



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



CALCULO DE CARGAS DE LA “FLORARIS GENÉRICA” RESEÑA HISTORICA

G. Scarpin^a

^aDpto. Mec. Aer., Facultad de Ingeniería, Instituto Universitario Aeronáutico
Av. Fuerza Aérea 6500 (IX5010JMX) Córdoba, Argentina. <http://www.iua.edu.ar>

Palabras claves: Cargas, Ensayos en Túnel de Viento, Aerodinámica, Floraris Genérica

Resumen

Se presenta una reseña histórica del cálculo de cargas realizado en la etapa de desarrollo de la “Floraris Genérica”, escultura diseñada y patrocinada por el arquitecto Eduardo Catalano.

Para poder dimensionar la compleja estructura fue necesario conocer con la mayor precisión posible las cargas actuantes sobre la misma. En el caso de esta escultura, las cargas por peso propio y las cargas por acción del viento o aerodinámicas tienen similar orden de magnitud. Por tal motivo se hizo necesario realizar ensayos en túnel de viento con un modelo 1:20 para estimar las cargas aerodinámicas.

Debido a que la estructura en cuestión es una obra civil, se adoptaron como norma de cálculo los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles. Sin embargo como se trata de una estructura móvil, era deseable que la misma pese lo menos posible. Por ese motivo y debido a que las cargas aerodinámicas tenían gran importancia, tanto para el diseño estructural como para el cálculo de cargas se utilizaron los criterios estándar adoptados en la industria aeronáutica

1. PRÓLOGO

Tal como lo imaginó su creador, con los años la “Floraris Genérica” se ha convertido en un ícono moderno de la Ciudad de Buenos Aires. La escultura fue concebida y patrocinada por el prestigioso arquitecto argentino Eduardo Catalano, quien la obsequió a la ciudad. La misma está ubicada en la Plaza de las Naciones Unidas, la cual fue remodelada especialmente para recibirla. Se la inauguró el 13 de abril de 2002.



Figura 1: Modelo Conceptual

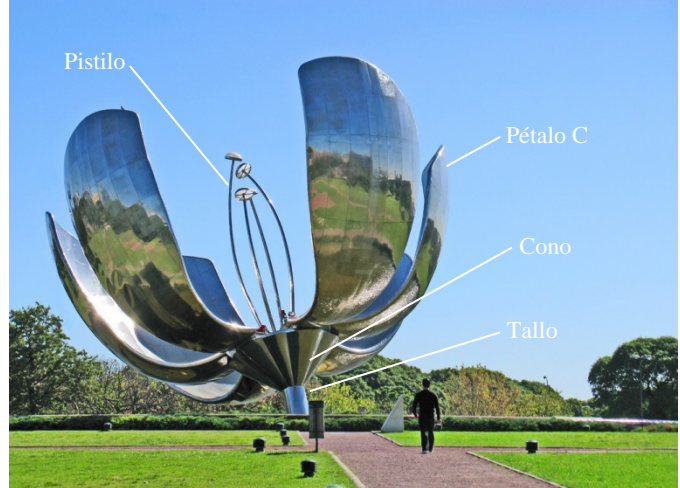


Figura 2: Floraris Genérica

Unos tres años antes, Catalano contrató a la empresa Lockheed Martin Aircraft Argentina S.A. (LMAASA), actual Fábrica Argentina de Aviones “Brigadier San Martín” S.A. (FAdeA), el diseño en detalle, cálculo, y fabricación de la estructura metálica de la flor, específicamente los pétalos y pistilos. El resto de la obra, mecanismo de apertura y cierre de los pétalos, obra civil, iluminación, etc., fueron realizados por contratistas de la Ciudad de Buenos Aires.

En la primavera del año 2000 se realizaron los ensayos en túnel de viento y cálculos de carga del entonces conocido internamente en LMAASA como Proyecto “Flor de Buenos Aires”.

En este informe se presentan algunos resultados obtenidos en los ensayos en túnel de viento y cálculo de cargas, como homenaje a todos los partícipes de ese desafiante proyecto de ingeniería y especialmente al arquitecto Eduardo Catalano, artífice de esta maravillosa obra, orgullo de todos los que participamos en su concepción.

2. INTRODUCCIÓN

Para dimensionar una estructura es necesario conocer con la mayor precisión posible las cargas actuantes sobre la misma. En el caso de la “Flor de Buenos Aires” las cargas por peso propio y las cargas por acción del viento o aerodinámicas tenían similar orden de magnitud. Por tal motivo fue necesario realizar ensayos en túnel de viento para estimar las cargas aerodinámicas (Ver Figura 3 y Ref. [5]). En el caso de las cargas por peso propio se usó la información disponible del diseño preliminar de la estructura realizado con gran detalle utilizando los programas de diseño CATIA® y de cálculo estructural NASTRAN® (Ver Figura 4).

Debido a que la estructura en cuestión es una obra civil, se adoptaron como norma de cálculo los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles (Ref. [1]). Sin embargo como se trataba de una estructura móvil, se deseaba que la misma pese lo menos posible. Por este motivo y debido a que las cargas aerodinámicas tenían gran importancia, tanto para el diseño estructural como para el cálculo de cargas se utilizaron los criterios estándar usados en la industria aeronáutica.

Para evitar confusiones, a las partes componentes de la Flor, se las denominó, en lo posible, con los mismos nombres usados para describir una flor natural. Aquí se presentan las cargas dimensionante del Tallo, Pétalos, Pistilo, Mecanismo de apertura y Cono de unión Tallo-Pétalos (Ver Figura 2)

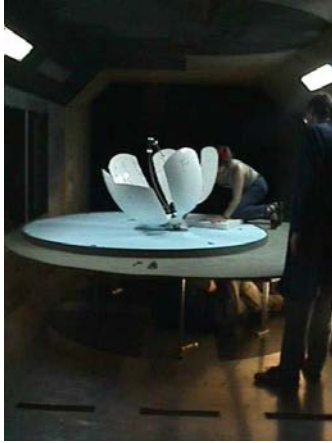


Figura 3: Ensayo en el Túnel de Viento Mayor (IUA)

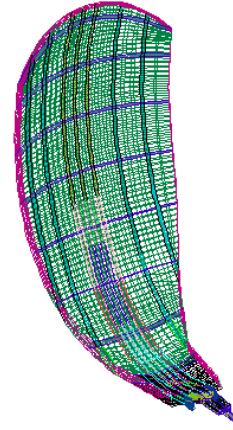


Figura 4: Modelo Estructural NASTRAN

Las cargas aquí descritas corresponden a cargas estáticas, es decir se considera que las fuerzas y momentos no varían con el tiempo. Además, para el cálculo de cargas se considera a la estructura como indeformable. Todas las cargas son límites, es decir no se encuentran afectadas por ningún coeficiente de seguridad.

3. DESARROLLO

3.1. Condiciones para el Cálculo de Cargas

Las condiciones de cálculo utilizadas en la estimación de cargas de la Flor de Buenos se basan en las especificaciones dadas en el Capítulo 5 del Reglamento CIRSOC 102 (Ref. [1]).

3.1.1. Determinación de la Velocidad de Referencia (β)

Ubicación de la construcción en el territorio: Ciudad de Buenos Aires

Coefficientes: de la Figura 1 (Ref. [1])

Velocidad de referencia: $\beta=27.2$ (m/s)

3.1.2. Definición del Coeficiente de Velocidad Probable

Se asume un coeficiente $C_p=1.65$, correspondiente a:

$m = 25$ (Vida estimada de la estructura, expresada en años)

$P_m=0.5$ (Probabilidad de que la velocidad básica del viento V_0 sea excedida por lo menos una vez en un período de 25 años)

La Norma CIRSOC 102 recomienda que este valor del coeficiente sea usado en el caso de construcciones con alto factor de ocupación (escuelas, viviendas, comercios, industrias, etc.) y cuyo colapso o deterioro no afecte a la seguridad o la sanidad pública, como por ej. en el caso de los hospitales, centrales eléctricas, centrales de potabilización, etc.

3.1.3. Cálculo de la Velocidad Básica de Diseño (V_0)

$$V_0 = C_p \cdot \beta$$

$$V_0 = 1.65 \cdot 27.2 = 44.88 \text{ [m/s]}$$

3.1.4. Cálculo de la Presión Dinámica Básica (q_0)

Se calcula asumiendo densidad estándar a nivel del mar:

$$q_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot (V_0)^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \cdot (44.88)^2 \approx 1234 \text{ [N/m}^2\text{]}$$

3.1.5. Cálculo de la Presión Dinámica de Cálculo (q_z)

$$q_z = q_0 \cdot C_z \cdot C_d$$

En principio, se asume una presión dinámica constante (capa límite constante) en toda la altura de la construcción, en función del mayor valor de z . Asumiendo $z_{\text{máx}} \approx 14$ [m]. Se asume para la zona una rugosidad del terreno Tipo II, con transición de I a IV (ver Figura 5).



Figura 5: Ubicación de la Estructura

Dada la distancia al río de ~ 800 m, para una rugosidad límite del Tipo II, con transición de I a IV, se asume la altura de capa límite de $h_x \approx 35$ m (ver Tabla A.2 de Ref. [1]). Como la altura de capa límite resulta mayor que la altura máxima de la construcción, se asume que la misma se encuentra totalmente dentro de dicha capa límite. El valor de $c_z=0.76$ es obtenido de Tabla 4, Ref. [1].

El valor de c_d (coeficiente de reducción por dimensiones) es igual a la unidad debido a que la construcción tiene una dimensión inferior a 20 m.

$$q_z = 1234 \cdot 0.76 \cdot 1 = 938 \approx \mathbf{1000 \text{ [N/m}^2\text{]}}$$

3.2. Medición en Túnel de Viento

Las cargas aerodinámicas de la estructura fueron medidas en el Túnel de Viento Mayor del Instituto Universitario Aeronáutico. El mismo es un túnel de viento de circuito cerrado, posee un motor eléctrico de 1000 HP el cual mueve un ventilador de 8 palas que puede generar vientos de hasta 100 m/s en la cámara de ensayo cerrada de 3.2 m de ancho por 2.4 m de alto.

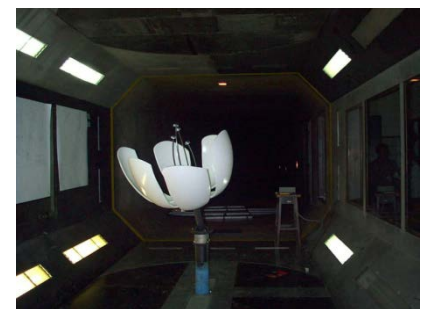
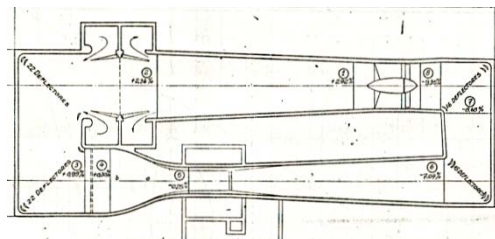


Figura 6: Túnel de Viento Mayor – Córdoba, Argentina

Los ensayos se efectuaron con distribución de velocidades constantes sin representación de la variación del viento natural en altura sobre un modelo rígido a escala 1:20 (750 mm de altura). El modelo fue diseñado y construido con los pétalos móviles con el propósito de analizar las cargas para dos configuraciones: pétalos abiertos y cerrados.

Las mediciones tuvieron como principal objetivo la determinación de:

- Coeficientes globales para el modelo completo, para las dos configuraciones, pétalos abiertos y cerrados.
- Coeficiente de fuerza normal y momento en la articulación del pétalo de mayor tamaño (Pétalo C).
- Coeficiente de fuerza normal y momento en la base de uno de los pistilos.

Las cargas sobre el modelo completo se midieron con una balanza aerodinámica Emmen a "strain gages" de 6 componentes que permitieron conocer las tres fuerzas y los tres momentos que generan las cargas debidas al viento.

En el caso del Pétalo C y uno de los pistilos, la fuerza normal y el momento actuantes se evaluaron instrumentando los mismos con una balanza aerodinámica a "strain gages" de dos componentes que fue diseñada y calibrada especialmente.

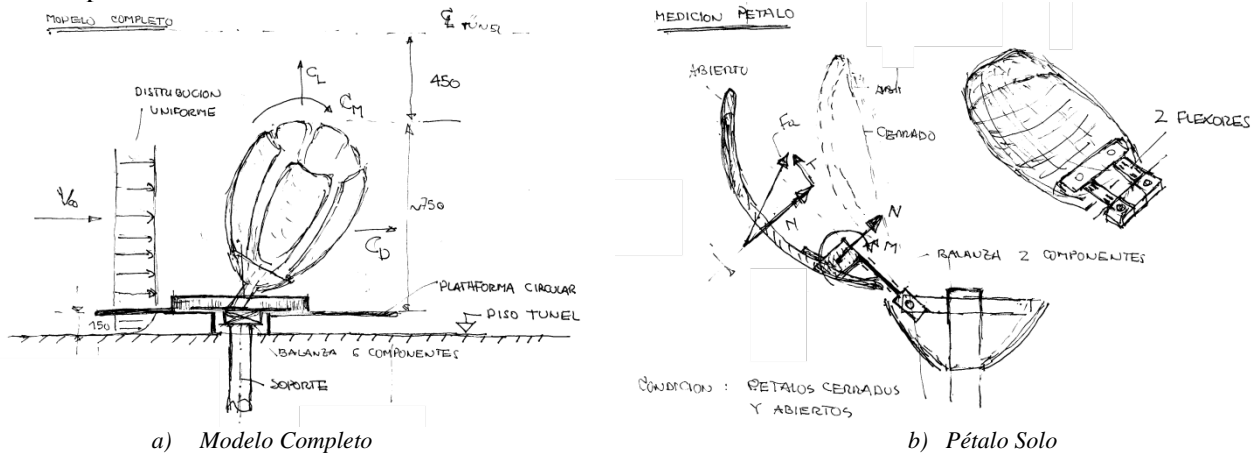


Figura 7: Esquema Modelo de Ensayo en Túnel de Viento

Se investigaron los coeficientes aerodinámicos para diferentes direcciones del viento incidente, mediante un adecuado diseño del sistema de montaje entre el modelo y la balanza aerodinámica.

Considerando que la superficie de los pétalos era curva se investigaron los efectos del número de Reynolds sobre los coeficientes aerodinámicos, siguiendo las recomendaciones de la Norma CIRSOC 102. Esto permitió conocer el comportamiento de los mismos y su extrapolación a las condiciones reales de flujo previstas por la Norma. Asimismo, de corridas específicas realizadas para determinar los coeficientes debido al bloqueo del túnel por presencia del modelo, se determinaron los coeficientes de bloqueo $f = 0.82$ para la flor cerrada y $f = 0.85$ para la flor abierta.

Los resultados se presentaron en forma de coeficientes adimensionales para luego aplicarlos al cálculo de las cargas de viento reales sobre la estructura.



Figura 8: Ensayo en Túnel de la Flor

Se obtuvieron los datos de túnel de viento en bruto en la forma de coeficientes aerodinámicos de fuerza (C_x , C_y , C_z) y de Momento (C_l , C_m , C_n) para las seis posiciones de ensayo con rotaciones de 360° . Adicionalmente se midieron los coeficientes de Fuerza (C_{zp}) y de Momento (C_{mp}) del Pétalo C y de uno de los pistilos.

Posteriormente se corrigieron los coeficientes debido al bloqueo del túnel haciendo:

$$\text{Coeficiente Corregido} = \text{Coeficiente Medido} \cdot f$$

3.3. Corrección por Capa Límite

Con el propósito de no sobredimensionar en exceso la estructura de la Flor al considerar la presión dinámica constante en toda la altura, se procedió a crear un modelo de presión dinámica de cálculo variable.

En este modelo simple se considera dos presiones dinámicas una actuando en la parte superior y otra en la inferior. La presión dinámica actuante en cada sección es la correspondiente a la altura máxima de la misma.

Con las consideraciones anteriores se obtiene una distribución de coeficiente de fuerza por unidad de longitud (C_1 y C_2) tal que la carga total (F_{XY}) y la posición de la resultante (Z') coincida con la medida en túnel de viento si se considera presión dinámica constante a lo largo de toda la flor/pétalo/pistilo (Presión de referencia $q_{ref}= 1000 \text{ kg/m}^3$). Posteriormente se calculan las fuerzas F_1 y F_2 correspondiente a cada sección multiplicando los respectivos coeficientes por las presiones dinámicas existentes en cada sección. Por último se suman las fuerzas y se obtiene la fuerza de corte, Q , final y, con las posición, el momento flector, M_f , a la altura cero.

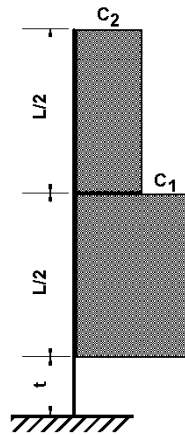


Figura 9: Modelo Simple de Capa Límite

De la sumatoria de fuerzas:

$$C_1 \cdot \frac{L}{2} + C_2 \cdot \frac{L}{2} = F_{XY}$$

De la sumatoria de momentos:

$$\left(C_1 \cdot \frac{L}{2} \right) \cdot \left(\frac{1}{4} \cdot L \right) + \left(C_2 \cdot \frac{L}{2} \right) \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot L \right) = (Z-t) \cdot F_{XY}$$

De las dos ecuaciones anteriores se obtiene:

$$C_1 = \frac{k_1(3 - k_2)}{2} \quad ; \quad C_2 = \frac{k_1(k_2 - 1)}{2}$$

con

$$k_1 = \frac{2 \cdot F_{XY}}{L} \quad ; \quad k_2 = \frac{4(Z-t)}{L}$$

Luego se obtienen las fuerzas de la siguiente manera:

$$F_1 = C_1 \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{q_1}{q_{ref}} \quad ; \quad F_2 = C_2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{q_2}{q_{ref}}$$

El Corte y Momento Flector actuante en la zona de unión entre el Tallo y el piso para la flor y el eje de giro para el Pétalo C/Pistilo, y la posición de la resultante, se obtiene haciendo:

$$Q = F_1 + F_2 \quad ; \quad M_f = F_1 \left(\frac{1}{4} \cdot L + t \right) + F_2 \left(\frac{3}{4} \cdot L + t \right) \quad ; \quad Z = \frac{M_f}{Q}$$

Finalmente se obtienen coeficientes de corrección que permite conocer cuánto se reducen las cargas:

$$COEF_{FUERZA} = Q / F_{XY} \quad ; \quad COEF_{MOMENTO} = Mf / M_{XY}$$

Nota: $M_{XY} = Q \cdot Z'$

En general, usando esta corrección por efecto suelo, la carga resultante es menor y la posición de la misma es más elevada. El momento flector es menor debido a que, a pesar de que aumenta el brazo de palanca, la fuerza actuante es menor. Esto se puede ver al comparar los coeficientes de corrección de fuerza y momento.

3.4. Distribución de Cargas Sobre el Pétalo

Las cargas sobre el pétalo fueron divididas en dos, aerodinámica y por peso propio. Las cargas por peso propio son obtenidas directamente del programa de elementos finitos NASTRAN® y diseño CATIA®.

Las cargas aerodinámicas, medidas como cargas puntuales en el túnel de viento (Fuerza y Momento), son distribuidas utilizando un modelo aerodinámico de Red de Vórtices, mediante la técnica de suma de distribuciones unitarias. El modelo de Red de Vórtices es usado habitualmente en la industria aeronáutica para distribuir cargas aerodinámicas sobre alas de aeronaves (Ref. [3]).

Mediante Red de Vórtices se obtuvieron las siguientes distribuciones unitarias de carga:

- i. Distribución de $(L/q)_{\alpha=0}$, con combadura real y ángulo de ataque nulo ($\alpha=0$ [rad])
- ii. Distribución de $(L/q)_{\alpha=1}$, sin combadura y ángulo de ataque unitario ($\alpha=1$ [rad])
- iii. Distribución de $(L/q)_{\lambda=1}$, sin combadura, ángulo de ataque nulo y alabeo unitario ($\lambda=1$ [rad])
- iv. Distribución de $(L/q)_{\varepsilon=1}$, sin combadura, ángulo de ataque nulo y combadura unitaria ($\varepsilon=1$ [rad])

Definidas las condiciones de los casos, las cargas en el pétalo para cada panel, son calculadas de la siguiente manera:

$$F_{normal} = \left[\left(\frac{L}{q} \right)_{\alpha=0} + \left(\frac{L}{q} \right)_{\alpha=1} \cdot \alpha + \left(\frac{L}{q} \right)_{\lambda=1} \cdot \lambda + \left(\frac{L}{q} \right)_{\varepsilon=1} \cdot \varepsilon \right] \cdot \bar{q}$$

Con las dos primeras distribuciones se fija la intensidad de la carga y con los dos siguientes la posición de la resultante (según envergadura y cuerda respectivamente).

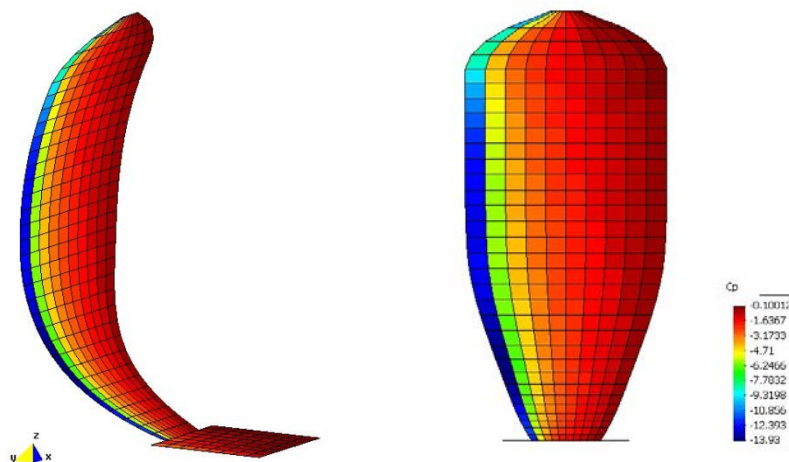


Figura 10: Distribución de presiones sobre el Pétalo C - Distribución unitaria $\alpha=1$ [rad]

Los factores que multiplican cada una de las distribuciones unitarias (α , λ , ϵ) se ajustan para que el valor de la resultante y su posición coincidan con la medida en Túnel de Viento luego de ser corregida por capa límite.

Los nodos de aplicación de carga tanto aerodinámico como estructural fueron proyectados sobre un plano para poder emplear el programa de redistribución de cargas de Ref. [4]. Con dicho programa se transfirieron las cargas desde los paneles del modelo aerodinámico de red de vórtice a los nodos de entrada de carga del modelo estructural NASTRAN®.

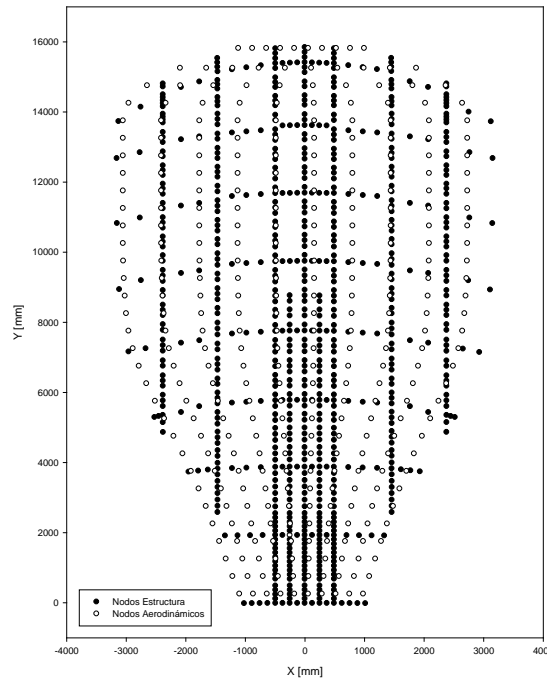


Figura 11: Modelo Plano para Redistribución de Cargas

4. CÁLCULO DE CARGAS

4.1. Cargas Globales en la Flor – Cargas en el Tallo

Las cargas en el Tallo corresponden a las cargas globales de toda la flor ya que las mismas producen corte, flexión y torsión a la base del Tallo (unión Tallo-Piso).

4.1.1. Procedimiento de Cálculo de Cargas en el Tallo

El cálculo se dividió en dos partes, Flor Cerrada y Flor Abierta. El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Paso 1:** Se obtienen los datos de túnel de viento en bruto en la forma de coeficientes aerodinámicos de fuerza (C_x , C_y , C_z) y de Momento (C_l , C_m , C_n) para el viento incidente en los 360° (Figura 7 y Figura 8)
- Paso 2:** Se corrige los coeficientes del paso anterior debido al bloqueo del túnel (ver §3.2)
- Paso 3:** Se transforman los ejes de referencias para que coincidan con un eje geodésico único (Figura 12)..
- Paso 4:** Se traslada el sistema de referencia desde el cero de la balanza al punto correspondiente al centro de simetría de la unión Tallo-Piso (Figura 12). Se corrige por efecto suelo usando los parámetros k_1 , k_2 , F_1 y F_2 definidos en 3.3.
- Paso 5:** Se rotan los ejes de referencia 20° alrededor del eje Y para que el eje Z coincida con el eje de simetría del tallo (Positivo hacia abajo). El origen del sistema permanece en el punto de intersección entre el eje de simetría y el plano del piso (Figura 12).

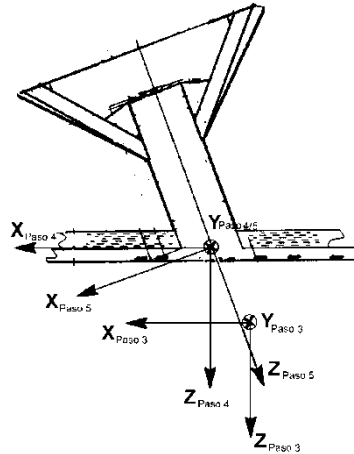


Figura 12: Ejes de Referencia para el Cálculo de Cargas en el Tallo

- Paso 6:** Se obtienen las fuerzas y momentos aerodinámicos que debe soportar la base del tallo usando como referencia $S=151.8 \text{ m}^2$ (Vista en planta), $c= 6.9529 \text{ m}$ (Diámetro de S) y $q=102 \text{ kg/m}^2$ (Presión de referencia= $1000 \text{ [N/m}^2\text{]}$).
- Paso 7:** Se obtienen las cargas por peso propio usando los datos suministrados por el modelo preliminar detallado realizado en NASTRAN®. A este peso se lo aumenta un 10% para tener en cuenta aumentos de peso debido a la presencia de remaches, refuerzos, modificaciones de última hora, etc. Para el tallo se considera conservativamente que el mismo es un cilindro macizo de cemento; debido a esto no se considera el peso del mecanismo. La posición de los centro de gravedad de cada uno de los pétalos es obtenido usando los datos de NASTRAN® y CATIA®. Las cargas son rotadas según el sistema de ejes usado en el Paso 5.
- Paso 8:** Se calculan las cargas totales sumando las cargas aerodinámicas, obtenidas en el Paso 6, y las cargas por peso propio del Paso 7 (Figura 13).

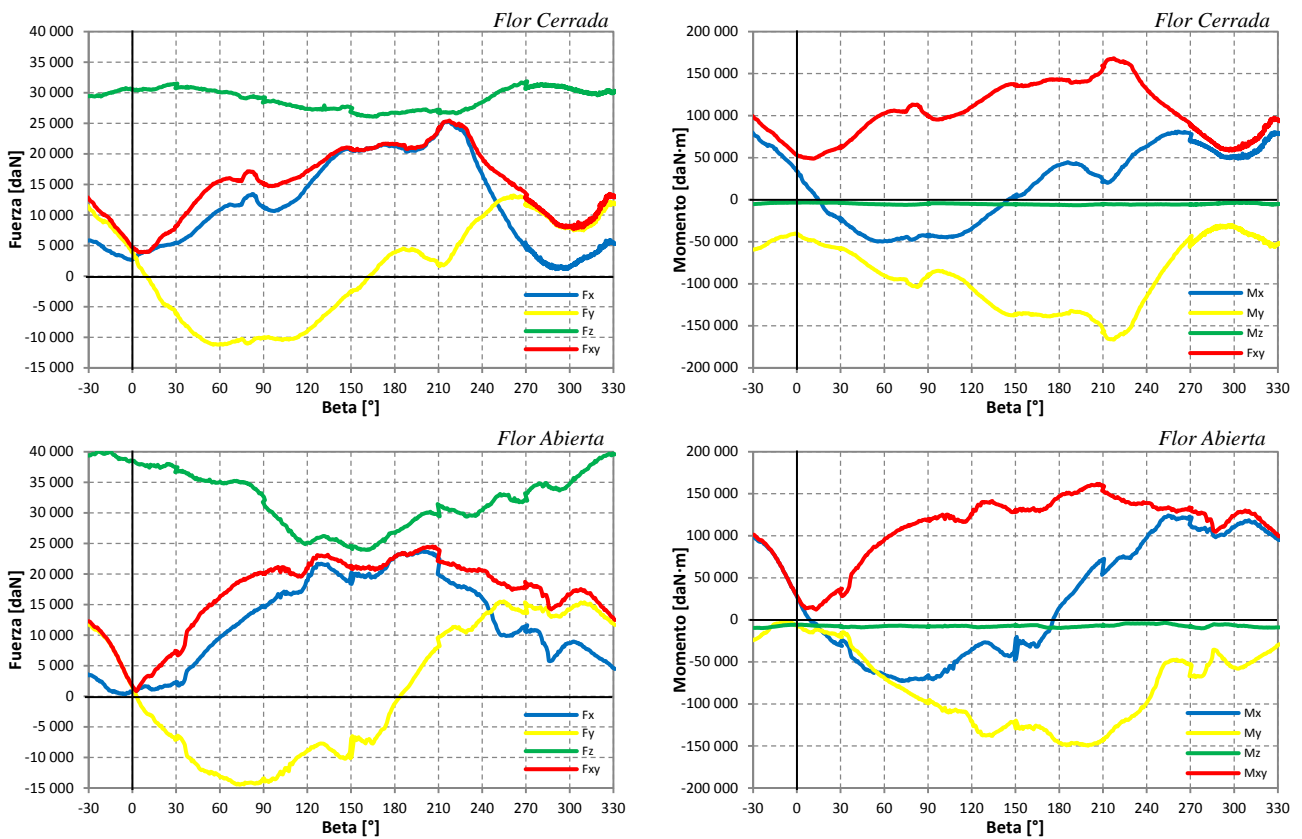


Figura 13: Cargas Totales en el Tallo

4.1.2. Cargas Dimensionante del Tallo

Los casos de carga de diseño son obtenidos seleccionando los valores máximos de Figura 13. Para facilitar la interpretación de los resultados, los mismos son presentados en un sistema de referencia dextrógiro rotado 180° alrededor del eje X respecto del definido en Figura 12 (ver Figura 14).

Tabla 1: Cargas Límites de Diseño del Tallo

CASO	BETA [°]	F _x [daN]	F _y [daN]	F _z [daN]	M _x [daN·m]	M _y [daN·m]	M _z [daN·m]	ESTADO DE LA FLOR
1	217.51	25303	-2716	-26714	25431	166303	5473	CERRADA
2	254.84	10084	-15534	-33019	124251	50220	3956	ABIERTA
3	73.24	11971	14449	-35106	-72787	82456	7074	ABIERTA
4	-22.47	2428	-10485	-40189	90110	15263	9571	ABIERTA
5	277.52	10806	-14451	-34571	108475	67365	10132	ABIERTA

NOTA: Se resaltan las cargas máximas. El CASO 1 produce el máximo momento flector combinado (M_x, M_y).

Sistema de referencia:

Cero del sistema: Unión de la base del tallo con la loza.

Eje Z: Dirección coincidente con el eje de simetría del cilindro que forma el tallo. Sentido: positivo hacia arriba.

Eje X: Dirección del plano de inclinación del tallo. Sentido: ver Figura 14.

Eje Y: Sistema dextrógiro. Sentido: saliente a la Figura 14.

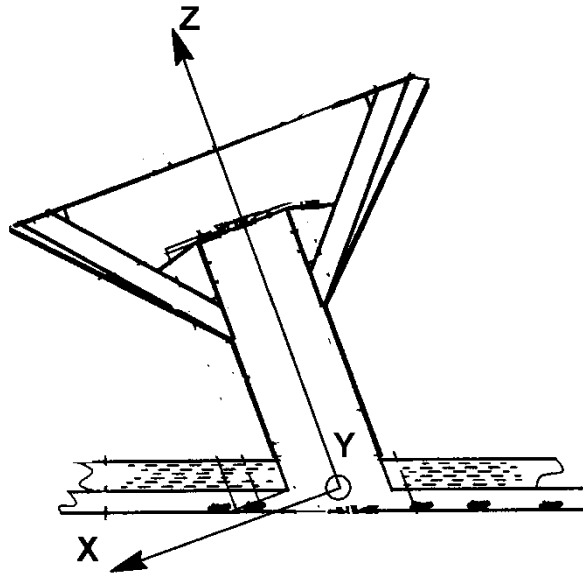


Figura 14: Ejes de Referencia para Cargas Dimensionante del Tallo (Tabla 1)

4.2. Cargas en los Pétalos

Las cargas en los pétalos son obtenidas a partir de las mediciones realizadas en túnel de viento sobre el pétalo con mayor superficie (Pétalo C). Debido a que estructuralmente son todos similares, se analiza el Pétalo C por ser el que soporta mayores cargas.

4.2.1. Procedimiento de Cálculo de Cargas en los Pétalos

Al igual que lo visto para el Tallo, el cálculo se dividió en dos partes, Flor Cerrada y Flor Abierta. En ellos se obtiene los coeficientes de fuerza (CZP) y de momento (CMP) del Pétalo C, a partir de las mediciones en túnel de viento y referidos al sistema de referencia local (Ejes de la balanza - Figura 7-b).

Los coeficientes se transforman en fuerzas, F_z , y momentos M_y , usando como superficie de referencia $S=72 \text{ m}^2$, cuerda $c=13.8 \text{ m}$ y presión dinámica de referencia $q_{ref}=1000 \text{ N/m}^2$. Posteriormente se corrige por efecto de la capa límite según el procedimiento descrito en 3.3.

Las fuerza y momento para cada ángulo de dirección del viento BETA, se trasladan desde el sistemas de ejes locales de la balanza a uno ubicado en el eje de rotación del pétalo, con la fuerza conservando la dirección medida por la balanza local (aproximadamente perpendicular a la envergadura formada por el punto de rotación del pétalo y el extremo del mismo).

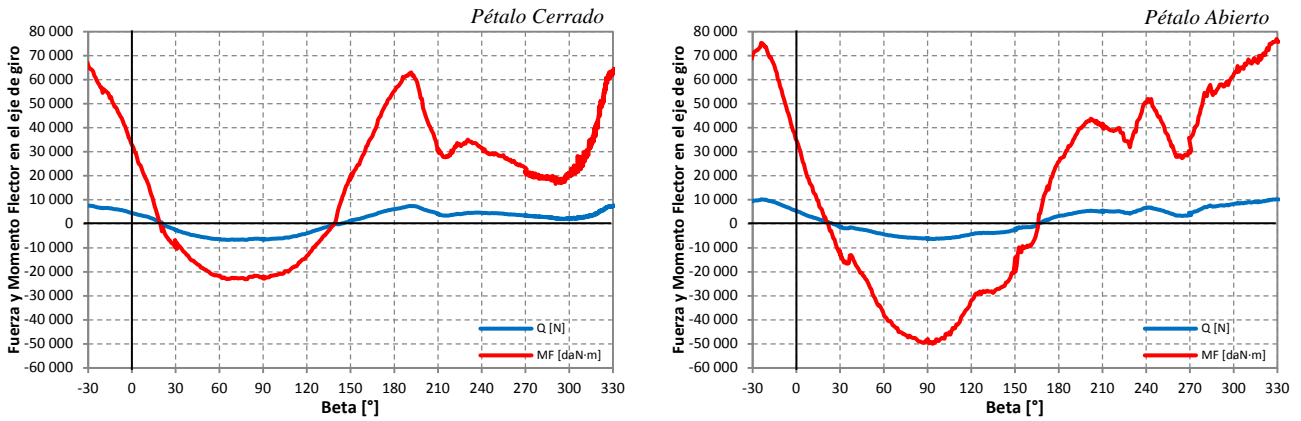


Figura 15: Cargas Aerodinámicas en el Pétalo C

Las cargas aerodinámicas medidas en túnel de viento son distribuidas sobre la superficie del Pétalo C según el procedimiento presentado en §3.4. Las cargas por peso propio son calculadas directamente por NASTRAN®, teniendo en cuenta la inclinación del pétalo respecto de los ejes geodésicos.

4.2.2. Cargas Dimensionante de los Pétalos

Los casos de diseño seleccionados son:

CASO 1 – FLOR ABIERTA L: Caso de máxima sustentación en el Pétalo C ($BETA \approx 330^\circ$). Se asume una resistencia aerodinámica $D=L/8$ actuando perpendicular a la sustentación y en la dirección del viento. La resultante se ubica al 25% de la cuerda.

CASO 2 – FLOR ABIERTA D: Caso de máxima resistencia en el Pétalo C ($BETA \approx 90^\circ$). Como el viento incide perpendicularmente a la superficie, esta fuerza es producida totalmente por resistencia aerodinámica (Sustentación nula). La resultante se ubica al 50% de la cuerda.

CASO 3 – FLOR CERRADA L: Idem CASO 1 pero con el Pétalo C en la posición de cerrado.

CASO 4 – FLOR CERRADA D: Idem CASO 2 pero con el Pétalo C en la posición de cerrado.

CASO 1A – FLOR ABIERTA L- n_y : Debido a que el viento puede incidir en ambos bordes de ataque del pétalo, y debido a la simetría estructural del pétalo e inclinación respecto a la vertical geodésica del mismo, se hace necesario correr un caso similar al CASO 1 pero con el viento incidiendo en el otro borde de ataque. Por simplicidad se asumieron las mismas cargas aerodinámicas del CASO 1 pero se cambió el sentido de la carga másica en la dirección del eje Y (Dirección de la cuerda).

CASO 3A – FLOR CERRADA L- n_y : Idem CASO 1A pero con el Pétalo C en la posición de cerrado.

4.3. Cargas en los Pistilos

Las cargas sobre los pistilos están basadas en las mediciones en túnel de viento realizado sobre uno de ellos. En forma conservativa la medición fue realizada sin pétalos presentes. Además se hizo un análisis de la influencia del número de Reynolds sobre las mediciones.

4.3.1. Procedimiento de Cálculo de Cargas en los Pistilos

El procedimiento de cálculo de cargas y distribución de las mismas sobre el modelo estructural de elementos finitos del Pistilo es similar al seguido en el pétalo (ver §3.4).

La fuerza y momento medido en túnel de viento permite deducir el valor de la resultante de carga y la posición de la misma. De este análisis surge una distribución de carga constante a lo largo del cilindro que conforma el tallo del pistilo y una carga concentrada en la semiesfera superior. La carga aerodinámica en la semiesfera fue estimada en base a mediciones de elementos similares y de la superficie real de la misma, y la másica en base a una estimación de su peso final.

El peso del cilindro que conforma el pistilo es estimado directamente por NASTRAN®.

Los coeficientes medidos en túnel son $C_x=0.85$ y $C_m=0.525$ una vez trasladados y rotados al origen del sistema de coordenadas del modelo de elementos finitos resulta $C_x=0.9$ y $C_m=0.55$.

La superficie y longitud de referencia son $S_{pistilo}= 2.37 \text{ m}^2$ y $l_{pistilo}= 13.5 \text{ m}$ respectivamente. Conservativamente se toma como referencia una presión dinámica $q=1000 \text{ N/m}^2$.

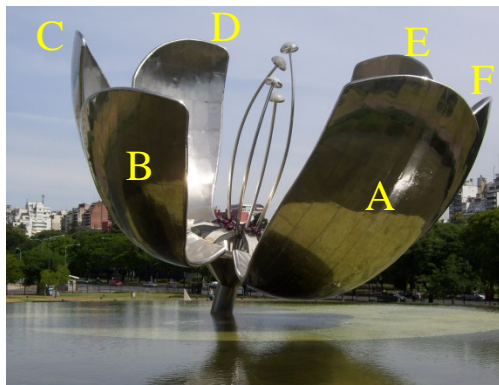


Figura 16: Pistilos y Pétalos de la Flor de Buenos Aires

4.3.2. Cargas Dimensionante de los Pistilos

De lo anterior resulta, para todo el pistilo resulta:

$$F_x = q \cdot S_{pistilo} \cdot C_x \approx 220 [\text{daN}]$$

$$M_y = q \cdot S_{pistilo} \cdot l_{pistilo} \cdot C_m \approx 1800 [\text{daN} \cdot \text{m}]$$

$$Z_{resultante} = M_y / F_x = 8.18 [\text{m}]$$

En base a lo expresado en 4.3.1, se asume que las cargas se distribuyen de la siguiente forma:

Tabla 2: Cargas Límites de Diseño de los Pistilos

Referencia	F_x [daN]	Z_{res} [m]	% $l_{pistilo}$
Semiesfera	40	13.50	1.00
Tallo pistilo	180	7.00	0.52
Total Pistilo	220	8.18	0.61

En la distribución de carga a lo largo del tallo del pistilo (carga constante) se asumió carga nula los primeros 0.5 m para tener en cuenta la parte del Tallo que queda cubierta por el cono.

Este mismo caso de carga fue rotado cada 45° para tener en cuenta la rotación del viento. Es decir en el modelo de estructura se corrieron 8 casos de carga (BETA= $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$).

4.4. Cargas en el Mecanismo

Las cargas en el mecanismo son las utilizadas para dimensionar las partes componentes del sistema que realiza el movimiento de los pétalos (Actuador, bielas, cabezal, etc.).

4.4.1. Procedimiento de Cálculo de Cargas en el Mecanismo

Los casos dimensionante fueron seleccionados del análisis realizado sobre el actuador. Para este elemento fueron analizadas las cargas que soporta en las condiciones flor abierta y cerrada, para viento incidente de los 360°.

Las cargas aerodinámicas en cada uno de los pétalos (ver Figura 16) están basadas en las medidas en túnel de viento en el Pétalo C y modificada según la relación de superficies. Las cargas máxicas fueron estimadas con el modelo NASTRAN® del Pétalo C (Tabla 3).

Tabla 3: Masa de los Pétalos

<i>Pétalo</i>	<i>Superficie [m²]</i>	<i>Masa [kg]</i>
<i>C ingeniería</i>	<i>86.24</i>	<i>3349</i>
A	63.48	2465
B	78.98	3067
C	92.32	3585
D	63.48	2465
E	76.82	2983
F	78.98	3067

NOTA: Masas al 28/12/2000

Se realizaron dos modelos de elementos finitos simplificados del mecanismo (modelo de barras) el cual permite conocer los esfuerzos que soportan cada uno de los elementos que lo componen (Figura 17) (Ref. [2])

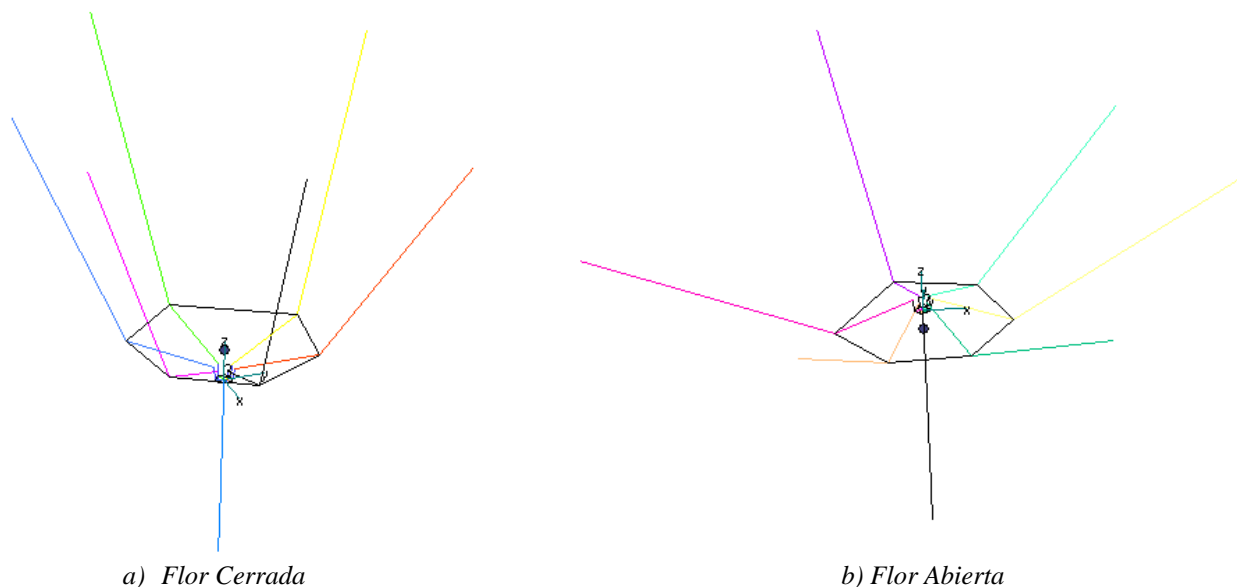


Figura 17: Modelo de Barras del Mecanismo

Las coordenadas para la confección del modelo de barras fueron obtenidas del modelo hecho en CATIA®.

Las cargas aplicadas en los extremos de las barras que modelan a cada uno de los pétalos (aerodinámicas y por peso propio), se encuentran en el mismo plano del mecanismo de cada pétalo. Esta simplificación se realiza

debido a que estas son las únicas cargas que producen momento que afecta al mecanismo. Las cargas perpendiculares a este plano producen un momento que es absorbido por las tomas pétalo-cono.

Para calcular la carga final se aplicaron cargas unitarias en cada uno de los pétalos y se obtuvo la carga en la barra actuadora. El coeficiente que relaciona ambas, en el caso de las cargas aerodinámicas para la flor abierta y cerrada, es la especificada en la Tabla 4.

Tabla 4: Coeficiente que relaciona Carga en el Pétalo – Carga en el Actuador

<i>Ref.</i>	<i>Flor Cerrada</i>	<i>Flor Abierta</i>
A	2.4778	2.2735
B	2.7524	2.5256
C	3.0153	2.7682
D	2.4646	2.3086
E	2.6451	2.4279
F	2.6488	2.4311

En la Figura 18 se puede observar cada una de las componentes de carga que soporta la Barra Actuadora. Se muestran las cargas aerodinámicas producidas por cada uno de los pétalos, la carga por peso propio de los pétalos sumados y la carga total actuante en la Barra Actuadora.

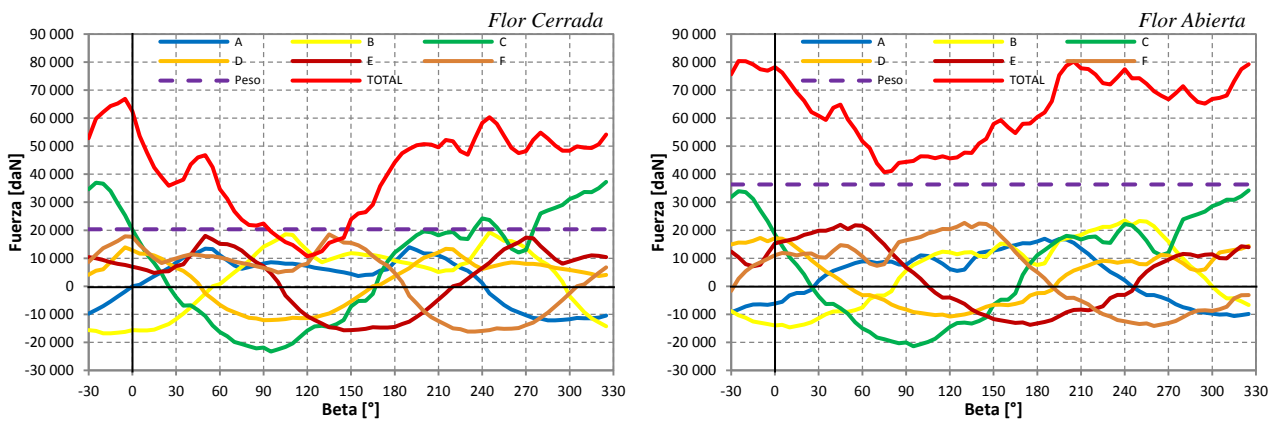


Figura 18: Cargas en la Barra Actuadora y Mecanismos Asociados

4.4.2. Cargas Dimensionante del Mecanismo

De las cargas mostradas en la Figura 18, se seleccionaron los casos de carga dimensionante mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Cargas Límites de Diseño de la Barra Actuadora y Mecanismos Asociados

Caso	Beta [°]	Configuración	Carga en el Actuador [daN]
1 Ab	-25	Abierta	80382
2 Ab	205	Abierta	80186
3 Ab	70	Abierta	43886
1 Ce	-5	Cerrada	67000
2 Ce	120	Cerrada	10709
3 Ce	215	Cerrada	52222

4.5. Cargas en el Cono

Las cargas en el cono, son las cargas dimensionante de la estructura del cono y las tomas pétalo-cono.

Debido a la complejidad geométrica de la estructura y sus cargas, las cargas dimensionante de las tomas y la estructura en si fueron obtenidas separadamente.

4.5.1. Procedimiento de Cálculo de Cargas en el Cono

Las cargas dimensionante de las tomas cono-pétalo y zona adyacente son las obtenidas de las reacciones calculadas por el modelo NASTRAN® y producidas por las cargas que dimensionan los pétalos presentadas en §4.2.

Las cargas globales que permiten dimensionar/verificar la estructura del cono son los mismos casos de carga que permiten dimensionar el tallo (ver §4.1). Estas cargas son introducidas en la parte superior del cono en su eje de simetría. Las fuerzas y momentos son la resultante de trasladar las fuerzas y momentos obtenidos para la unión tallo-loza (Tabla 1) más la carga en la dirección del eje de simetría producida por el actuador (ver §4.4).

4.5.2. Cargas Dimensionante del Cono

Las cargas dimensionante del cono se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6: Cargas Límites de Diseño del Cono

<i>CASO</i>	<i>BETA</i> [°]	<i>F_x</i> [daN]	<i>F_y</i> [daN]	<i>F_z</i> [daN]	<i>M_x</i> [daN·m]	<i>M_y</i> [daN·m]	<i>M_z</i> [daN·m]
<i>1</i>	217.51	25303	-2716	-67726	13883	58740	5579
<i>2</i>	254.84	10084	-15534	-93946	58218	7354	4033
<i>3</i>	73.24	11971	14449	-65327	-11365	31568	7211
<i>4</i>	-22.47	2428	-10485	-109012	45539	4943	9756
<i>5</i>	277.52	10806	-14452	-94222	47041	21431	10328

5. CONCLUSIONES

Se ha intentado resumir en unas pocas páginas el cálculo de cargas realizado en la etapa de diseño de la escultura Flor de Buenos Aires, actualmente conocida como Floraris Genérica.

Las cargas aerodinámicas aquí presentadas están basadas en mediciones realizadas en túnel de viento y las cargas por peso propio en base a estimaciones hechas usando modelos digitales en un estado avanzado de diseño.

Los ensayos en túnel de viento demostraron que las cargas aerodinámicas resultaron muy superiores a las estimadas inicialmente. Esto se debe a que la forma geométrica de los pétalos, y su posición relativa en cascada, hacen que el flujo permanezca adherido a grandes ángulos de ataque. Al poseer los pétalos perfiles de gran combadura, con bordes de ataque redondeados, espesor relativo de 3%, sumado al efecto suelo permiten alcanzar coeficientes de sustentación máximos en los pétalos superiores a 1.6 (ver el flujo adherido en el Pétalo C en la Figura 8).

Claramente quedó demostrado que en estructuras como estas es necesario realizar detallados estudios aerodinámicos para la determinación de cargas.

La forma estructural de los pétalos diseñados con los mismos criterios que los diseños de alas de aviones con geometría variable, resultó en una estructura y mecanismo sumamente eficiente y elegante.

REFERENCIAS

- [1] Reglamento CIRSOC 102, "Acción del Viento sobre las Construcciones", SIREA-INTI, Dic-1984.
- [2] Barengo C.E., "FLOR DE BUENOS AIRES – ANTEPROYECTO", IT: 079/00, LMAASA, Córdoba, 7-Jul-2000.
- [3] Hedman Sven G., "VORTEX LATTICE METHOD FOR CALCULATION OF QUASI STEADY STATES LOADINGS ON THIN ELASTIC WINGS IN SUBSONIC FLOW", FFA REPORT 105, STOCKHOLM 1966.
- [4] Scarpin G., "REDISTRIBUCION MATRICIAL DE CARGAS – METODO DE LA ESTRUCTURA VIRTUAL –", DDA-DFV-FC, NT N° 382, CORDOBA 1989.
- [5] Ibarrola E.L., Soria L.A., Lamarque G., Fanin P., "FLOR CIUDAD DE BUENOS AIRES – ENSAYOS EN TUNEL DE VIENTO", LMAASA, GERENCIA DE EXPERIMENTAL, I.T. N° 026/01, CORDOBA 2001.