

## Anexo B. Cálculos

En este anexo se desarrollan los cálculos que se han citado en el cuaderno principal de este proyecto. Este anexo da las explicaciones necesarias para completar el texto.

# ÍNDICE

<b>ANEXO B. CÁLCULOS</b>	<b>1</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>2</b>
<b>B.1. GLOSARIO</b>	<b>3</b>
<b>B.2. SOLICITACIONES</b>	<b>5</b>
B.2.1. Componentes .....	6
<b>B.3. CÁLCULO DE LA RIGIDEZ</b>	<b>13</b>
<b>B.4. CÁLCULOS ESTRUCTURALES</b>	<b>17</b>
<b>B.5. SELECCIÓN DEL MOTOR</b>	<b>22</b>
<b>B.6. CÁLCULO DE DEGSASIFICACIÓN</b>	<b>24</b>
B.6.1. Presiones entre 1013 y $10^{-2}$ mbar (Bomba primaria).....	24
B.6.2. Rango de presiones entre $10^{-2}$ y $10^{-6}$ mbar (Bomba Turbo).....	27
B.6.3. Rango de presiones inferiores a $10^{-6}$ mbar (Bomba iónica y NEG).....	28
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>30</b>
Referencias bibliográficas .....	30

## B.1. Glosario

- *UHV*: Abreviatura de la palabra inglesa ultra high vacuum (ultra alto vacío).
- *Rotary*: Elemento con movimiento circular integrado en MARES encargado de integrar los detectores en MARES.
- *Endstation*: Parte de las diferentes líneas de luz del sincrotrón ALBA donde se realizan los diversos experimentos con luz sincrotrón.
- *BOREAS*: Abreviatura de las palabras inglesas 'Beamline for resonant absorption and scattering' y nombre del laboratorio de luz número 29 del sincrotrón ALBA.
- *MARES*: Abreviatura de las palabras inglesas 'Magnetic resonant scattering' y nombre de la segunda endstation de BOREAS.
- *BL*: Abreviatura de la palabra inglesa Beam Line, Las Beam Line son cada uno de los laboratorios de investigación que forman el sincrotrón ALBA.



## B.2. Solicitaciones

En este punto del diseño, fase conceptual, ya se han decidido algunos de los elementos estándar más importantes. En consecuencia, resulta interesante el cálculo de la fuerza estática total que actúa sobre el subconjunto móvil.

Esta fuerza es necesaria para realizar diferentes pruebas con elementos finitos y continuar con el diseño del proyecto y poder pasar al diseño detallado de éste. El diagrama de todas las fuerzas que actúan sobre el subconjunto móvil, se puede observar en la figura B.1.

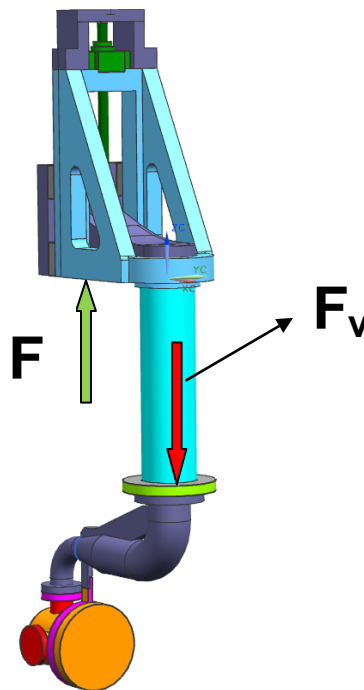


Fig B.1. Sistema de fuerzas del sistema.

## B.2.1. Componentes

### *Fuerza de vacío*

Esta componente se aplica en el fuelle (“bellow”) que es el componente elástico que realiza la transición entre la presión atmosférica y el UHV garantizando la estanqueidad y que permite el desplazamiento del detector.

La Tabla B.1 muestra las principales características del fuelle seleccionado dadas por el fabricante. Éstas nos permiten calcular las dimensiones principales del fuelle que han sido necesarias para el posterior cálculo de la fuerza que provoca el vacío en él.

### *Características del fuelle seleccionado*

ID (mm)	OD (mm)	Ic (mm)	If (mm)	z (mm)	t (mm)	EA (m <sup>2</sup> )	SRCz (N/mm)
102	132	0,6	2,6	3,10	0,15	0,01107	75

Tabla B.1. Características del fuelle seleccionado.

Con la ayuda de los datos facilitados por el proveedor (comvat), se calculan los siguientes datos de interés: número de convoluciones del fuelle, longitud comprimida, longitud libre y longitud extendida. La Tabla B.2 recoge el resumen de estas características y la figura B.2 muestra un esquema del fuelle donde se indican las magnitudes calculadas.

$$N = \frac{\text{desplazamiento}}{z} \quad (\text{Ec. B.1})$$

Donde N es el número de convoluciones del fuelle y para este proyecto se considera un desplazamiento total de 155 mm.

$$LC = Ic \cdot N \quad (\text{Ec. B.2})$$

Donde LC es la longitud que tiene el fuelle cuando se encuentra en la máxima compresión.

$$LF = If \cdot N \quad (\text{Ec. B.3})$$

Considerando LF la longitud del muelle en la posición de trabajo.

$$LE = (z \cdot N) + LC \quad (\text{Ec. B.4})$$

Donde LE es la longitud del fuelle estirado completamente.

N	LC (mm)	LF (mm)	LE (mm)
60	29,8	143,1	184,8

Tabla B.2. Resumen de características.

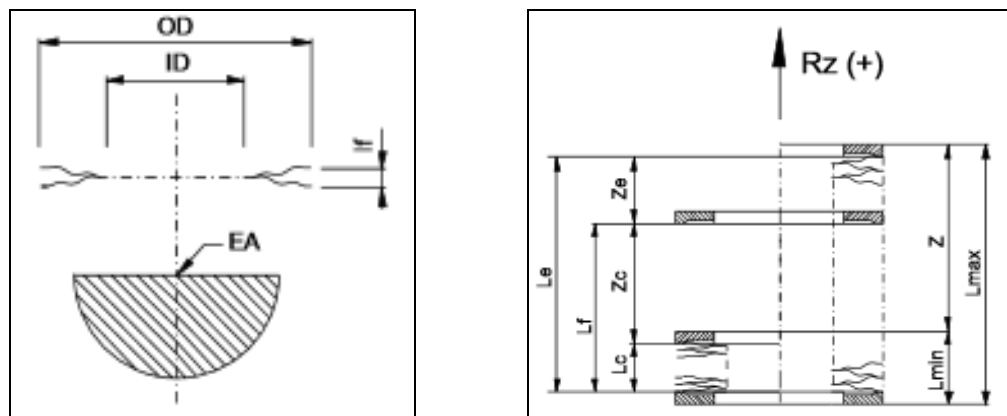


Fig. B.2. Esquema de las características del fuelle.

Para realizar el cálculo de la fuerza se ha considerado que la presión de vacío es de 0 Pa, mientras que para la presión atmosférica se han considerado los siguientes incrementos de presión. Una nominal de 101325 Pa y dos calculadas a partir de realizar un incremento y un decremento de un 5% del valor nominal, por lo tanto, los cálculos se realizarán con estas tres situaciones:

	<b>P (Pa)</b>
<b>Máxima (+5%)</b>	106391,25
<b>Nominal</b>	101325
<b>Mínima (-5%)</b>	96258,75

---

 Tabla B.3. Tabla de presiones atmosféricas

### 1. Fuerza en la brida del fuelle

La brida del fuelle corresponde a una DN100CF. Esto se debe a que la brida de conexión en MARES es una DN100CF instalada en la superficie interior del rotary. Por lo tanto la componente de esta fuerza se calcula según la ecuación B.5:

$$F_{CF100} = \Delta P \cdot A_{Fuelle} \quad (\text{Ec. B.5})$$

Donde  $\Delta P$  es el incremento de presiones explicado anteriormente y  $A_{Fuelle}$  es el área interior del fuelle, con un valor de 102 mm.

A partir de la Ec. B.5 se obtienen los siguientes resultados para la fuerza en la brida del fuelle.

	<b>F<sub>CF100</sub> (N)</b>
<b>Máxima</b>	869,4
<b>Nominal</b>	828
<b>Mínima</b>	786,6

---

 Tabla B.4. Cálculo de la fuerza en la brida del fuelle



## 2. Fuerza en las convoluciones del fuelle.

Esta componente es debida al efecto de la primera y última convolución de la membrana, sólo es debido a estas dos porque en el resto de convoluciones las fuerzas quedan enfrentadas y se anulan entre sí. Para un correcto cálculo de esta componente el fabricante nos facilita el área equivalente generada por las convoluciones (EA). Con este dato y la ecuación B.6 se ha calculado la segunda componente de la fuerza que produce el UHV. Véase la Tabla B.5.

$$F_B = \Delta P \cdot EA \quad (\text{Ec. B.6})$$

Donde EA es el área efectiva en las membranas y es un valor aportado por el fabricante, véase Tabla B.1.

	<b>F<sub>B</sub> (N)</b>
<b>Máxima</b>	1177,8
<b>Nominal</b>	1121,7
<b>Mínima</b>	1065,6

Tabla B.5. Cálculo de la fuerza en la convoluciones del fuelle

## 3. Fuerza por efecto muelle

El fuelle, por la forma en la que está fabricado y de la forma en la que se utiliza, ejerce una fuerza sobre el sistema similar a la que ejercería un muelle. Esta fuerza se puede calcular utilizando las características elásticas de la membrana. Se ha de tener en cuenta que dependiendo del punto donde nos encontremos esta fuerza elástica será favorable o contraria a la resultante total de las fuerzas ejercidas sobre el mecanismo.

$$F_s = \frac{SRC_z}{N} \cdot (LF - LC) \quad (\text{Ec. B.7})$$

$$F_s = 150 \text{ N}$$

En conclusión, Teniendo en cuenta todas las componentes de las fuerzas desarrolladas en los apartados anteriores. Se puede obtener la resultante como una única fuerza de una única componente. Esto se puede considerar de esta forma ya que todas las componentes están aplicadas en la misma dirección y en el mismo punto.

	<b>Fvacío (N)</b>
<b>Máxima</b>	2197,1
<b>Nominal</b>	2099,6
<b>Mínima</b>	2002,1

Tabla B.6. Cálculo de la fuerza total de vacío

La componente del peso viene dada por tres elementos. La masa del tubo, el soporte intermedio y los elementos que se encuentran dentro de UHV. La Tabla B.7 muestra cada uno de los pesos y la correspondiente fuerza.

$$F_{\text{PESO}} = P_{\text{TOTAL}} \cdot g$$

(Ec. B.8)

	<b>Peso (kg)</b>	<b>Fuerza (N)</b>
<b>Sop. Inter.</b>	22,1	216,8
<b>Tubo</b>	11	107,9
<b>Elementos de vacío</b>	13,8	135,4
<b>Total</b>	46,9	<b>460,1</b>

Tabla B.7. Cálculo de la fuerza total del peso

*Fuerza total*

Finalmente y de cara al cálculo del motor paso a paso, se ha calculado la fuerza total que se ejerce en el sistema como la suma de las dos fuerzas calculadas anteriormente. La tabla B.8 muestra los resultados de la fuerza total que actúa en el soporte.

	<b>Ftotal (N)</b>
<b>Máxima</b>	2657,2
<b>Nominal</b>	2559,7
<b>Mínima</b>	3414

Tabla B.8. Cálculo de la fuerza total para la selección del motor



## B.3. Cálculo de la rigidez

Uno de los pasos más importantes de cara a la simulación numérica es el correcto modelado de los elementos manufacturados que se van a integrar en el dispositivo. De esta forma se podrá predecir con mayor exactitud el comportamiento del soporte.

En este caso, se han sustituido todos los elementos responsables del movimiento del detector, tales como guías, carros, husillo, etc; por su rigidez equivalente.

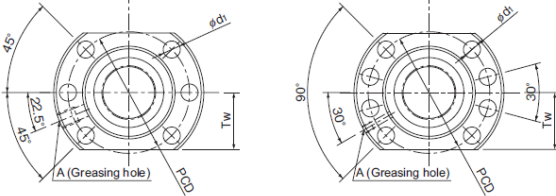
Una vez se ha obtenido la rigidez equivalente, la calculista ha introducido esta rigidez como un módulo de Young de un “*Soft Material*” creado por ella que modela el comportamiento de los elementos.

Todos los cálculos de rigidez se han realizado una vez elegidos los componentes estándar de la cadena cinemática. Esto se debe a que la mayor parte de los datos han sido obtenidos de las hojas técnicas de los fabricantes. A continuación se muestra cada una de las selecciones y se calcula la respectiva rigidez.

### Tuerca del husillo

Unos de los proveedores de confianza de husillos de CELLS es THK, la siguiente figura B.3 ha sido extraída del catálogo de THK donde la rigidez de la tuerca es un dato de fabricante.

**Model EBB (Dimensional Table of Model EBB Over-ball preloaded type or non-preloaded type)**



Model No.	Screw shaft outer diameter d	Lead f	Ball diameter Da	Ball center-to-center diameter dp	Screw shaft outer diameter d <sub>s</sub>	No. of loaded circuits Rows x turns	Basic load rating		Rigidity K N/μm
							Ca kN	Ca kN	
EBB 1605-4	16	5	3.175	16.75	13.1	4×1	11.9	17.4	210
EBB 2005-3	20	5	3.175	20.75	17.1	3×1	10.6	17.3	200
EBB 2505-3	25	5	3.175	25.75	22.1	3×1	12.1	22.6	250
EBB 2510-3	25	10	3.969	26	21.6	3×1	15.9	27	250
EBB 2510-4	25	10	3.969	26	21.6	4×1	20.9	37.6	330

Fig. B.3. Imagen catalogo THK, rigidez de la tuerca modelo EBB

El modelo escogido es el EBB 1605-4, y se toma como valor de la rigidez:

$$K_{\text{tuerca}} = 2,10 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

#### *Eje del usillo*

Para el cálculo de la rigidez del eje del husillo, también han sido necesarios los datos del fabricante, pero además, se requieren los datos geométricos de la pieza. Este cálculo ha sido realizado para tres posiciones diferentes. Las posiciones en las que se han realizado los cálculos son las siguientes.

- Completamente extendido:  $L_1 = 237,74 \text{ mm}$
- Posición de trabajo:  $L_1 = 192,74 \text{ mm}$
- Completamente comprimido:  $L_1 = 82,74 \text{ mm}$

Para obtener la rigidez basta con aplicar la siguiente Ecuación B.9:

$$K_e = k \cdot \frac{d_2^2}{L_1} \quad (\text{Ec. B.9})$$

Dónde:

- $K$  = constante experimental del fabricante de valor 165.
- $d_2$  = diámetro mínimo del eje: 17.1 mm.
- $L_1$  = distancia entre el centro de la tuerca y el centro del soporte fijo en mm.

Aplicando los valores anteriores se ha obtenido la rigidez en cada una de las posiciones, para la realización de los cálculos se ha decidido optar por la posición de trabajo.

- Completamente extendido:  $K_e = 2,03 \cdot 10^8 \text{ N/m}$ .
- Posición de trabajo:  **$K_e = 2,50 \cdot 10^8 \text{ N/m}$** .
- Completamente comprimido:  $K_e = 5,83 \cdot 10^8 \text{ N/m}$ .

### Soporte de los rodamientos

En el caso del soporte del rodamiento, se ha elegido el soporte completo, con rodamiento incluido en función del diámetro del eje. Una vez elegido el soporte, se obtiene la referencia del rodamiento que el soporte incluye, y con la referencia del rodamiento, se ha buscado en los datos del fabricante la rigidez del mismo:

- Fabricante: SKF
- Modelo: FLRBU1
- Conjunto de rodamientos: 7201BEGP / GMP5

Flanged bearing unit designation	Angular contact ball bearing (40°)							Lock nut				
	Basic load rating (axial)		Number of bearings	Bearings designation	Maximum preload torque *	Axial rigidity	Tilt rigidity	High precision KMT nut				
	C <sub>a</sub> kN	C <sub>0a</sub> kN						Designation	Hook spanner	Tightening torque (Nm) Nm	Grub screws Size	Max. tightening torque (Nm)
FLRBU1	13,3	14,7	2	7201 BEGBP	0.10	150	40	KMT 1	HN 3	10	M5	4,5
FLRBU2	27.9	31.9	2	7303 BEGBP	0.25	190	51	KMT 3	HN 4	15	M6	8
FLRBU3	40.1	63.8	4	7204 BEGBP	0.25	400	140	KMT 4	HN 5	18	M6	8
FLRBU4	74.2	119.2	4	7305 BEGBP	1.10	450	160	KMT 5	HN 5	25	M6	8

Fig. B.4. Tabla resumen con las características del soporte de rodamientos seleccionado.

La rigidez del soporte de los rodamientos es la siguiente:

$$K_s = 1,5 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

#### Rigidez total

Los tres elementos anteriores están colocados en serie y serán los elementos que pueden ser sustituidos por un muelle de constante equivalente a la calculada a continuación o bien por un eje rígido con el diámetro mínimo. Para esta segunda opción se deberá aplicar la rigidez de cada uno de los elementos a un 'soft material' teniendo éste la rigidez como propiedad principal.

$$K_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{K_{nut}} + \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K}} \quad (\text{Ec. B.10})$$

La rigidez equivalente utilizada en el modelo de simulación toma el siguiente valor.

$$K_{eq} = 0,61 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$

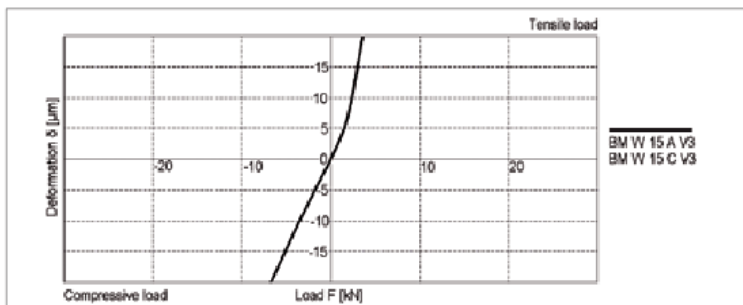
*Guías lineales*

El modelo elegido para el sistema de dos guías perfiladas con cuatro carros en total es:

- Fabricante: Schneeberger
- Modelo guía perfilada: BM-S-15-ND
- Modelo de carros: BM-W-15-F

El fabricante pone a nuestra disposición una hoja de características para este conjunto en el cual incluye un diagrama de rigidez, véase Figura B.5.

BM W 15 Rigidity diagram



BM W 15 Load rating

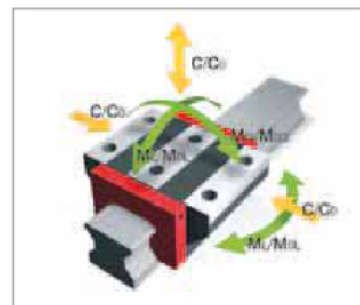


Fig. B.5. Imagen del catálogo schneeberger, diagrama de la rigidez del modelo BM15-F

El siguiente valor se ha obtenido aproximando la gráfica anterior por una recta y gracias a la ecuación B.10.

$$K_s = \frac{F}{\delta} \quad (\text{Ec. B.10})$$

La rigidez obtenida es:

$$K_g = 3500/20 \cdot 10^{-6} = 1,75 \cdot 10^8 \text{ N/m}$$



## B.4. Cálculos estructurales

Para la realización de los cálculos estructurales se ha aplicado el teorema de Castigliano a la siguiente estructura simplificada Fig. B.6. Esta figura representa de manera simplificada el proyecto en la posición nominal de trabajo.

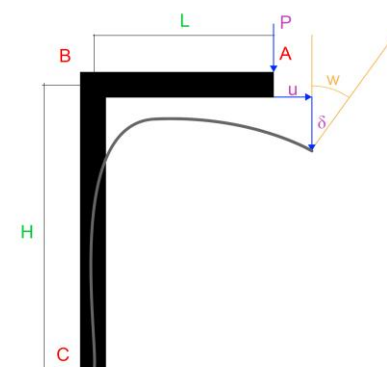


Fig. B.6. Esquema de la estructura simplificada del proyecto.

En la siguiente tabla B.9, se encuentran los datos necesarios para poder aplicar el teorema correctamente y calcular las deformaciones que se muestran a continuación.

<b>P (N)</b>	<b>I (mm)</b>	<b>h (mm)</b>	<b>S<sub>1</sub> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>S<sub>2</sub> (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>E (MPa)</b>	<b>G (MPa)</b>
2657,2	45	218	6300	6000	210000	78947,4
<b>b<sub>1</sub> (mm)</b>	<b>h<sub>1</sub> (mm)</b>	<b>b<sub>2</sub> (mm)</b>	<b>h<sub>2</sub> (mm)</b>	<b>I<sub>1</sub> (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>I<sub>2</sub> (mm<sup>4</sup>)</b>	<b>ν</b>
90	70	200	30	2572500	450000	0,33

Tabla B.9. Resumen de datos de los elementos estructurales

El teorema de Castigliano establece que el movimiento en la dirección de un esfuerzo es igual a la derivada parcial de la energía elástica total respecto del esfuerzo, ecuación B.11.

$$\delta = \frac{\partial w}{\partial P} \tag{Ec. B.11}$$

La energía elástica es el resultado del trabajo originado por las sollicitaciones internas (tracción, compresión, flexión, torsión...).

Con todo, la ecuación generalizada de Castigliano, para este caso, resulta por lo tanto la siguiente:

$$\delta = \int_A^B \left( \frac{N}{ES_1} \cdot \frac{\partial N}{\partial P} + \frac{T}{GS_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial P} + \frac{M}{EI_1} \cdot \frac{\partial M}{\partial P} \right) dl + \int_B^C \left( \frac{N}{ES_2} \cdot \frac{\partial N}{\partial P} + \frac{T}{GS_2} \cdot \frac{\partial T}{\partial P} + \frac{M}{EI_2} \cdot \frac{\partial M}{\partial P} \right) dl \tag{Ec. B.12}$$

La Fig. B.7 representa el diagrama de esfuerzos normales, cortantes y momentos a los que está sometida la estructura. Con la ayuda de éstos se ha realizado la tabla B.10, que recoge un resumen de dichos esfuerzos.

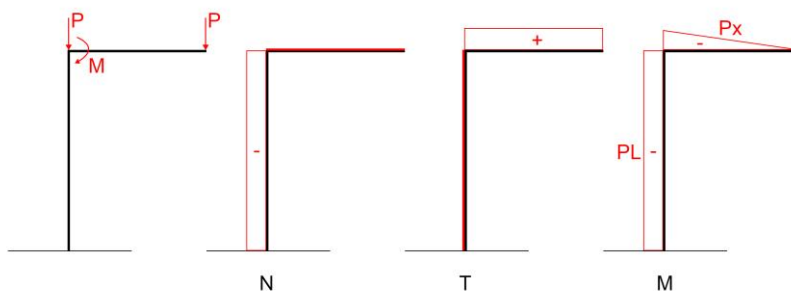


Fig. B.7. Esfuerzos normales, cortantes y momentos respectivamente.

Tramo	N	$\partial N/\partial F$	T	$\partial T/\partial F$	M	$\partial M/\partial F$
AB	0	0	P	1	-Px	-x
BC	-P	-1	0	0	-Pl	-l

Tabla B.10. Resumen de esfuerzos

En la siguiente ecuación, Ec. B.13, se han sustituidos los valores de la tabla B.10 en la ecuación general de Castigliano, Ec. B.12.

$$\delta = \int_0^l 0 + \frac{P}{GS_1} + \frac{(-Px)}{EI_1} \cdot (-x) dx + \int_0^h \frac{-P}{ES_2} (-1) + 0 + \frac{-Pl}{EI_2} (-l) dx \quad (\text{Ec. B.13})$$

Finalmente tras resolver las integrales de la Ec. B.13, se obtiene la siguiente expresión que calcula la flecha vertical en la dirección de la fuerza aplicada.

$$\delta = \frac{Pl}{GS_1} + \frac{Pl^3}{3EI_1} + \frac{Ph}{ES_2} + \frac{Pl^2h}{EI_2} \quad (\text{Ec. B.14})$$

$$\delta = (\approx 0) + \frac{Pl^3}{3EI_1} + (\approx 0) + \frac{Pl^2h}{EI_2} \quad (\text{Ec. B.15})$$

Tras realizar las correspondientes simplificaciones e introducir los valores numéricos de la tabla B.9 en la Ec. B.15, el valor de la flecha vertical se muestra en la tabla B.12.

Mediante este método se puede calcular también flechas o deformaciones en puntos de la viga donde no haya cargas aplicadas. En este caso es interesante averiguar el desplazamiento horizontal que sufre la estructura al aplicar la fuerza P.

Para ello se coloca una fuerza ficticia en el punto cuya deformación se desea calcular, véase Fig. B.8.

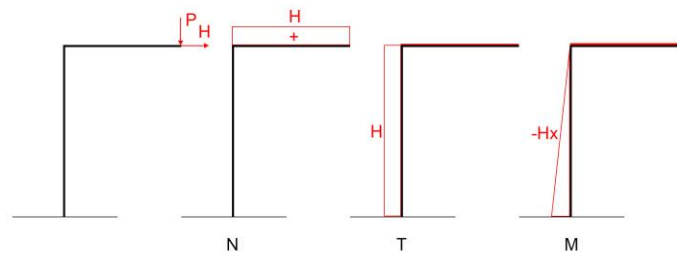


Fig. B.8 Esquema del punto aplicación de la fuerza ficticia, H, y diagramas de esfuerzos

Tramo	N+n	$\partial N/\partial P$	T+t	$\partial T/\partial P$	M+m	$\partial M/\partial P$
AB	0+H	1	P+0	0	-Px+0	0
BC	-P+0	0	0+H	1	-Pl-Hx	-x

Tabla B.11. Resumen de esfuerzos

Mediante los diagramas de esfuerzos representados en la Fig. B.8 se calculan cada uno de los elementos necesarios, representados en la tabla B.11.

$$u = \frac{\partial w}{\partial H} \quad (\text{Ec. B.16})$$

$$u = \int_0^l \left( \frac{N+n}{ES_1} \cdot \frac{\partial N}{\partial P} + \frac{T+t}{GS_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial P} + \frac{M+m}{EI_1} \cdot \frac{\partial M}{\partial P} \right) dl + \int_0^h \left( \frac{N+n}{ES_2} \cdot \frac{\partial N}{\partial P} + \frac{T+t}{GS_2} \cdot \frac{\partial T}{\partial P} + \frac{M+m}{EI_2} \cdot \frac{\partial M}{\partial P} \right) dx \quad (\text{Ec. B.17})$$

$$u = \int_0^l \left( \frac{0+H}{ES_1} \cdot 1 + \frac{P+0}{GS_1} \cdot 0 + \frac{-Px+0}{EI_1} \cdot 0 \right) dx + \int_0^h \left( \frac{-P+0}{ES_1} \cdot 0 + \frac{0+H}{GS_2} \cdot 1 + \frac{-Pl-Hx}{EI_2} \cdot (-x) \right) dx \quad (\text{Ec. B.18})$$

Puesto que la fuerza H considerada es ficticia, toma como valor cero, obteniendo la expresión de la Ec. B.19.

$$u = \int_0^h \left( 0+0 + \frac{-Pl}{EI_2} \cdot (-x) \right) dx = \frac{Pl^2}{2EI_2} \quad (\text{Ec. B.19})$$

Tras introducir los valores numéricos de la tabla B.9 en la Ec. B.19, el valor de la flecha horizontal se muestra en la tabla B.12.

Finalmente se calcula el ángulo que se deforma el punto A de nuestra estructura mediante la expresión de la Ec. B.22. El valor del ángulo se encuentra en la tabla B.12.

$$w_A = \frac{\partial w}{\partial M} \quad (\text{Ec. B.20})$$

$$w_A = \int_0^l \frac{N}{ES_1} \cdot \frac{\partial N}{\partial M} + \frac{T}{GS_1} \cdot \frac{\partial T}{\partial M} + \frac{-Px}{EI_1} \cdot (-1) dx + \int_0^h 0 + 0 + \frac{-Pl}{EI_2} (-1) dx \quad (\text{Ec. B.21})$$

$$w_A = \frac{Pd^2}{2EI_1} + \frac{Plh}{EI_2} \quad (\text{Ec. B.22})$$

	<b>Resultados</b>
Flecha vertical (mm)	0,078
Flecha horizontal (mm)	0,006
Total (mm)	0,078
Angulo (°)	0,023

---

Tabla B.12. Resumen de los valores de las deformaciones

## B.5. Selección del motor

*Antecedentes:*

En este apartado se van a tratar las necesidades dinámicas del sistema así como las características requeridas a la cadena cinemática, de forma que se obtengan las características propias del motor paso a paso que se instalará para que cumpla con todas las funciones que le han sido encomendadas.

*Calculo del par que deberá ejercer el motor:*

Para calcular el par resistente que debe vencer el motor para poner en movimiento el sistema, partimos de la fuerza calculada anteriormente y de la relación existente en el catálogo del fabricante del husillo entre el giro del eje y el desplazamiento axial cuando este funciona de forma directa, es decir, cuando la aplicación de un giro en el eje produce un desplazamiento en dirección axial.

En los apartados anteriores de este anexo se han obtenido datos que serán necesarios en el cálculo actual, dichos datos han sido calculados u obtenidos de hojas de datos de los fabricantes. Dichos datos son:

$$p = 5 \text{ mm} \cdot \text{vuelta}^{-1}$$

$$F_T = 2657,2 \text{ N}$$

$$\eta_{\text{Husillo}} = 0,9$$

Una vez conocidos los datos anteriores se puede calcular el par resistente del sistema con la ecuación B.23.

$$T_r = \frac{F_T \cdot p}{2000 \cdot \pi \cdot \eta_{\text{Husillo}}} \quad (\text{Ec. B.23})$$

$$\mathbf{T_r = 2,35 \text{ Nm}}$$

Además del par calculado en la Ecuación B.23, se ha de tener en cuenta que el husillo esta precargado, lo que implica la existencia de un par de precarga, mirando en la hoja de datos del husillo, el par de precarga ( $T_{PR}$ ), es:

$$\mathbf{T_{PR} = 0,14 \text{ Nm}}$$

En conclusión, el par resistente total ( $T_{RT}$ ) con el que se ha seleccionado el motor paso a paso es la suma de los pares calculados anteriormente:

$$\mathbf{T_{RT} = 2,49 \text{ Nm}}$$

Tal y como se explica en la memoria uno de los principales problemas para seleccionar el motor es el espacio disponible en la instalación. Además para este tipo de aplicaciones con movimiento vertical en CELLS se selecciona el motor a partir del par de detención en lugar del nominal. Con todo esto se ha seleccionado un motor de la casa PHYTRON, modelo ZSS 57 con una ratio de reducción en tres etapas 1:100. Por lo tanto, el par reductor en la salida de la reductora ( $T_{RTR}$ ) sería:

$$\mathbf{T_{RTR} = 0,0249 \text{ Nm}}$$

Alba utiliza para las diferentes aplicaciones controladores que generan entre 3000 y 4000 pasos/s, considerando que los motores Phytron requieren 200 pasos·min<sup>-1</sup> se obtiene una velocidad angular de aproximadamente 1000 rpm.

Con el motor paso a paso seleccionado y a una velocidad de 1000 rpm se obtienen las siguientes características dinámicas del sistema:

$$\text{Resolución}(\mu\text{m}) = \left( \frac{1}{N} \cdot i \cdot p \right) \cdot 1000 \quad (\text{Ec. B.24})$$

$$\mathbf{\text{Resolución} = 0,25 \mu\text{m}}$$

$$\text{Resolución}(\mu\text{m} / \text{rev}) = \frac{\text{Resolución}(\mu\text{m})}{N} \quad (\text{Ec. B.25})$$

$$\mathbf{\text{Resolución} = 50 \mu\text{m} \cdot \text{vuelta}^{-1}}$$

$$v(\text{mm} / \text{s}) = \frac{1000 \cdot i \cdot p}{60} \quad (\text{Ec. B.26})$$

$$\mathbf{v = 0,83 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}}$$

$$t(\text{s}) = \frac{\text{Max.desplazamiento}}{v} \quad (\text{Ec. B.27})$$

$$\mathbf{t = 186 \text{ s}}$$

## B.6. Cálculo de desgasificación

Para realizar los experimentos dentro de la cámara de UHV donde se ha instalado el soporte para el detector CCD es necesario llegar a valores de vacío entre  $10^{-9}$  –  $10^{-12}$  mbar.

Para conseguir este nivel de vacío se ha instalado en MARES cuatro bombas de vacío, una bomba primaria, una bomba turbo, una bomba iónica y por último una bomba NEG.

A niveles bajos de vacío ( $1013 - 10^{-2}$  mbar), el principal gas que se encuentra dentro de la cámara de UHV es nitrógeno (78%) seguido de oxígeno (21%) y agua (1%). Entre el  $10^{-2}$  y  $10^{-6}$  mbar de presión la composición más habitual es mayoritariamente agua (98%) seguido de oxígeno (<1%) y nitrógeno (<1%). Por último para los niveles de alto vacío (< $10^{-6}$  mbar) el gas que se observa mayoritariamente es hidrógeno (80%) y en menor medida monóxido de carbono (10%), dióxido de carbono (5%) y gases nobles como el helio y el argón.

Es por esta razón que el cálculo de desgasificación de la cámara se ha separado en tres partes:

- Rangos de presión entre 1013 a  $10^{-2}$  mbar, actúa la bomba primaria.
- Rango de presión entre  $10^{-2}$  y  $10^{-6}$  mbar, actúa la bomba Turbo.
- Rango de presión inferior a  $10^{-6}$  mbar, actúan la bomba iónica y NEG.

### B.6.1. Presiones entre 1013 y $10^{-2}$ mbar (Bomba primaria).

Para este rango de presiones la bomba que se hará cargo de conseguir una presión final de un nivel de  $10^{-2}$  mbar será la bomba primaria. Las principales características de esta bomba son la velocidad de aspiración y la instalación en MARES. Esto se debe a que la conductancia de éstas dependerá del área del puerto donde esté conectada o bien la longitud del tubo entre la bomba y la cámara de UHV. Véase tabla B.13.



Tipo	Velocidad de aspiración (S) (l/s)	Puerto	Longitud (mm)
Primaria	4,2	DN40CF	2000
Turbo	700	DN160CF	Despreciable
Iónica	500	DN160CF	Despreciable
NEG	2000	DN100CF	Despreciable

Tabla B.13. Resumen de las principales características de las Bombas utilizadas.

Para calcular la presión final que se conseguirá con la bomba utilizada en este rango, es necesario calcular su conductancia. La conductancia es el valor que determina como de fácil un volumen de un gas puede pasar de un lugar a otro dentro de vacío. Este parámetro es específico del gas y de la geometría. Hay dos tipos de conductancias cuando la longitud entre la bomba y la cámara es despreciable y cuando la longitud entre la cámara y la bomba es superior a 10 veces el diámetro interior del puerto donde está conectada. Véase ecuación B.28 y ecuación B.29 respectivamente.

$$C = 3,64 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot A_{puerto} \quad (\text{Ec. B.28})$$

$$C = 3,81 \sqrt{\frac{T}{M}} \cdot \frac{D^3}{L} \quad \text{con} \quad L \geq 10 \cdot D \quad (\text{Ec. B.29})$$

Donde T es la temperatura con un valor de 296 K,  $M_{\text{aire}}$  ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) es la masa molar de los diferentes componentes presentes en este rango de presiones, A ( $\text{cm}^2$ ) es el área del puerto donde está conectada la bomba, L (cm) la longitud entre la cámara y la bomba y por ultimo D (cm) que representa el diámetro interno del puerto donde se conecta la bomba.

A continuación se realizará el cálculo de la presión final para el nitrógeno ya que es el elemento con más presencia en este rango de presiones, considerando la aportación del resto despreciables.

Para calcular la conductancia de la bomba primaria se ha utilizado la ecuación B.29 explicada anteriormente, teniendo en cuenta que el diámetro interno de una brida DN40CF es de 40 mm, la longitud es de 2000 mm y la masa molecular del nitrógeno es de  $14\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$  se obtiene una conductancia para la bomba primaria del siguiente valor:

$$C = 5,61 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$$

Finalmente para calcular la presión final, ecuación B.30, es necesario calcular la velocidad específica de la bomba en la entrada de la cámara, ecuación B.31. Y conocer el ratio de degasificación del acero inoxidable con el que está fabricado MARES ( $K_{ss}$ ).

$$P_u = \frac{K_{ss} \cdot A_{cámara}}{S_{eff}} \quad (\text{Ec. B.30})$$

Donde  $K_{ss}$  tiene un valor de  $1 \cdot 10^{-11} \text{ mbar}\cdot\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,  $S_{eff}$  es la velocidad específica de la bomba en ( $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ) calculada con la siguiente ecuación y A es el área de la cámara donde se ha aplicado el vacío, en este caso, Mares tiene una superficie de  $4255 \text{ cm}^2$  donde se incluye un 15% de la superficie para tener en cuenta la longitud de los diferentes puertos.

$$S_{eff} = \frac{1}{\frac{1}{S} + \frac{1}{C}} \quad (\text{Ec. B.31})$$

Donde S es la velocidad de la bomba utilizada, véase tabla B.13.

Con este valor junto al de la conductancia se obtiene una velocidad específica en la entrada de la cámara con el siguiente valor.

$$S_{eff} = 2,40 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$$

Finalmente con todos estos valores se obtiene una presión final para este rango de presiones con el siguiente valor.

$$P_u = 1,77 \cdot 10^{-8} < < 10^{-2} \text{ mbar}$$

Con este valor se observa que la bomba primaria seleccionada es suficiente para conseguir alcanzar la presión final adecuada en este primer tramo de presiones.

## B.6.2. Rango de presiones entre $10^{-2}$ y $10^{-6}$ mbar (Bomba Turbo).

Para este rango de presiones la bomba encargada de conseguir el nivel óptimo de vacío es la Turbo, las principales características han sido mostradas en la tabla B.13.

En este rango de presiones el elemento mayoritario es el agua con un 98% del total, de forma análogo al anterior caso el resto de elementos se considerarán despreciables.

En este caso la bomba Turbo está conectada directamente a MARES lo que implica que la longitud entre ésta y la cámara se puede considerar despreciable y por la tanto se ha calculado la conductancia con la ecuación B.28.

Con el fin de calcular la conductancia se ha calculado el área del puerto donde está conectada la bomba, en este caso en una brida DN160CF.

$$A_{160CF} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{int}}^2 \quad (\text{Ec. B.32})$$

Con la ayuda de la ecuación B.32 y teniendo en cuenta que el diámetro interior de una brida DN160CF es de 155 mm se obtiene el siguiente valor del área para el puerto.

$$A_{160CF} = 188,69 \text{ cm}^2$$

Con este valor y la ecuación B.28 se obtiene el siguiente valor de la conductancia para la bomba Turbo.

$$C = 3,16 \cdot 10^3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Con la conductancia calculada, conociendo las características principales de la bomba y haciendo uso de la ecuación B.31, se ha obtenido el siguiente valor para la velocidad específica de la bomba Turbo.

$$S_{\text{eff}} = 573 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Por último la presión final que se estima para este rango de presiones ha sido calculada con la ecuación B.30 y ha obtenido el siguiente valor.

$$P_u = 7,43 \cdot 10^{-11} < 10^{-6} \text{ mbar}$$

Con este valor se observa que la bomba Turbo seleccionada es suficiente para conseguir alcanzar la presión final adecuada en este segundo tramo de presiones.

### B.6.3. Rango de presiones inferiores a $10^{-6}$ mbar (Bomba iónica y NEG).

Para este rango de presiones las bombas encargadas de conseguir el nivel óptimo de vacío son la iónica y NEG, las principales características de ambas se encuentran en la tabla B.13.

Para este rango de presiones el elemento mayoritario es el hidrogeno con un 80% del total, de forma análoga a los anteriores caso el resto de elementos se considerarán despreciables.

En este caso tanto la bomba iónica como la NEG están conectadas directamente a MARES lo que implica que la longitud entre ésta y la cámara se puede considerar despreciable y por la tanto se han calculado las conductancias con la ecuación B.28.

Con el fin de calcular las conductancias se han calculado las áreas del puerto donde están conectadas las bombas, en este caso en una brida DN160CF para la iónica y una brida DN100CF para la bomba NEG.

$$A_{100CF} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{int}^2 \quad (\text{Ec. B.33})$$

Con la ayuda de la ecuación B.32 y B.33 y teniendo en cuenta que los diámetros interiores son 155 mm y 104 mm respectivamente, se obtienen los siguientes valores para las áreas de los diferentes puertos.

$$A_{160CF} = 188,69 \text{ cm}^2$$

$$A_{100CF} = 84,95 \text{ cm}^2$$

Con estos valores y la ecuación B.28 se obtienen los siguientes valores de la conductancia para ambas bombas.

$$C_{iónica} = 8,36 \cdot 10^3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$C_{NEG} = 3,76 \cdot 10^3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

Con las conductancias calculadas, conociendo las características principales de las bombas y haciendo uso de la ecuación B.31, se han obtenido los siguientes valores para las velocidades específicas de las bombas.

$$S_{eff} (\text{iónica}) = 471,77 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$S_{\text{eff}} (\text{NEG}) = 1305,77 \text{ I}\cdot\text{s}^{-1}$$

Por último la presión final de cada una de las bombas que se estima para este rango de presiones ha sido calculada con la ecuación B.30 y se han obtenido los siguientes resultados.

$$P_u (\text{Iónica}) = 9,02 \cdot 10^{-11} \text{ mbar}$$

$$P_u (\text{NEG}) = 3,26 \cdot 10^{-11} \text{ mbar}$$

Por lo tanto la presión final estimada para el último rango de presiones se calcula como la suma de las dos anteriores.

$$P_u = 1,23 \cdot 10^{-10} < 10^{-9} \text{ mbar}$$

Como se puede observar el valor de la presión final se encuentra dentro del intervalo que definí como UHV, que es el nivel de vacío necesario para que se puedan realizar correctamente los diferentes experimentos en MARES.

## Bibliografía

En el presente Anexo ninguna fuente bibliográfica es referenciada explícitamente a lo largo del texto. En este apartado se expondrá toda la bibliografía que se ha usado como referencia en la parte teórica del desarrollo del Anexo. En la parte práctica la toma de decisiones de actuación ha estado potenciada por la intuición y por la ayuda del director del proyecto, y por tanto, no ha lugar ninguna referencia bibliográfica.

## Referencias bibliográficas

- [1] Apuntes y prontuarios de elasticidad y resistencia de materiales de la ETSEIB.
- [2] TURNER, S. (editor) (1999): Scanticon Conference 28-May to 03-June. CERN Accelerator School Vacuum Technology. Ginebra