



COMUNE DI CROTONE

MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
Direzione Generale per i beni Culturali e Paesaggistici della Calabria
Sovrintendenza per i beni archeologici della Calabria

-Crotone Museo REL diaframmi 03/2014

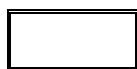
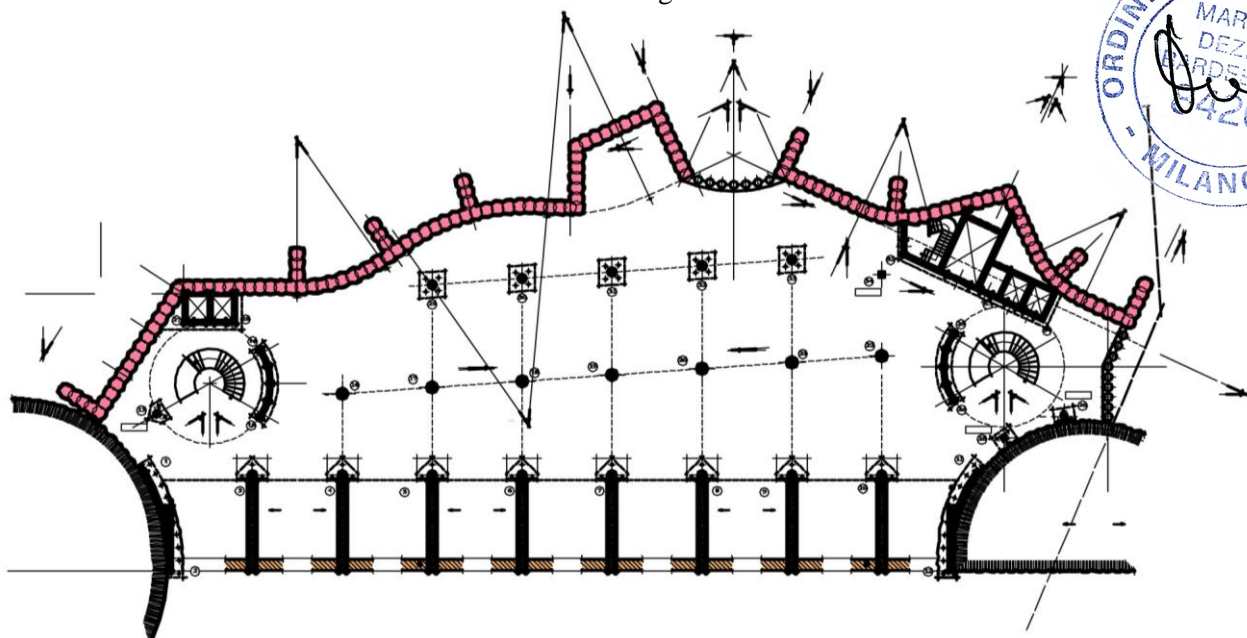
REALIZZAZIONE DEL "NUOVO MUSEO ARCHEOLOGICO NAZIONALE" (Da ricavarsi internamente alla "Cortina Sud" del Castello di Carlo V a Crotone)

(5)- PROGETTO STRUTTURALE ELABORATO: (ST.5.01)

- *- RELAZIONE TECNICA SUI DIAFRAMMI POSTI A CONTENIMENTO DEI TERRAPIENI
- *- ANALISI GEOTECNICA SUI TERRENI E VALUTAZIONI STATICHE SUI MANUFATTI DI CUI SOPRA

Il R.U.P.:
STRUTTURA:

Elisabetta Antonia Dominijanni
Vincenzo Felice Maria Dragonetti



In evidenza il diaframma sezionato
al livello di fondazione

Progettista e coordinatore : **Marco Dezzi Bardeschi**
Il Tecnico strutturista: **Alessandro Melani**

CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Per una descrizione generale del museo, si rimanda alla relazione tecnica (ST.1.1). La costruzione verrebbe realizzata internamente al Castello, in adiacenza alla cosiddetta "Cortina Sud". L'intera volumetria sarebbe da ricavarsi in interrato, delimitata verso valle dalla cortina stessa e verso monte da un diaframma in C.A. capace di assicurare il contenimento del terrapieno posteriore. Il diaframma, vista la compattezza dei terreni, verrebbe realizzato con una sequenza continua di pali secanti di grosso diametro. La sua esecuzione costituirà un'ope-



COMUNE DI CROTONE

MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
Direzione Generale per i beni Culturali e Paesaggistici della Calabria
Sovrintendenza per i beni archeologici della Calabria

ra di notevole impegno statico, dal momento che lo scavo di splateamento entro il quale v'è inserito l'edificio, dovrebbe essere condotto per una profondità di oltre **19,00 mt.** (Si prevede di raggiungere quota **+19,80 mt.**, partendo dal livello attuale del terrapieno, a $\approx +39,00$ mt.) Lo scavo dovrà avvenire in **tre sequenze successive**, come già ben descritto sulla relazione generale. L'importanza del diaframma che in questa sede viene esaminato in dettaglio, sta nelle dimensioni e nel relativo costo, che da solo costituirà ben il **35%** dell'impegno economico necessario per la realizzazione di tutte le opere strutturali del Museo. Per dare un'idea del manufatto, basti pensare che questo si svilupperà su di una lunghezza di oltre **101 mt** a cui vanno aggiunti anche cinque contrafforti interni. L'altezza complessiva viene stimata in \approx **28,00 mt.** Per la sua realizzazione sarà necessario eseguire ben **133 pali trivellati** in C.A. del diametro ϕ **1000**, con uno sviluppo lineare complessivo di oltre **3.720 mt** ed una cubatura di CLS stimabile in almeno **3.350 mc.**

La necessità di dover prevedere un diaframma staticamente così impegnativo, ha condizionato fin dalle prime fasi la progettazione del museo. Dalle piante si osserva infatti un andamento curvilineo del perimetro di chiusura verso monte, appositamente studiato per meglio contrastare le spinte del terreno (ed anche per adattarsi alle preesistenze storiche presenti nell'intorno). Inoltre **occorreva evitare il tirantaggio del diaframma**, prassi comunemente adottata anche per altezze assai inferiori.

Nel nostro caso si dovevano evitare perforazioni attraversanti stratificazioni di terreno che potrebbero contenere resti archeologici. Questo ultimo fatto, come vedremo, condizionerà la realizzazione dell'opera, imponendo alcune complicazioni nella successione delle fasi esecutive. Il tutto è stato già ben descritto in relazione generale. La mancanza delle tirantature, sia pur in presenza di un andamento curvilineo del diaframma e dei vari contrafforti, ci rende impossibile l'esecuzione di uno scavo completo in una unica fase. Si prevede infatti una prima fase di scavo per una profondità di \approx **9,30 mt** dalla testa del palo (quota **+27,00 mt s.l.m.**) Per poter completare lo scavo, raggiungendo la profondità di \approx **16,60 mt.** (quota **+19,70 mt**) occorrerà prima eseguire un orizzontamento di contrasto al diaframma. La struttura di contrasto è prevista a quota **+27,75 mt** in estradosso. (Vedi tabelle illustrative delle diverse fasi).

CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI PRESENTI

Lo studio dei terreni interessati dall'infissione del diaframma è stato oggetto di una campagna di rilevamento geognostico recentemente eseguita a tale scopo. Le indagini sono state sviluppate attraverso l'esame di sondaggi geognostici e profili sismici. I due sondaggi, condotti fino alla



COMUNE DI CROTONE

MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
Direzione Generale per i beni Culturali e Paesaggistici della Calabria
Sovrintendenza per i beni archeologici della Calabria

profondità di **35,00 mt**, sono stati ubicati leggermente a valle rispetto alla posizione del diaframma e dovrebbero perciò essere cautelativi specie rispetto alle profondità dei tetti stratigrafici riscontrati. Le indagini sismiche sono state utilizzate per correlare insieme i risultati dei due sondaggi, distanti fra loro di **≈55,00 mt**. . Rimandando per ogni altro dettaglio all' esame della relazione geologica redatta dalla società "S.G.G. s.r.l." di Siena, ci si limita in questa sede a riportare i parametri geotecnici dei terreni attraversati dal diaframma. Sulla base delle prove effettuate, si rileva la presenza nel tratto considerato, di una stratificazione costituita da DUE livelli principali, ben definiti e differenziati fra loro. Volendo operare una descrizione più compiuta dei terreni di fondazione, si può indicare la seguente successione stratigrafica:

LIVELLO A: dal livello del piazzale ($\approx +39,00\text{mt}$ s.l.m.) e fino alla profondità di circa **8,50/9,00 mt.**, si rilevano terreni di riporto costituiti da **frammenti lapidei in matrice sabbioso-limosa**, il tutto con un leggero grado di cementazione fra le parti. Trattasi del riempimento effettuato negli anni '60 del novecento, dopo la ricostruzione della "Cortina Sud".

LIVELLO B: Al di sotto dei terreni di riempimento, si rileva la presenza del substrato argilloso, costituito da **argille grigio-azzurre fossilifere compatte** di notevole consistenza.

Solo localmente, (sondaggio 2°), si rileva presenza di un livello di **sabbie fini limose** aventi uno spessore massimo di **4,00-5,00mt**. In realtà si può supporre che questo strato risultasse molto più esteso verso la superficie e che sia stato quello interessato dalla frana del 1938 che provocò la rovina della Cortina Sud del castello

In base alle prove eseguite dai campioni ricavati nel corso dei sondaggi ed in particolare con riferimento ai risultati delle prove SPT, sono state determinate le caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni con le seguenti caratteristiche :

LIVELLO "A" $\varphi' = 38^\circ$; $C' \approx 0,0$ kg/cmq; $K_a = 0,24$ $K_p = 8,00$
 $K_o = 0,5$; $E_{vc} = 2.000$ kg/cmq $E_{vr} = 2.100$ kg/cmq
 $\gamma_1 = 1.850$ kg/mc.

LIVELLO "B" $\varphi' = 26^\circ$; $C' \approx 1,70$ kg/cmq; $K_a = 0,40$ $K_p = 6,00$
 $K_o = 0,4$; $E_{vc} = 6.000$ kg/cmq $E_{vr} = 6.500$ kg/cmq
 $\gamma_1 = 2.050$ kg/mc.

Quanto al livello, solo parzialmente presente e di scarso interesse, delle sabbie fini limose, vengono attribuiti, in modo approssimativo i seguenti parametri: $\varphi' = 37^\circ$; $C' \approx 0,1$ kg/cmq

$\gamma_1 = 1.900$ kg/mc. In realtà le sabbie limose devono essere molto più presenti di quanto appaia e originariamente occupavano gran parte dello strato ove oggi è presente il detrito. guardando alcune immagini aeree scattate durante la ricostruzione della cortina si rileva una



COMUNE DI CROTONE

MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
Direzione Generale per i beni Culturali e Paesaggistici della Calabria
Sovrintendenza per i beni archeologici della Calabria

scarpate che dovrebbe identificarsi con il fronte stesso della frana, verificatasi oltre venti anni prima. In base alla posizione dovrebbe corrispondere con lo strato di sabbie limose che, in assenza del livello "A" di riporto, si estendevano fin quasi alla sommità del terrapieno. Certo è che dalle foto viene da pensare a **sabbie fortemente cementate** perché l'angolo d'attrito valutabile dalle immagini è notevolmente maggiore dei 37° indicati.

Con i dati ottenuti dall'indagine sismica sul livello "B" dell'area in oggetto, si è ottenuto per il parametro V_{s30} un valore superiore a 400 m/s, che corrisponde ad una classificazione del suolo di fondazione in "**Categoria C.**"

INQUADRAMENTO SULLE PROCEDURE DI CALCOLO CHE SI PREVEDE DI ADOTTARE PER LA VERIFICA DEL DIAFRAMMA:

Un'analisi statica rigorosa del diaframma appare molto complessa viste tutte le condizioni descritte: La forma variamente curvilinea e la presenza dei numerosi contrafforti porterà sicuramente una redistribuzione sollecitazionale che dipende molto anche dalla rigidità della trave di collegamento posta in sommità al diaframma. Anche le diverse fasi di scavo e la presenza degli elementi di contrasto aggiunti, generano ulteriori variabili in quanto verrà prevista una storia di carico avente una successione ben precisa.

Mentre generalmente gli sforzi nel diaframma variano solo in funzione della quota, nel nostro caso avremo sollecitazioni continuamente diverse e variabili per tutti i punti degli oltre **2.800** mq del manufatto. Il problema sarà affrontabile in sede di progetto esecutivo, utilizzando programmi di calcolo molto sofisticati che possano ricostruire tridimensionalmente l'intero diaframma insieme alla struttura dell'edificio che vi risulterà solidarizzato assieme. Il tutto, inserito entro ad un mezzo continuo avente le caratteristiche ben definite del terrapieno nei suoi diversi strati componenti.. In fase di "progetto definitivo", si ritiene sufficiente esaminare il diaframma studiandone le sollecitazioni su di un tratto isolato e formulando diverse ipotesi-limite fra le quali sia contenuta sicuramente quella di reale comportamento. Il dimensionamento effettuato in base a tali condizioni, sicuramente penalizzanti rispetto alla realtà, potrà eventualmente essere rivisto e ridotto, almeno in termini di armature, in sede di "progetto esecutivo".

INDIVIDUAZIONE DI UN MODELLO DI CALCOLO SEMPLIFICATO

Il diaframma verrà studiato secondo uno schema tradizionale che ne esamina il tronco unitario, considerato come isolato dalle porzioni adiacenti. In questo modo si perdono completamente



COMUNE DI CROTONE

MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
Direzione Generale per i beni Culturali e Paesaggistici della Calabria
Sovrintendenza per i beni archeologici della Calabria

gli effetti planimetrici di forma ed i contributi dei contrafforti, molto forti secondo la geometria di progetto. Per recuperarli almeno in parte, si ipotizza un'azione svolta della trave irrigidente posta in sommità al diaframma. Questa ultima potrà esercitare una forza orizzontale di contrasto che si oppone alla rotazione del manufatto per effetto delle spinte dei terreni e quindi alla sua traslazione in sommità.

Il problema sta nella **determinazione di una forza realistica, simile a quella che la trave potrà veramente esercitare sulla testa del diaframma.** Come vedremo nelle analisi svolte, (fascicolo "ST.4.2"), l'entità dell'azione potrà essere verosimilmente ottenuta consentendo uno spostamento in sommità al diaframma che sia ragguagliabile con la deformazione flessionale della travata. Rimarrà poi da verificare che la trave sia in grado di assorbire lo sforzo necessario ad effettuare il contenimento del diaframma ed a trasferirlo ai contrafforti.

Nel nostro caso la trave di irrigidimento ha una sezione resistente ($b \times h$), sul piano orizzontale di **(1,20 x 2,00) mt.** Con un $W_{yy} = 800.000$ cm³. La travata lavorerà deformandosi sul piano orizzontale fino a trasferire lo sforzo di contenimento fino ad uno spigolo o ad un contrafforte che opereranno come vincolo di appoggio. Esaminando la planimetria d'insieme, si possono individuare quattordici punti di ritegno per la travata, con campiture che in nessun caso superano la lunghezza di $\approx 9,00$ mt. La verifica statica della membratura verrà effettuata semplicemente secondo lo schema di trave a campata unica, supposta come semincastrata alle estremità. L'entità della forza orizzontale distribuita in campata viene individuata in 8.000 kg/m (Vedi in seguito). Tutte queste ipotesi, molto semplificative e penalizzanti della realtà, offrono margini di sicurezza così elevati sulla resistenza della trave, che non inducono ad approfondire oltre il problema.

LE IPOTESI LIMITE INDIVIDUATE PER L'ANALISI DEL DIAFRAMMA

Fermo rimanendo il principio di esaminare il diaframma su di un tronco rettilineo, disgiunto per l'intera altezza dalle porzioni rimanenti, occorrerà verificare diverse condizioni temporanee, corrispondenti alle varie fasi di scavo ed allo stato di avanzamento dei lavori.

Una volta completato il diaframma e la trave di irrigidimento posta in sommità, Le TRE condizioni considerate come **caratteristiche e di massima criticità**, sono state così individuate :

Condizione (**1^a**) (SCAVO DI PRIMA FASE): Si realizza lo scavo a valle del diaframma fino alla profondità di $\approx -9,30$ mt dalla testa del palo (quota $+27,00$ mt s.l.m.)

Condizione (**2^a**) (ESECUZIONE DELLA SOLETTA DI CONTRASTO): Si realizza una



COMUNE DI CROTONE

MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
Direzione Generale per i beni Culturali e Paesaggistici della Calabria
Sovrintendenza per i beni archeologici della Calabria

soletta di contrasto a valle del diaframma, ad un livello di **-8,55 mt** dalla testa del palo (quota **+27,75 mt** in estradosso). Lo scavo rimane inalterato alla quota \approx **9,30 mt**

Condizione (**3^a**) (SCAVO DI SECONDA FASE): Si continua a scavare a valle del diaframma, al di sotto della soletta e fino alla quota \approx **-16,60 mt** dalla testa del palo (quota **+19,80 mt** s.l.m.)

Non sarà necessario effettuare verifiche della condizione finale in quanto, ad opere complete, ci saranno una platea di fondazione e ben cinque orizzontamenti in elevato che, a quote diverse forniranno contrasto al diaframma. In questo stato le sollecitazioni risultano assai ridotte rispetto a quelle delle fasi preliminari.

Una volta individuate le condizioni di massima criticità, rimane da valutare l'effetto di contenimento che la trave di sommità potrà a svolgere sul diaframma. Tale effetto si esplica in un'azione di ritegno esercitata alla testa dei pali e variabile in funzione della posizione in pianta; tutto ciò per effetto della forma curvilinea del diaframma, della presenza di spigoli o di contrafforti nelle adiacenze.

Per comprendere tutte le casistiche possibili, si assumono due ipotesi limite fra le quali saranno senz'altro comprese le condizioni reali.

La prima ipotesi, denominata "A", prevede un diaframma deformabile nella lunghezza ma bloccato in sommità. Naturalmente per mantenere il vincolo, la trave di sommità dovrebbe essere infinitamente rigida ed esercitare un'azione di contrasto variabile per ciascuna delle TRE condizioni caratteristiche descritte. Sviluppando la verifica del diaframma mediante appositi codici di calcolo, si ottengono come necessarie per tenere bloccata la sommità, le seguenti forze di contrasto: **8.575, 10.840 e 10.800 kg/mt.** (vengono considerate rispettivamente le condizioni (**1^a, (2^a), (3^a)**))

La seconda ipotesi, denominata "B", prevede un diaframma deformabile nella lunghezza ed, in modo condizionato, anche in sommità. In questo caso sarà l'azione esercitata sul vincolo a rimanere costante e pari ad **8.000 kg**, mentre la sommità del diaframma si potrà spostare diversamente a seconda delle condizioni verificate. Sviluppando una procedura analoga alle precedenti, si ottengono i diversi valori per gli spostamenti in sommità: **2,21mm, 3,37mm e 3,28 mm.** (vengono considerate rispettivamente le condizioni (**1^a, (2^a), (3^a)**))

La scelta di applicare una forza da 8.000kg è conseguenza di un procedimento iterativo per individuare un'azione coerente con le massime deformazioni orizzontali che la trave irrigidente di sommità potrà raggiungere lungo il suo sviluppo (La si considera bloccata in corrispondenza degli spigoli e dei contrafforti interni).



-
COMUNE DI CROTONE
MINISTERO PER I BENI E LE ATTIVITA' CULTURALI
Direzione Generale per i beni Culturali e Paesaggistici della Calabria
Sovrintendenza per i beni archeologici della Calabria

Possiamo quindi considerare che in ogni posizione, il diaframma si trovi entro un range di possibilità per le quali la testa dei pali possa o risultare bloccata o, al limite, traslare orizzontalmente fino a **2,0-3,0 mm.**, che sono il limite consentito dalla deformabilità della trave. Sviluppando analiticamente tutta la casistica delle varie condizioni, nelle due ipotesi limite, ricavo i diaframmi sollecitazionali lungo i pali e su questi, posso svilupparne l'armatura, verificandone il corretto dimensionamento di massima. Stessa procedura anche per operare una verifica statica della travata irrigidente posta in sommità (Vedi elaborato (ST.4.2))

Agliaia, 15/03/2014

Il Tecnico: A. Melani