

Οι αναλύσεις αποκάλυψαν μια σύνθεση διαφορετική από εκείνη ενός κονιάματος που χρησιμοποιείται συνήθως σε σοβάδες ή ως υλικό στρωσίματος με βάση το υδροξείδιο του ασβεστίου, το οποίο προάγει την πήξη λόγω της αλληλεπίδρασης με το διοξείδιο του άνθρακα της ατμόσφαιρας. Στην πραγματικότητα, το κύριο στοιχείο δεν είναι το ασβέστιο, όπως στην περίπτωση των κοινών κονιαμάτων αέρα, αλλά το πυρίτιο, το οποίο μαζί με το αλουμίνιο προσδίδει στο μείγμα όξινες ιδιότητες. Η καμπύλη ZFC-FC έδειξε ότι το οξείδιο του σιδήρου που περιέχεται στο αστράκι έχει τη μορφή του μαγκεμίτη, ενός οξειδίου του σιδήρου με δομή σπινέλιου. Επιπλέον, όλα τα δείγματα που αναλύθηκαν παρουσίασαν απώλεια νερού περίπου 6 % σε θερμοκρασίες μεταξύ 120°C και 500°C. Αυτό υποδήλωνε την παρουσία μορίων νερού συνδεδεμένων με κρυσταλλικές πυριτικές φάσεις, την παρουσία, τελικά, υδραυλικών ειδών που προκαλούσαν την πήξη του υλικού με αντίδραση με νερό

και όχι με διοξείδιο του άνθρακα. Αποδείχθηκε επίσης ότι το αστρωματικό κονίαμα δεν υποβλήθηκε σε θερμοκρασίες άνω των 400-500°C κατά την παρασκευή του. Η παρουσία μαγνημίτη και αραγωνίτη απέκλεισε αυτό το ενδεχόμενο. Η πιο πιθανή υπόθεση είναι ότι το συνδετικό υλικό παρασκευάστηκε με ανάμιξη οξειδίου του ασβεστίου (ασβέστης) με άργιλο και νερό, προωθώντας έτσι την απόσβεση του ασβέστη και το σχηματισμό υδραυλικών ειδών.

### **Συμπεράσματα**

Τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας παρουσιάζουν ενδιαφέρον, διότι μας επέτρεψαν να απαντήσουμε στο ερώτημα αν το αστράκι ήταν τεχνητό προϊόν ή αποτέλεσμα της πυρκαγιάς που κατέστρεψε το ανάκτορο. Η τελευταία υπόθεση αποκλείστηκε, καθώς οι τυπικές θερμοκρασίες των καταστροφικών πυρκαγιών είναι πάνω από 500° και η έρευνα απέκλεισε την πιθανότητα το υλικό να είχε ποτέ θερμανθεί με αυτόν τον τρόπο. Το Αστράκι ήταν επομένως ένα τεχνητό κονίαμα και συγκεκριμένα ένα υδραυλικό κονίαμα, σε αντίθεση με τον εναέριο ασβέστη που χρησιμοποιούνταν σε άλλα περιβάλλοντα. Οι υδραυλικές ιδιότητες του αστακίου κατέστησαν δυνατή την πλήρωση των κοιλοτήτων που σχηματίζονταν από τους σάκους τοιχοποιίας με ένα υλικό που πήγαινε καλά ακόμη και σε ασφυκτικές περιοχές και διέθετε μηχανικές ιδιότητες πολύ ανώτερες από τα κανονικά ασβεστοκονιάματα.

Δεδομένου ότι στην ιστορία του σκυροδέματος, τα τυπικά υδραυλικά συνδετικά υλοποιήθηκαν μόνο στη σύγχρονη εποχή από τον John Smeaton γύρω στο 1750, μπορεί να ειπωθεί ότι το αστράκι ήταν το πρώτο υδραυλικό τσιμέντο στην ιστορία.

Enrico Ciliberto