

## MODELOS PARA ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO EN EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE LA RÉPLICA DE LA PIEDRA MOVEDIZA

**María H. Peralta, Irene E. Rivas, María I. Montanaro, María L. Godoy y Norma L. Ercoli**

*Docentes Investigadores del Área Estructuras, Departamento de Ing. Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Avda. Del Valle 5737, 7400 Olavarría, Buenos Aires, Argentina. [mperalta@fio.unicen.edu.ar](mailto:mperalta@fio.unicen.edu.ar), <http://www.fio.unicen.edu.ar>*

**Palabras Clave:** Análisis Estático, Análisis Dinámico, Túnel de viento, Piedra Movediza.

**Resumen.** El desarrollo del Proyecto de la Réplica de la Piedra Movediza, emplazada en el Cerro La Movediza de la ciudad de Tandil en mayo de 2007 requirió de tareas multidisciplinarias con la coordinación del Área de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y profesionales de la Secretaría de Obras Públicas de la Municipalidad de Tandil, y con la participación de: topógrafos; geólogos; empresas particulares; docentes del Departamento de Aeronáutica de la Universidad de La Plata.

Es sabido que la adopción de modelos de análisis adecuados a los problemas reales requiere el manejo de incertidumbres y simplificaciones a efectos de lograr resultados adecuados. Estas incertidumbres y simplificaciones varían según el tipo de problema y muchas veces, el diseñador debe recurrir a técnicas de análisis complementarias para efectuar la validación de resultados. Fundamentalmente, los problemas con irregularidades geométricas y singularidades hacen que sus análisis escapen de los problemas clásicos contemplados en las normativas y son los que requieren la contrastación mencionada.

Particularmente y, dadas las características de la réplica, en el presente trabajo se pone énfasis en los modelos utilizados para el análisis estático y dinámico para el proyecto estructural, que involucraron la complementación de simulaciones numéricas y ensayos experimentales en túnel de viento. La tipología adoptada en el proyecto corresponde a una estructura interna formada por un entramado metálico constituido por cuatro reticulados dispuestos en dos planos ortogonales. Estos reticulados descargan en una columna armada cuyo eje vertical coincide con la vertical del lugar. La estructura se complementó con cuadernas transversales, longitudinales y horizontales, que cumplen con una doble función: por un lado copiar la geometría externa de la piedra y servir de molde para la cubierta exterior y, por otro, cumplir con la función resistente de transmitir los esfuerzos que provocan las acciones a la estructura interna.

## 1 INTRODUCCIÓN

El proyecto y diseño de la Réplica de la Piedra Movediza de la ciudad de Tandil permitió que el Cerro La Movediza luzca en su coronamiento una réplica de la Piedra Movediza caída en febrero de 1912. La Piedra Movediza fue por mucho tiempo un atractivo turístico mundial y por siempre ha representado para la ciudad de Tandil un ícono con influjo mitológico inconfundible que la identifica. La réplica es solo una alegoría de aquella piedra mágica, única e irrepetible que alumbró el cerro desde tiempos inmemoriales (El Hage and Levy, 2007). En muchas oportunidades, durante los noventa y cinco años que transcurrieron desde la caída de la Piedra, se han elaborado proyectos para su recuperación que naufragaron entre ordenanzas, refutaciones, burocracia, e indiferencia. En el año 2006, la Municipalidad de Tandil convocó a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires para un nuevo intento que, a partir de un convenio firmado entre ambas instituciones y, luego del desarrollo de los trabajos de ingeniería correspondientes, que se expondrán en el presente artículo, posibilitó el emplazamiento de la réplica que se inauguró el 17 de mayo del año 2007.

Se elaboró un Plan de Actividades, a partir de las pautas establecidas y, considerando que la réplica de la piedra debía tener las mismas dimensiones geométricas que la piedra original, y que se emplazaría fija en la misma posición y ubicación en el cerro La Movediza. Estaría constituida por una estructura interna metálica y sería recubierta por un material capaz de reproducir la textura y color de la piedra original.

Las actividades desarrolladas comprendieron:

- Relevamiento de información disponible sobre el tema
- Estudios Topográficos que incluyeron:
  - Relevamiento planialtimétrico del cerro en el entorno del lugar de emplazamiento.
  - Relevamiento geométrico de la piedra caída a efectos de reconstituir la geometría original y elaboración del modelo geométrico espacial digitalizado.
- Estudios geológicos y geotécnicos de la zona de emplazamiento de la piedra a efectos de evaluar la calidad de la roca de fundación y detectar posibles fisuras.
- Ensayo en túnel de viento a efectos de evaluar las presiones originadas por el viento y la localización de las mismas.
- Selección del material de la cubierta a efectos de respetar la textura y el color de la piedra original.
- Proyecto Estructural de la réplica: evaluación estática y dinámica. A partir de los datos aportados por las actividades descriptas precedentemente.

En el presente trabajo se describen los modelos utilizados, para los análisis estático y dinámico, que posibilitaron la concreción del proyecto estructural de la Réplica de la Piedra Movediza atendiendo a los estudios previos para la definición de los mismos.

## 2 ESTUDIOS PREVIOS

A partir de las pautas preestablecidas, y descriptas precedentemente, y en función de las características particulares de ubicación y forma de la réplica se adoptó la tipología estructural (ver Figura 1). La misma consiste en una estructura metálica interna formada por un entramado constituido por cuatro reticulados dispuestos en dos planos ortogonales (ver Figura 2). Estos reticulados descargan en una columna o mástil también reticulado y dispuesto de forma centrada respecto del punto geográfico relevado y que fuera indicado como centro del apoyo en los estudios topográficos. El eje de la columna se dispone coincidente con la vertical del lugar (ver Figura 1). La estructura se complementa con una

serie de cuadernas transversales, longitudinales y horizontales, construidas con planchuelas rigidizadas, que cumplen con una doble función: por un lado copian la geometría externa de la piedra y sirven de molde para dar forma a la cubierta exterior, y por otro lado cumplen con la función resistente de transmitir los esfuerzos que provocan las acciones actuantes sobre la estructura (viento en las distintas direcciones, peso propio). La conexión de las cuadernas horizontales exteriores con los reticulados ortogonales se realiza fundamentalmente en tres planos que cumplen la función de arriostrar horizontalmente e internamente a la estructura.

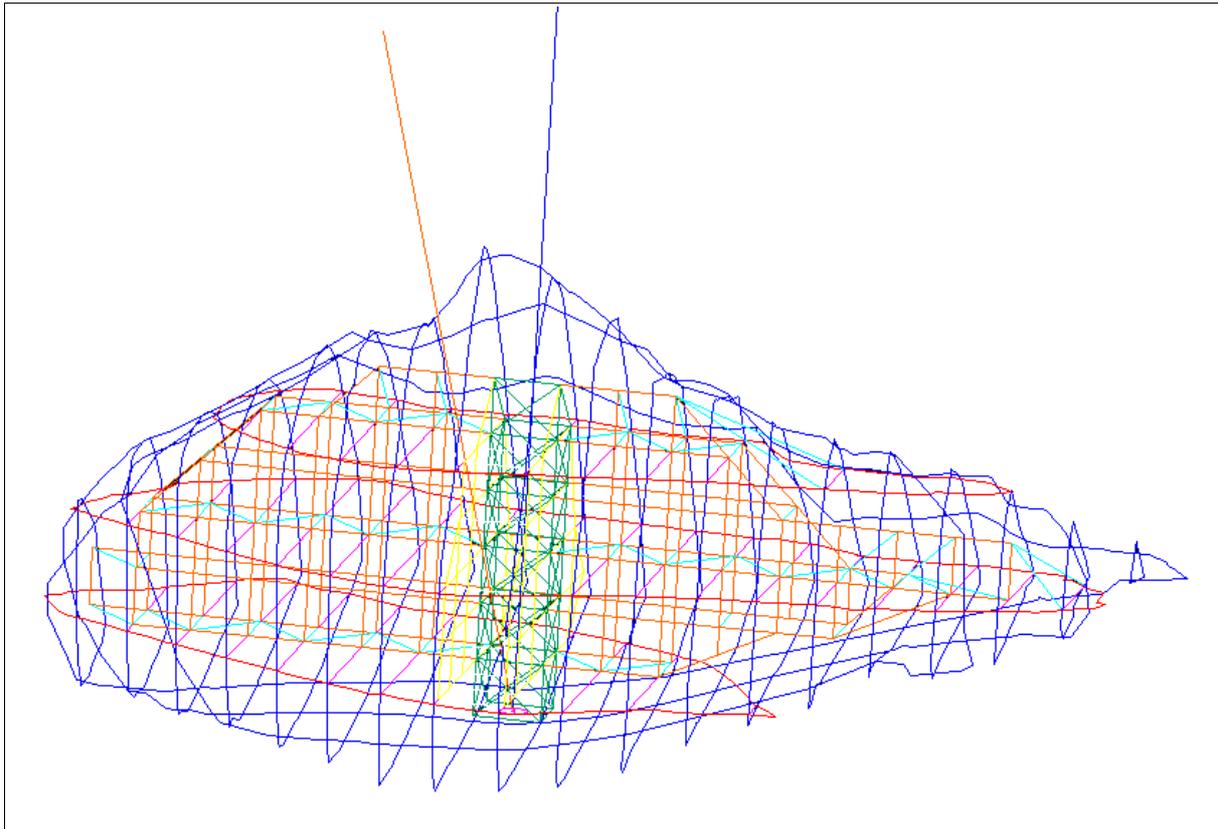


Figura 1: Tipología estructural

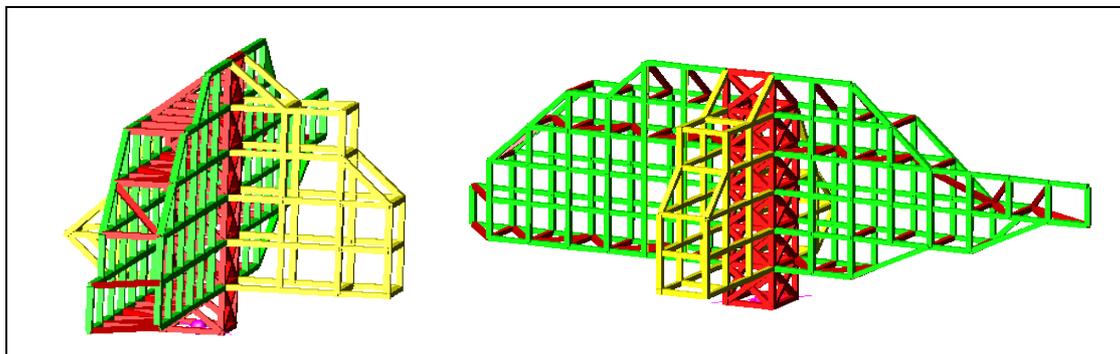


Figura 2: Reticulados interiores

Los primeros análisis realizados fueron simplificados y se efectuaron paralelamente al avance de las distintas etapas de relevamientos (topográficos, planialtimétricos, geológicos, etc.). Las simplificaciones estaban referidas a la geometría y a las acciones que para esta estructura son las de peso propio y, fundamentalmente, las producidas por el viento.

Debido a las particularidades geométricas de la estructura, y a las características topográficas del lugar de emplazamiento, para determinar las cargas de viento de diseño se debió recurrir al ensayo en túnel de viento, al no estar contemplada su geometría en los procedimientos simplificado y analítico, según el Reglamento CIRSOC ([CIRSOC 102, 1984](#); [CIRSOC 102, 2005](#)).

A continuación se describen los resultados de los estudios topográficos y de los ensayos en túnel de viento que permitieron definir los modelos de análisis y efectuar el diseño de la réplica que hoy se encuentra emplazada en el cerro La Movediza.

## 2.1 Estudios Topográficos

Los estudios topográficos que permitieron la definición de la geometría de la réplica y la determinación del lugar de emplazamiento, comprendieron el relevamiento planialtimétrico del cerro y el relevamiento geométrico. Los mismos se describen a continuación.

- Relevamiento Planialtimétrico del Cerro

Los relevamientos topográficos planialtimétricos permitieron determinar la posición y ubicación de la réplica coincidentes con los de la piedra original (ver [Figura 3](#)).

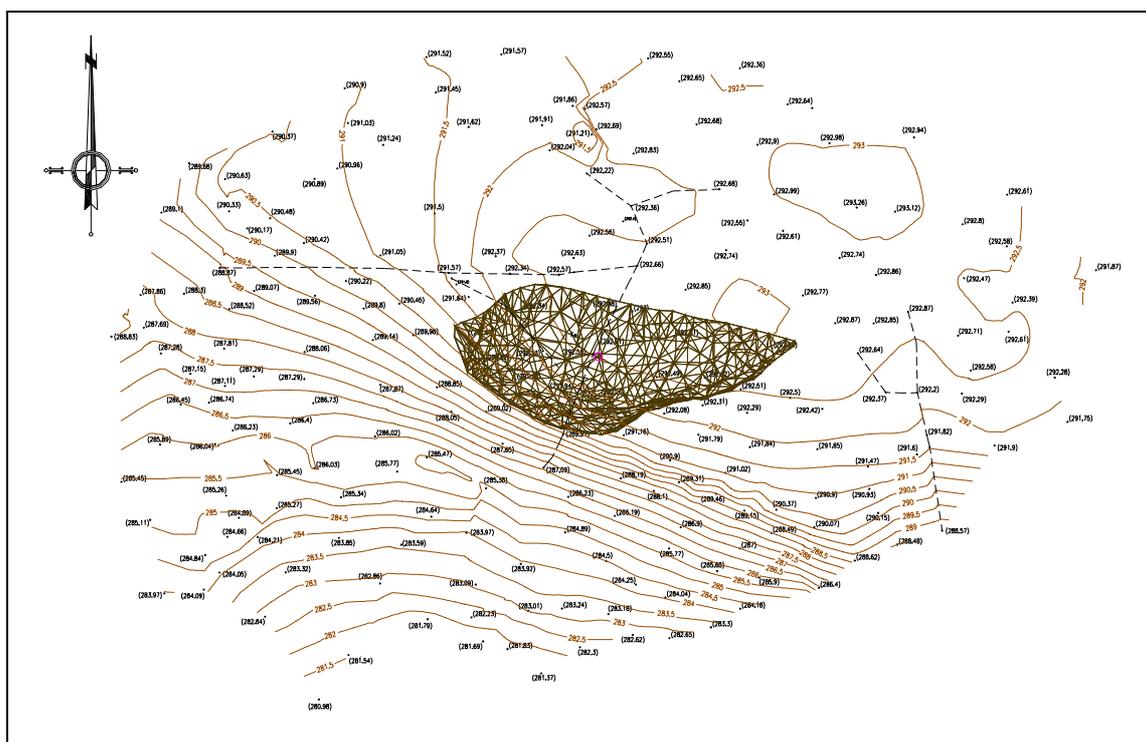


Figura 3: Líneas de nivel en zona de emplazamiento de la réplica

- Relevamiento Geométrico de los restos de la piedra original

La geometría de la réplica (ver [Figura 4](#)) se determinó a partir del análisis de la información disponible y del relevamiento de la geometría de los restos de la piedra original, que yace al pie del Cerro La Movediza. A tal fin se utilizaron: Taquímetros Electrónicos a rayo infrarrojo y láser y Sistema de receptores GPS. Se relevaron planialtimétricamente 1523 puntos entre los tres trozos existentes de la piedra. El estudio permitió indicar que la piedra tenía un volumen aproximado de 91 m<sup>3</sup>; un peso aproximado de 248 tn y una superficie externa aproximada de 133 m<sup>2</sup>. También se determinó el centro de gravedad que permitió observar que se encuentra en la vertical que pasa por el centro del apoyo indicado a 1.81 m.

El hecho que la vertical que pase por el Centro de Gravedad caiga en la zona de apoyo determinada permite justificar el equilibrio en que se encontraba la piedra original, además de ser indicativo de que las mediciones reconstruyen casi fehacientemente la realidad en cuanto ubicación y geometría de la piedra original.

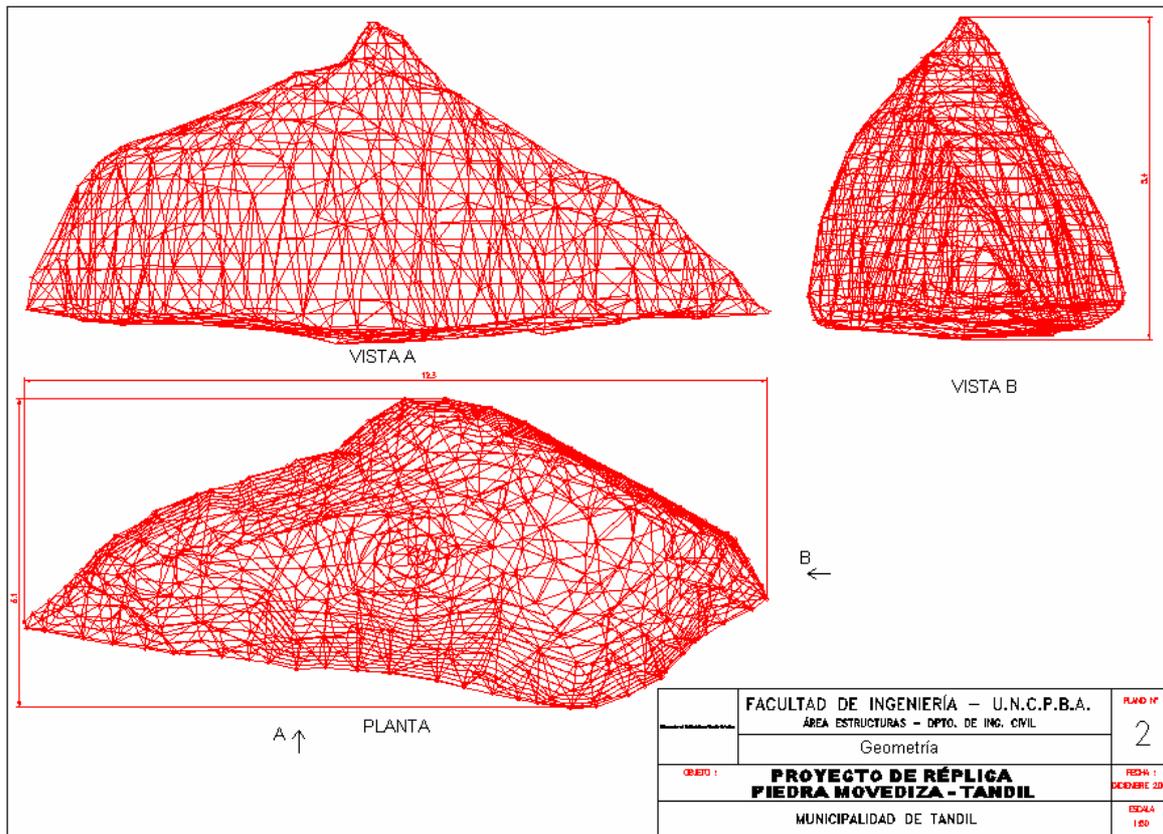


Figura 4: Geometría de la Piedra

## 2.2 Evaluación de las Acciones. Ensayo en Túnel de Viento

Este estudio permitió valorar la incidencia de la topografía del terreno y de la geometría de la estructura en la distribución de las presiones del viento. Se consideraron ocho direcciones de viento: N, S, E, O, NE, NO, SO y SE. Se midieron, además, las fuerzas estáticas y dinámicas en el anclaje en la dirección de viento y laterales. Se informó el rango de frecuencias normalizadas en que se concentra la mayor energía de cargas aerodinámicas no estacionarias.

El ensayo de un modelo a escala 1:40 de la Réplica de la Piedra Movediza y de parte del coronamiento del Cerro La Movediza, construidos de acuerdo a la geometría especificada por la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA, se realizó en el Túnel de Viento de Capa Límite del Departamento Aeronáutica de la Facultad de Ingeniería de la UNLP (ver [Figura 5](#)). El modelo de la cima del cerro fue modificado para posibilitar su rotación en la sección de prueba del túnel y el estudio de vientos de ocho direcciones (S, SO, O, NO, N, NE, E y SE). Las direcciones S (dirección de vientos más frecuentes), SO (dirección de los vientos de mayor intensidad) y SE respetan la geometría original. De acuerdo a lo observado en el sitio de emplazamiento, se estima que las modificaciones en el modelado del cerro son conservativas, ya que pueden inducir cargas de viento mayores en el ensayo, que las que se produzcan

realmente sobre la estructura. El modelo de la réplica fue adaptado para medir fuerzas en la dirección del viento y laterales con la balanza aerodinámica en una primera etapa del trabajo, y luego fue instrumentado con 56 tomas de presión para obtener la distribución de presiones sobre el mismo. Se adquirieron datos sobre la maqueta construida al efecto, para velocidades de viento que variaron entre 6m/s y 16 m/s. Los valores resultantes se escalaron para obtener los correspondientes a 50 m/s, equivalentes a 180 km/h considerada como velocidad de diseño.

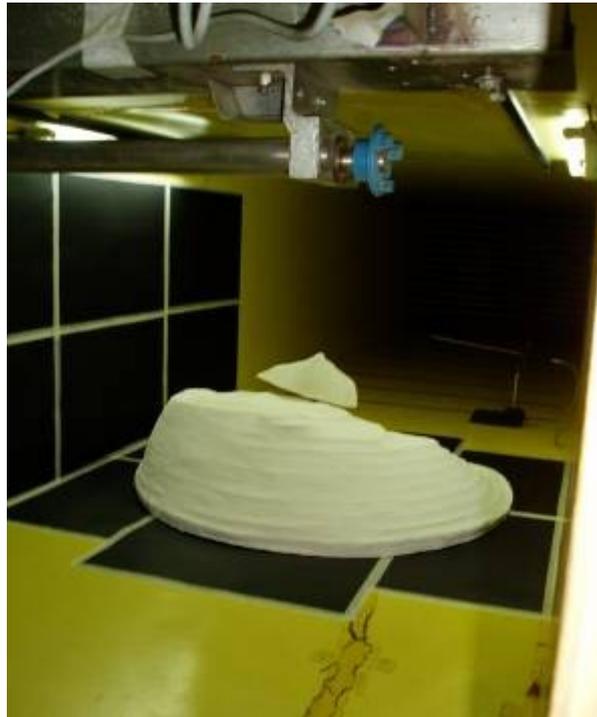


Figura 5: Ensayo en Túnel de Viento

La temperatura en la sección de prueba del túnel y la velocidad del viento a la altura de la Piedra fueron medidas con el anemómetro de hilo caliente Dantec Flowmaster.

Para cada dirección del viento se midieron fuerzas y distribución de presiones a distintos valores de velocidad para verificar la independencia del número de Reynolds de los coeficientes adimensionales de fuerza y presión. El número de Reynolds en los resultados fue calculado en base a la altura del modelo de la piedra,  $H$ .

Los resultados de las mediciones de fuerzas medias se reportan como coeficientes adimensionales: de fuerza longitudinal (resistencia),  $C_D$  (ver Ec. (1)), y de fuerza lateral,  $C_T$  (ver Ec. (2)).

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref}} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{ref}} \quad (2)$$

donde:  $D$  y  $T$  son las fuerzas longitudinal y lateral respectivamente sobre la réplica  
 $\rho$  es la densidad del aire, corregida por temperatura

$V$  es la velocidad del viento medida a la altura de la Piedra

$A_{ref}$  es un área de referencia. Para este caso se eligió el área del triángulo formado con el máximo ancho y la máxima altura de la piedra (12.3 m y 5.4 m respectivamente en escala real).

Con el objeto de estudiar picos de carga instantánea y la posible existencia de desprendimientos de vórtices que pudieran provocar cargas periódicas se adquirieron y procesaron valores instantáneos de fuerza longitudinal y lateral y se analizaron los histogramas y espectros normalizados de las mismas. La frecuencia de adquisición de cargas instantáneas fue de 2000 Hz. La frecuencia normalizada,  $f\hat{n}$ , se definió en base a la altura  $H$  y la velocidad  $V$  (ver Ec. (3)).

$$f\hat{n} = \frac{f \cdot H}{V} \quad (3)$$

En el caso de los espectros, se promediaron para cada dirección de viento los espectros normalizados medidos a 8, 12 y 16 m/s.

Se realizaron mediciones de distribución de presiones en el modelo de la Piedra para las ocho direcciones de viento (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO), presentándose la información en forma de coeficiente adimensional de presiones  $C_p$ , (ver Ec. (4)), obtenido como cociente entre la presión efectiva,  $\Delta P$  y la presión dinámica de referencia.

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} \quad (4)$$

Se dispusieron sensores para medir la presión sobre toda la superficie el modelo (ver Figura 6, Figura 7 y Figura 8). En esta última figura se muestra también la posición del punto de anclaje.

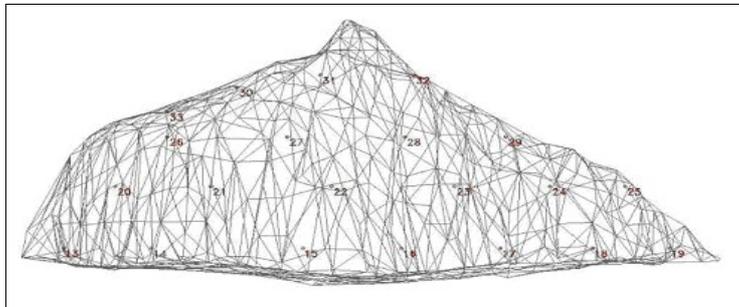


Figura 6: Tomas de presión en el modelo (vista sur)

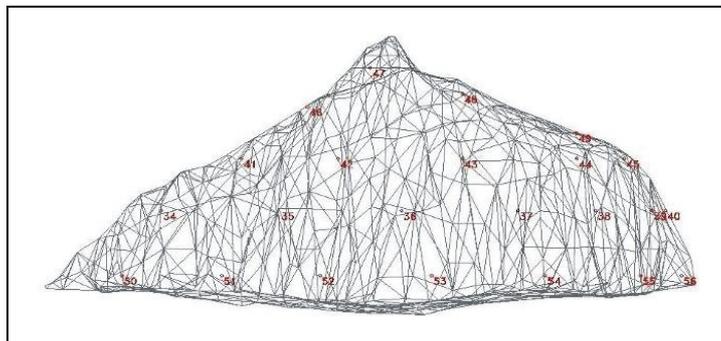


Figura 7: Tomas de presión en el modelo (vista norte)

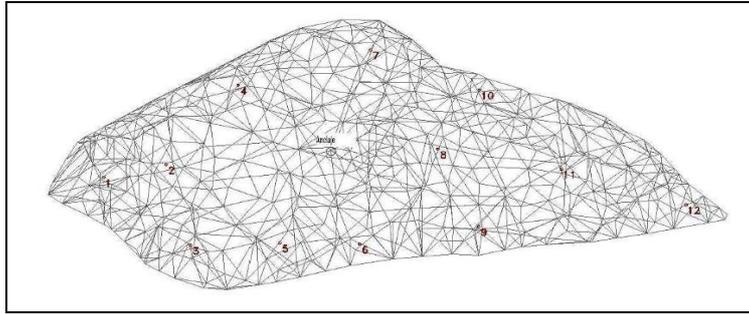


Figura 8: Tomas de presión en el modelo (vista inferior) y punto de anclaje

De acuerdo a lo indicado, los estudios efectuados en túnel de viento permitieron obtener la siguiente información:

Los coeficientes de fuerzas aerodinámicas: longitudinal  $C_D$  (en la dirección del viento), y lateral  $C_T$  (positivo hacia la izquierda visto de espaldas al viento). Se dispuso de los coeficientes obtenidos para todas las direcciones de viento y para cada valor de velocidad ensayado, así como del promedio de todas las velocidades. Se observó que en el rango ensayado los coeficientes  $C_D$  y  $C_T$  no presentaron una variación significativa con el número de Reynolds.

De los histogramas de valores instantáneos de  $C_D$  y  $C_T$  obtenidos, se presentan a modo de ejemplo los correspondientes a las direcciones S y SO estudiadas, (ver Figura 9). Los espectros normalizados, de  $C_D$  y  $C_T$  permitieron observar el rango de frecuencias normalizadas en que se concentra la mayor energía de cargas aerodinámicas no estacionarias (ver Figura 10).

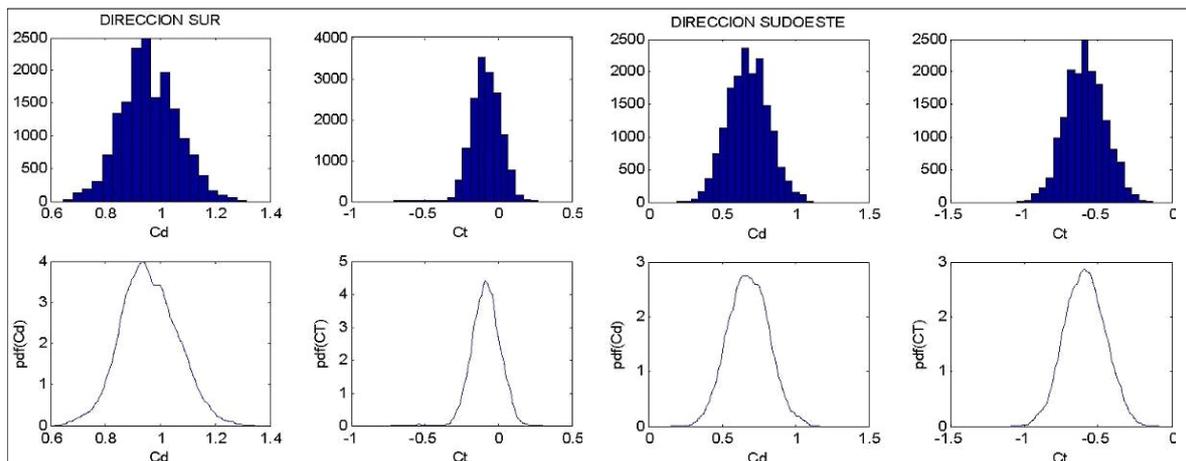


Figura 9: Histogramas de valores instantáneos de  $C_D$  y  $C_T$ , y función densidad de probabilidad

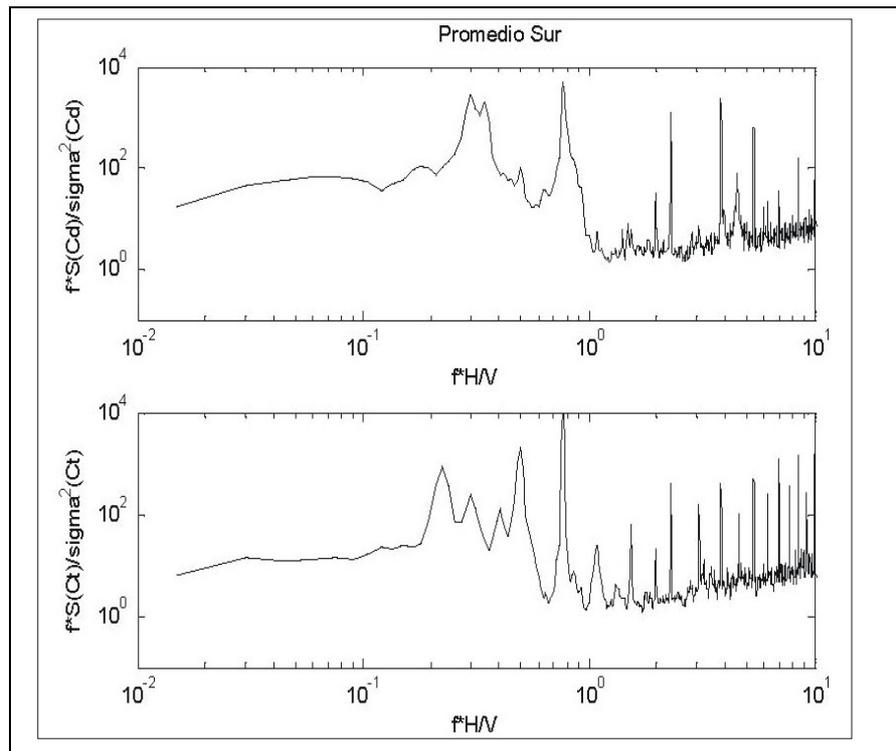


Figura 10: Espectros normalizados de coeficientes de  $C_D$  y  $C_T$  para la dirección Sur

Se obtuvieron los coeficientes de presiones correspondientes a cada dirección del viento en los cincuenta y seis puntos considerados en la maqueta, ver [Tabla 1](#).

El análisis de los coeficientes de presión indicados permite observar la gran influencia de la geometría irregular y de la topografía del lugar en la distribución de los mismos.

Los datos reportados por los ensayos permitieron la correspondiente calibración de los modelos numéricos de análisis utilizados, y la contrastación de los resultados.

Toma	Dirección del viento							
	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE
1	-0.446	-0.475	0.130	-1.047	-0.529	-0.244	-0.276	-0.802
2	-0.377	-0.551	0.184	-0.686	-0.301	-0.421	-0.267	-0.614
3	-0.615	-1.467	-0.574	-0.305	-0.541	-1.077	-0.245	-0.596
4	0.904	0.779	-0.184	-0.518	-0.247	-0.337	-0.223	-0.032
5	-0.575	-1.206	-0.376	0.306	0.415	0.278	-0.273	-0.669
6	-0.540	-1.538	-0.705	-0.039	0.506	0.214	-0.081	-0.826
7	0.198	-1.316	-0.778	-0.502	-0.468	-0.384	-0.519	0.688
8	-0.490	-1.144	-0.653	-0.974	-0.957	-0.634	-0.563	-1.476
9	-0.462	-1.128	-0.588	-1.149	-0.627	-0.040	-0.622	-1.276
10	-0.505	-0.844	-0.595	-0.386	-0.470	-0.873	0.221	-0.158
11	-0.491	-1.174	-0.628	-1.218	-1.260	-0.483	-0.532	-1.067
12	-0.817	-0.832	-0.120	-0.794	-0.773	-0.666	-0.256	-0.696
13	0.951	1.382	-0.246	-0.905	-0.308	-0.511	-0.422	-0.253
14	1.242	1.218	0.054	-0.801	-0.217	-0.598	-0.332	-0.051
15	1.314	-0.353	-1.088	-0.417	-0.250	-0.363	-0.819	0.434
16	0.151	-1.955	-0.861	-0.509	-0.520	-0.352	0.217	1.173

Toma	Dirección del viento							
	S	SO	O	NO	N	NE	E	SE
17	0.616	-0.718	-0.723	-0.347	-0.400	-0.294	0.769	1.413
18	0.335	-0.853	-0.309	-0.500	-0.277	-0.691	0.881	1.552
19	-1.195	-1.095	-0.238	-0.744	-0.507	-1.055	1.225	0.548
20	0.947	0.864	0.021	-0.544	-0.195	-0.461	-0.165	-0.234
21	1.210	0.190	-0.706	-0.491	-0.173	-0.290	-0.530	0.082
22	-0.029	-2.100	-1.097	-0.353	-0.203	-0.739	-1.262	0.606
23	0.567	-0.460	-0.395	-0.219	-0.065	-0.201	0.500	0.892
24	0.366	-0.804	-0.333	-0.507	-0.427	-0.600	0.497	0.853
25	-0.574	-1.169	-0.284	-0.378	-0.269	-1.413	0.318	0.112
26	0.412	-0.071	-0.022	-0.424	-0.100	-0.404	-0.178	-0.283
27	0.040	-1.254	-1.175	-0.313	-0.121	-0.491	-1.035	-0.153
28	0.780	-0.512	-0.445	-0.318	-0.179	-0.524	0.000	0.530
29	0.278	-0.887	-0.047	-0.277	-0.155	-1.744	0.596	0.650
30	-0.612	-0.755	-0.838	-0.538	-0.248	-0.667	-0.687	-0.610
31	-1.269	-0.934	-1.300	-0.398	-0.195	-0.827	-0.790	-0.545
32	-0.477	-3.485	-0.774	-0.364	-0.183	-1.174	0.228	-0.685
33	-0.560	-1.769	-0.209	-0.996	-0.448	-0.572	-0.355	-0.687
34	-0.439	-1.127	-0.173	0.266	0.965	0.499	-1.188	-0.708
35	-0.528	-0.907	-0.125	0.452	1.510	0.305	-0.670	-0.877
36	-0.390	-1.111	-0.292	0.774	1.448	0.217	-0.291	-0.650
37	-0.490	-1.633	-1.221	0.790	1.313	-0.138	-0.273	-0.725
38	-0.488	-1.869	-0.443	1.170	0.306	-1.125	-0.777	-0.605
39	-0.436	-1.852	0.355	0.707	-0.600	-0.636	-0.240	-0.586
40	-0.574	-2.600	0.879	-1.067	-0.883	-0.790	-0.062	-0.710
41	-0.308	-1.795	-0.416	-0.597	0.334	0.066	-1.118	-0.657
42	-0.347	-1.257	-0.729	-0.077	0.937	0.322	-0.993	-0.670
43	-0.497	-2.012	-0.099	0.573	0.528	-0.206	-0.657	-0.745
44	-0.540	-2.520	-0.846	0.390	-0.396	-0.684	-0.880	-0.650
45	-0.433	-1.266	-0.105	-0.740	-0.464	-0.595	-0.245	-0.613
46	-0.347	-3.262	-0.260	-0.469	-0.381	-0.708	-0.453	-0.649
47	-0.344	-1.716	-1.788	-0.649	0.000	-0.522	-1.340	-0.607
48	-0.589	-2.283	-0.129	-0.680	-0.262	-0.820	-0.874	-0.578
49	-0.575	-1.701	-0.064	-1.063	-0.296	-0.482	-0.593	-0.663
50	-0.509	-1.118	-0.450	-0.149	0.326	0.399	-1.740	-0.797
51	-0.386	-0.831	-0.305	0.190	0.953	0.926	-0.141	-0.819
52	-0.485	-1.065	-0.120	0.898	1.354	0.664	-0.141	-1.086
53	-0.459	-1.128	-0.357	0.977	1.529	0.492	-0.078	-0.704
54	-0.665	-1.711	-1.555	0.888	0.902	-1.234	-0.976	-0.748
55	-0.457	-2.974	0.261	1.228	-0.409	-0.933	-0.312	-0.563
56	-0.590	-2.183	1.197	1.410	0.496	-0.286	-0.393	-0.688

Tabla 1: Coeficientes de presión

### 3 MODELOS DE ANÁLISIS

Se analizaron modelos planos y espaciales utilizando predicciones de comportamiento elástico lineal, a través de la implementación de modelos numérico-computacionales, mediante la aplicación del Método de los Elementos Finitos.

#### 3.1 Comportamiento Estático: Modelos Planos.

En primera instancia y, a efectos de realizar un predimensionado de los elementos constitutivos de la estructura se generaron modelos simplificados (ver [Figura 11](#)) en planos ortogonales coincidentes con los planos de los reticulados principales del entramado, analizados mediante software ([CYPE, 2007](#)). Estos análisis además de posibilitar el predimensionado inicial permitieron adoptar la geometría y disposición de los reticulados (ver [Figura 2](#)) del entramado acordes con la forma externa y las dimensiones de la piedra original.

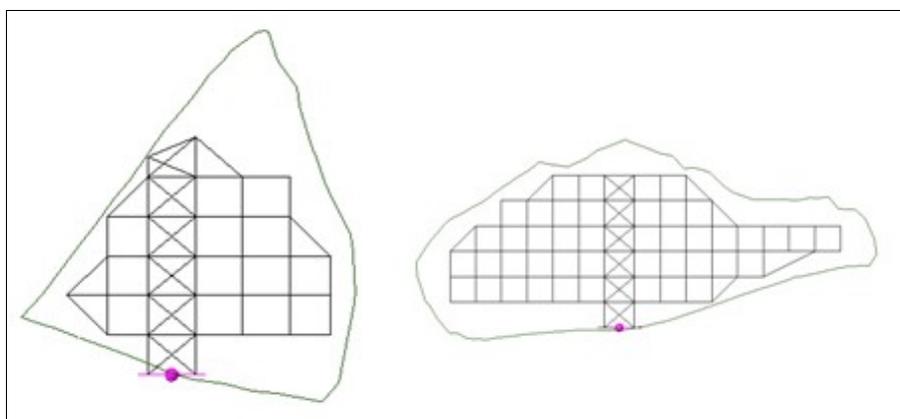


Figura 11: Reticulados planos interiores

#### 3.2 Comportamiento Estático: Modelos Espaciales.

A partir del predimensionado efectuado mediante el análisis sobre modelos planos se generaron modelos espaciales, con elementos BEAM, disponibles en la librería de elementos del software utilizado ([ALGOR, 2007](#)). Para el análisis estático de estos modelos espaciales se evaluaron nueve hipótesis de carga considerando además de la carga permanente, la combinación compatible entre cargas permanentes y los ocho estados de cargas de vientos independientes. A modo de ejemplo se presenta el modelo correspondiente a la hipótesis que combina el estado de cargas permanentes con viento Norte (ver [Figura 12](#)).

Para la vinculación en los modelos se reprodujo la forma en que constructivamente se vincularía la columna central con la placa base, adoptando empotramientos.

El análisis efectuado permitió obtener las reacciones de vínculo para las diferentes hipótesis de cargas consideradas, y los valores de esfuerzos para los diferentes elementos estructurales que componen la réplica. Resultando ser el cordón inferior el más solicitado en los reticulados longitudinales. Como era de prever los esfuerzos más desfavorables de la columna central se producen en correspondencia con los apoyos.

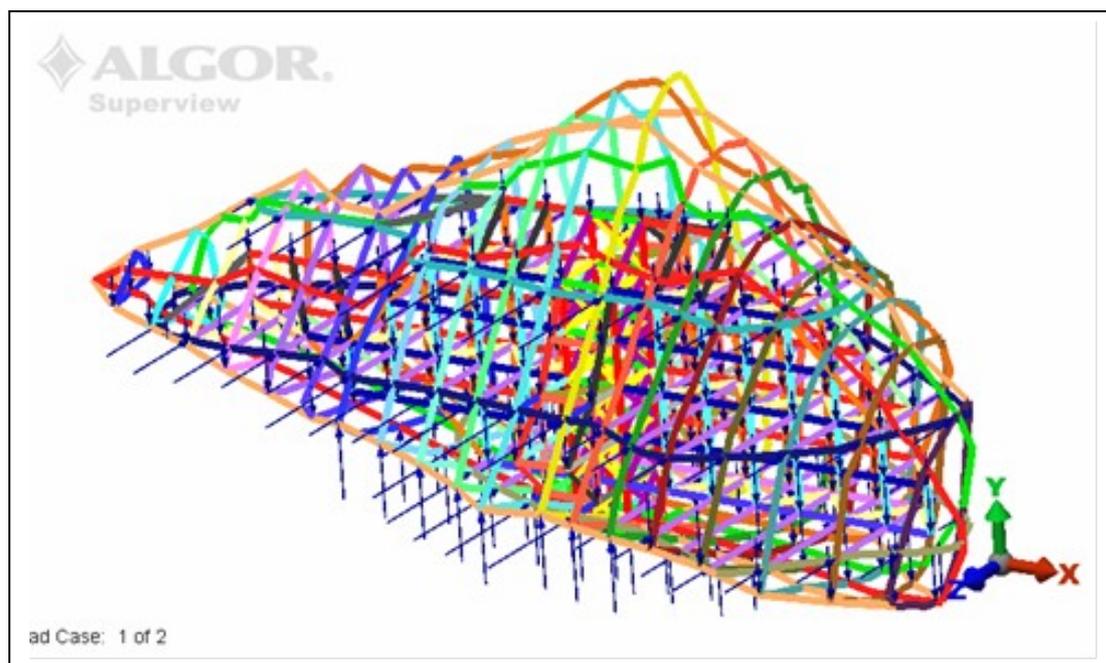


Figura 12: Modelo espacial con Viento Norte y cargas permanentes

### 3.3 Comportamiento Dinámico. Determinación de las frecuencias propias

Se procedió al análisis dinámico de los modelos espaciales generados en el software empleado (ALGOR, 2007), obteniéndose las características dinámicas propias de la estructura (Clough and Penzien, 1993). Las mismas se compararon con la información aportada por el ensayo en túnel de viento, en lo referido a frecuencias de excitación por acción del viento.

Al respecto, del análisis de los resultados de los ensayos en túnel de viento, surgió que el rango de frecuencias en que se concentra la mayor energía de cargas aerodinámicas no estacionarias se corresponde con una frecuencia de las cargas dinámicas de 1.7 y 6.5 Hz.

Del análisis de los modelos correspondientes al predimensionado de la estructura, indicaban que los valores de la frecuencia fundamental se encontraban comprendidos en el rango, de frecuencias de mayor energía de las cargas, medido en el ensayo en túnel de viento. Ello motivó la rigidización de la columna de la estructura y de otras zonas de importancia, lo cual permitió obtener a una frecuencia fundamental de 8 Hz alejada del rango de excitación mencionado.

Se presentan las frecuencias obtenidas para los tres primeros modos de vibración, ver Tabla 2.

	<i>Frecuencias [Hz]</i>
Modo 1	8.07
Modo 2	8.44
Modo 3	12.36

Tabla 2: Frecuencias resultantes

Con los resultados obtenidos se procedió a efectuar la verificación de los diferentes componentes estructurales, y de sus uniones (CIRSOC 301, 2005). Arribando al diseño definitivo el cual se presentaría en las Especificaciones Técnicas para la ejecución del proyecto.

## 4 CONSTRUCCIÓN Y EMPLAZAMIENTO

### 4.1 El Proceso Constructivo

La dirección del proceso constructivo estuvo a cargo de personal jerárquico y técnico de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos de la Municipalidad de Tandil.

La estructura se construyó en un taller metalúrgico de la ciudad de Tandil (ver [Figura 13](#)). La columna y los reticulados ortogonales se prepararon y ensamblaron en la mencionada metalúrgica, mientras que las cuadernas fueron cortadas con pantógrafo, en otra empresa, de acuerdo con la documentación técnica previamente elaborada. Vale resaltar que del diseño resultaron aproximadamente cuatrocientas partes de cuadernas diferentes las que, mediante un cuidadoso trabajo, fueron correctamente unidas con soldaduras en taller.



Figura 13: Estructura de la réplica en taller

A efectos de materializar la unión de la estructura con la fundación, la columna central se acarteló y unió mediante cordones de soldadura a una placa base de 1200 x 1150 x 50 mm (ver [Figura 13](#) y [Figura 14](#)).



Figura 14: Detalle de columna en zona de unión con cartelas y placa base

Una vez finalizada la estructura de acero se cubrió la misma con metal desplegado para permitir la colocación del material de la cubierta. La que se construyó en el taller de acuerdo a las especificaciones del proyecto, debiendo realizarse algunos ajustes en la dosificación de la capa de color y textura con la colaboración de artistas plásticos de la ciudad de Tandil, los que desinteresadamente colaboraron con la tarea (ver [Figura 15](#)).



Figura 15: Estructura de la réplica en taller

Avanzadas las tareas de construcción de la estructura de la réplica en el taller, comenzaron las tareas de ejecución de la fundación en el lugar previsto para el emplazamiento. De acuerdo al diseño el sistema de fundación, adoptado y calculado ([CIRSOC 201, 2005](#); [Giménez Salas, 1981](#)) para anclar la estructura en el macizo rocoso, consta de cuatro anclajes estructurales de 5 m de longitud, insertos en el macizo rocoso, y tomados por una única placa de anclaje, de 70 mm de espesor. La placa posee rigidizadores inferiores soldados y dispuestos ortogonalmente e insertos en la roca. Para asegurar la adherencia adecuada entre la roca y la placa se colocó material de inyección tipo grout. Adicionalmente, se dispusieron tres insertos verticales de 1.5 m de profundidad de carácter constructivo.

La ejecución de las perforaciones para los anclajes, bajo la supervisión de un especialista geólogo, fue realizada con los recaudos correspondientes dado lo particular del sitio donde se realizaron. Cabe destacar lo laborioso del replanteo definitivo para la ubicación de los anclajes y la placa correspondiente. Al efecto se construyó una plantilla de las dimensiones de la placa de anclaje que facilitó el replanteo atendiendo a los requerimientos del estudio geológico en lo referido al alejamiento de un plano de fisura que se encuentra en el macizo rocoso, y que fuera informado por el geólogo. Los anclajes fueron realizados por personal de una empresa especializada en anclajes en roca quienes colocaron los insertos y realizaron las inyecciones de acuerdo a lo indicado en las especificaciones.

Dicha placa base se unió, luego de su izaje, a la placa de anclaje mediante veinte bulones de 1½” tipo ISO 8.8 que se habían dispuesto para tal fin en la placa de anclaje (ver [Figura 16](#)). Para ello la placa base disponía de los correspondientes agujeros perfectamente alineados para el montaje.



Figura 16: Placa de anclaje con bulones a la espera de la réplica

Previo al izaje de la réplica se efectuó una prueba de arrancamiento de los anclajes cuyo resultado estuvo dentro de los límites establecidos para la aceptación de los mismos.

La placa de anclaje fue izada con la grúa ya instalada al pie del cerro (ver [Figura 17](#)).

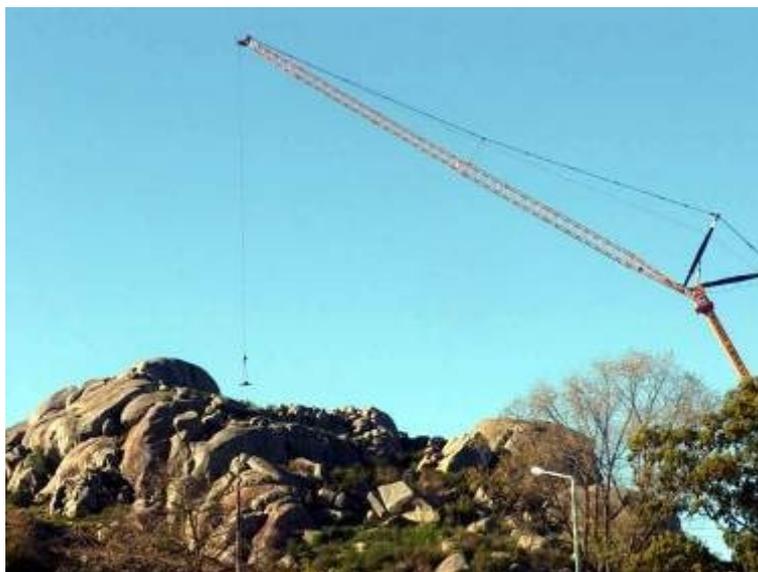


Figura 17: Izaje de la placa base

El traslado de la réplica (ver [Figura 18](#)), desde el taller al pie del cerro, estuvo cargado de emotividad ya que en todo el recorrido fue acompañada por la gente que con banderas y aplausos demostraron lo que este hecho significaba para ellos.



Figura 18: Traslado de la réplica en camión

El proceso constructivo, demandó aproximadamente cuatro meses de trabajo, y el día 13 de mayo de 2007 la Réplica de la Piedra Movediza se emplazó con éxito en el coronamiento del Cerro.

Para el montaje de la réplica se utilizó una grúa de gran porte (ver Figura 17) instalada al pie del cerro, la cual debió desplegar 108 m de pluma para elevar el peso de aproximadamente 9 tn en su extremo (ver Figura 19).



Figura 19: Izado de la réplica

Es de destacar las características de las tareas desarrolladas para alcanzar la precisión requerida durante las tareas de aproximación y posicionamiento de la réplica relacionadas, con el encuentro de ambas placas base (ver Figura 14 y Figura 16). Posteriormente se aplicó torque de diseño a los bulones de anclaje.



Figura 20: La réplica próxima a su lugar de emplazamiento

El día 17 de mayo de 2007 se realizó el acto inaugural con la presencia de los señores Presidente y Vicepresidente de la Nación, el señor Gobernador de la Provincia de Buenos Aires, el señor Intendente Municipal de la ciudad de Tandil y alrededor de 12.000 personas.

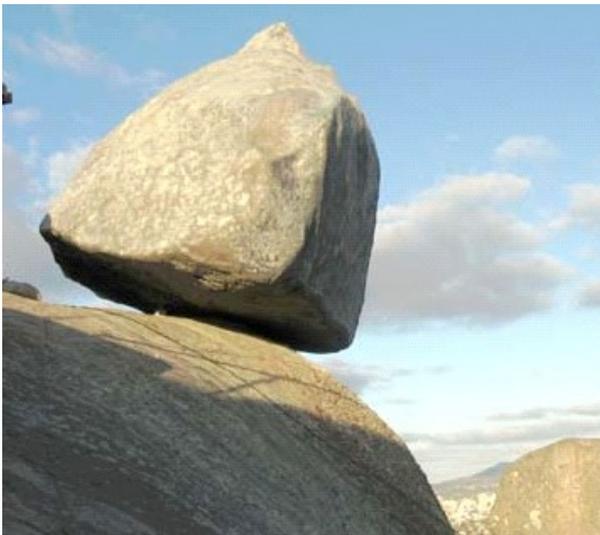


Figura 21: La réplica de la Piedra Movediza

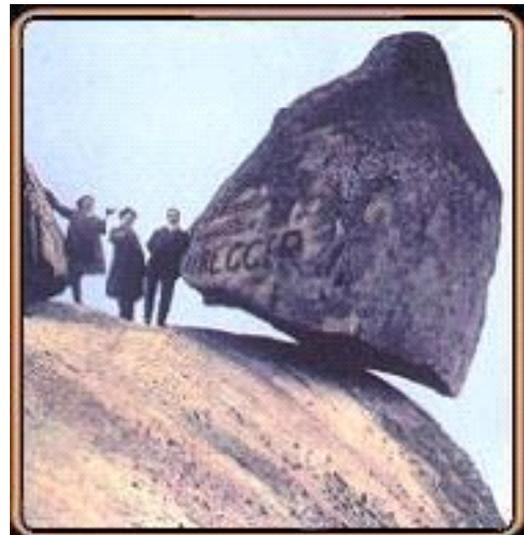


Figura 22: Piedra Movediza

La Réplica de la Piedra Movediza en la actualidad (ver [Figura 21](#)) muestra una notoria similitud con la Piedra Movediza original (ver [Figura 22](#)) según los registros fotográficos obtenidos antes de su caída ocurrida en febrero de 1912.

## 5 CONCLUSIONES

Las actividades interdisciplinarias desarrolladas para el proyecto y posterior construcción de la Réplica de la Piedra Movediza, dejaron una valiosa experiencia a todos los participantes involucrados en las mismas, dado que:

- La forma geométrica, el lugar de emplazamiento de la obra, la determinación de las acciones y las características estéticas particulares requirieron la utilización de

modelos y metodologías de análisis adecuadas para el caso analizado.

- Los criterios de diseño que se adoptaron debieron ser coordinados con los procedimientos constructivos disponibles dadas las particularidades antes mencionadas.
- Además del proyecto se efectuó el seguimiento de los procesos constructivos que permitieron lograr la similitud entre la réplica y la piedra original.
- Permitieron, según muchas de las opiniones recogidas durante la experiencia, la reconstrucción de patrimonio natural de gran valor para la ciudad, por lo cual se puede indicar que tuvo un alto impacto social.
- Posibilitaron, asimismo, la transferencia de conocimientos desde la Universidad a la comunidad a través del abordaje de problemas reales.

## REFERENCIAS

ALGOR SOFTWARE PACKAGE V.20.3, 2007.

Clough and Penzien, *Dynamics of Structures*, McGraw Hill, 1993.

CYPE, Software Metal 3D, *Arquitectura, Ingeniería y Construcción*, 2007.

El Hage E. and Levy P. *La Piedra Viva*. Edit Alfredo Bossio. Artes Gráficas. 1ra. Edición, 2007.

Giménez Salas, *Geotecnia y Cimiento*, Ed. Rueda. Madrid, 1981.

Reglamento CIRSOC 102, *Acción del Viento sobre las Construcciones*, INTI-CIRSOC, 1984.

Reglamento Argentino CIRSOC 102, *Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones*, INTI-CIRSOC, 2005.

Reglamento CIRSOC 201, *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*, 2005.

Reglamento CIRSOC 301, *Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios*, 2005.