LA IMPORTANCIA DE LA EXPERIENCIA DE ESTABILIDAD EN LOS BUQUES

Raúl VILLA CARO
Secretario de EXPONAV
Capitán de la Marina Mercante y profesor asociado de la UDC

(Ing.)

HACE unos meses, cuando escribí un artículo para esta REVISTA relacionado con el control del peso durante la construcción de buques, hice referencia al cálculo de la experiencia de estabilidad y me comprometí a redactar otro artículo explicando cómo se lleva a cabo esta operación. Comenté en ese momento que, además de conocer el peso del buque, era muy importante conocer la posición vertical y longitudinal del centro gravedad del mismo.

Por lo tanto, el contenido del párrafo anterior

podría introducir y definir cuál es el objetivo de la citada experiencia, que no es otro que poder determinar la estabilidad y los asientos del buque en cada condición de navegación. La experiencia de estabilidad es una prueba que permite conocer con cierta exactitud la altura del centro de gravedad del buque (KG) y la altura metacéntrica (GM). Conocido el valor de la altura del metacentro (KM), bien por las curvas hidrostáticas (CH) o por cálculo directo a partir de las formas del buque, correspondiente al desplazamiento en el momento de la experiencia, se puede calcular el KG. Estos son valores que se obtienen con el desplazamiento de la experiencia, pero la administración desea conocer los anteriores valores con el desplazamiento en rosca.

La experiencia de estabilidad, como se ha comentado, tiene por objeto calcular la altura del centro de gravedad sobre la línea base (KG), pero también tiene la importante finalidad de poder calcular el desplazamiento en rosca del buque y el periodo de balance del mismo. Durante la construcción de un buque, el astillero encargado del proyecto realiza los cálculos necesarios para hallar el KG del buque, teniendo en cuenta los pesos del mismo —maquinaria, combustible, agua, municiones, etc.— y su situación a bordo. Del cociente de la suma de los momentos verticales de dichos pesos con relación a la línea de base y el desplazamiento total del buque, resulta la posición vertical del centro de gravedad. Sin embargo, existen a bordo instalaciones y servicios, como tuberías, tendidos eléctricos, etc., cuyo centro de gravedad no es fácil de determinar. Asimismo, durante el proceso de construcción se introducen ligeras modificaciones que alteran el proyecto inicial, por lo que la altura teórica del centro de gravedad (KG), calculada partiendo del proyecto del buque, no es exacta, aunque sí muy aproximada.

Ya que la determinación exacta de la posición vertical del centro de gravedad es esencial por afectar en gran manera a las condiciones de estabilidad del buque, una vez finalizada la construcción del mismo se debe realizar una experiencia de estabilidad que, de forma exacta, determine la posición vertical de «G».

A la experiencia de estabilidad se la conoce también como «ensayo o prueba de estabilidad». Existen dos tipos posibles:

— Para grandes asientos: uso de métodos de cálculo directo, *i. e.*, curvas y/o tablas de Bonjean. La administración considera un asiento (A) grande cuando:

  $$A_{experiencia} - A_{proyecto} > 0.03 \cdot L_{pp}, \text{ o } A_{experiencia} - A_{proyecto} \geq 1 \text{ m}$$

  Se debe recordar que el asiento es la diferencia de calados entre popa y proa. Normalmente el asiento de proyecto, el de las curvas hidrostáticas (CH), es 0.

— Para pequeños asientos: uso de las CH.
Antes de realizar la experiencia se debe tener una idea aproximada de la situación de su centro de gravedad para realizar dicha prueba con seguridad. Es decir, en todo momento el GM debe ser mayor que cero.

Ámbito de aplicación de la prueba de estabilidad

A excepción de algunos casos, como buques de serie, gemelos o análogos, la prueba de estabilidad se sebe aplicar a todos los buques de pasaje, a aquellos buques de carga cuyas esloras sean superiores a los 24 metros y a los buques de guerra.

Criterios de estabilidad de la IMO

Los criterios de estabilidad de la IMO se aplican a buques de carga y pasaje de menos y más de 100 m de eslora y a buques pesqueros.

Escoras

Al considerar que el metacentro permanece fijo, las experiencias de estabilidad solamente tienen sentido cuando el ángulo de escora es muy pequeño. En la práctica, cuando haya que preparar una experiencia, hay que seleccionar el peso «ω», estimando el GM para obtener un ángulo de escora, que será:

— Buques grandes: $\theta \approx 1^o$
— Buques con una eslora de unos 120 m: $\theta \approx 1{,}5^o$
— Embarcaciones menores: $2^o \leq \theta \leq 3^o$

La experiencia de estabilidad se basa en que al mover un peso transversal en un buque este se escora en la dirección en la cual hemos hecho el traslado, siendo este ángulo de escora función de las siguientes variables: peso movido (ω), desplazamiento del buque (W), distancia transversal a la que se ha movido el peso (d_T) y altura metacéntrica del buque (GM).

Una vez comprobado que el buque es estable y está adrizado, se lleva a un lugar del astillero lo más protegido posible de la mar y el viento, donde se procederá a efectuar la experiencia procurando que el buque no tenga ni asiento ni escora. Se coloca a crujía un peso (ω) conocido, normalmente un 0,5 por 100 del desplazamiento del buque (W). Como ya se conoce:

$$KG = KM - GM$$

Figura 1. Buque en aguas tranquilas.

En esta igualdad nos basta con calcular GM para hallar KG, objeto de la experiencia de estabilidad, ya que KM nos lo fijan las curvas hidrostáticas. En estas condiciones se desplaza transversalmente el peso (ω) una distancia conocida (d_T), escorándose el buque como se ve en la figura 3.

Realización práctica de la experiencia de estabilidad

Antes de realizar la experiencia se debe colocar el buque en condiciones, en cuanto a cargas a bordo se refiere, lo más próximas a las normales de funcionamiento, sin escora ni asiento.

Se debe levantar un inventario lo más exacto posible de los pesos existentes a bordo en el momento de la experiencia y su ubicación, tales como víveres, municiones, agua, combustible, etc., ya que el KG hallado en la experiencia será el correspondiente al estado de carga durante la realización de la misma para, partiendo de él y conociendo la relación de «pesos a completar» y de «pesos a deducir» y ya, de una forma numérica, calcular el KG para la situación «A» o de buque en rosca.

Al confeccionar la lista de «pesos a completar», debe conocerse los que faltan para situar al buque en condición «A» (buque en rosca).

La lista de «pesos a deducir» para situar al buque en condición «A» debe ser confeccionada por el astillero que efectúe la experiencia mediante una sonda perfecta de tanques, revisión de espacios vacíos, *cofferdams,* etc. Se debe anotar el peso específico de los líquidos existentes a bordo. Los «pesos sólidos a deducir» deben incluir todos aquellos que no correspondan a condición «A».

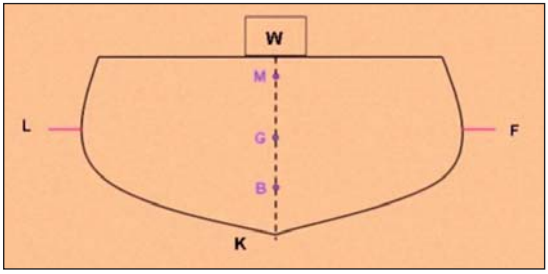


Figura 2. Buque en posición inicial con el peso en crujía.

Si existen pesos a bordo que no estén colocados en su lugar, se debe anotar el peso y situación del centro de gravedad al efectuarse la experiencia. Estas partidas se anotan como «pesos cuyo emplazamiento varía» o «pesos extraños».

Para hallar el valor de KG basta con calcular GM, ya que KM lo dan las curvas hidrostáticas a partir del calado medio. En estas condiciones, se desplaza transversalmente un peso (w) una distancia conocida (d) para escorar el buque. GM se calcula de la forma siguiente:

$$\text{tg}\ \theta = GG2/GM;\ GG2 = w.d/W;\ GM = w.d/W.\text{tg}\ \theta$$

Todos los factores de la fórmula para el cálculo de GM son conocidos, excepto“tg θ. Para calcularla se emplean péndulos de longitud aproximadamente igual a la distancia entre dos cubiertas y unas regleta graduadas, sobre las que se lee la escora una vez trasladado el peso a una banda, de forma que:

$$\text{tg}\ \theta = GG2/GM$$

Conocido este dato, se calcula GM, y este valor, llevado a la fórmula KG = KM -

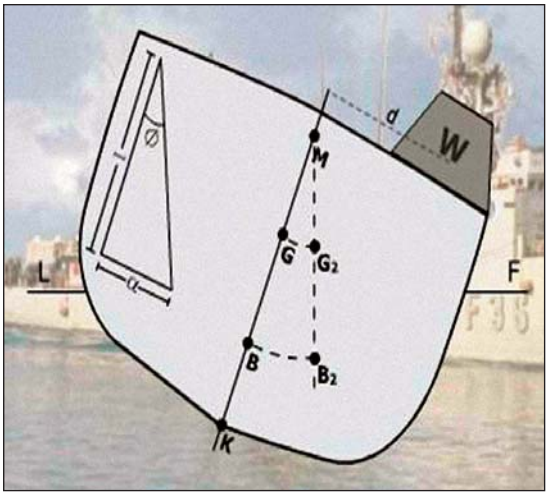
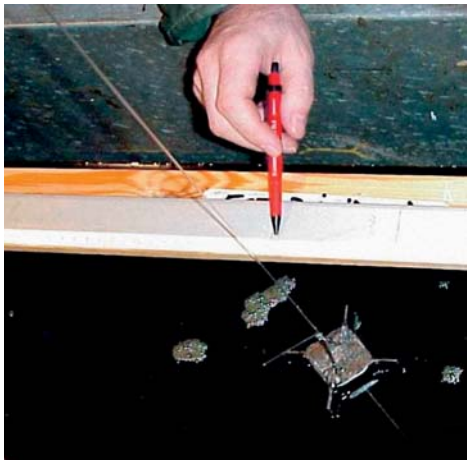


Figura 3. Desplazamiento inicial del peso en el buque.



Figuras 4a , 4b. Lectura de péndulos.

GM, fija el KG del buque correspondiente a las condiciones de carga en que se hallaba durante la experiencia. El KG calculado en esa condición de carga servirá de punto de partida para hallar la situación del centro de gravedad en otras condiciones de carga mediante cálculos matemáticos.

Lectura de calados

Figura 5. Lectura de calados.

Se hará en todas las marcas disponibles. Es esencial tomar calados en proa, popa y sección media; en buque sin marcas de calado en la cuaderna maestra se tomarán solamente los dos primeros. Al tomar calados se tomarán simultáneamente a babor y estribor, promediando sus valores.

Para contrarrestar el efecto del pequeño oleaje que pueda existir, se recomienda el uso de un tubo de cristal graduado con orificio de poco diámetro en su fondo, que se adosa a las marcas de calado. Las lecturas deberán tomarse con aproximación de unos seis milímetros y sirven para obtener el calado equivalente con el

que se entra en las curvas para obtener el KM y el desplazamiento W.

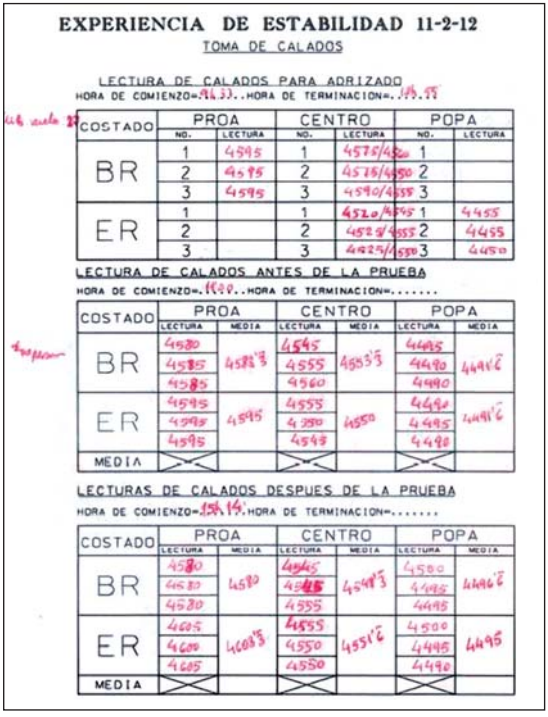
Diagrama de tangentes

Para cada movimiento de pesos es preciso calcular el momento escorante que le producimos al buque, es decir:

Momento escorante producido por el traslado = ω . d

Asimismo, tenemos que calcular la tangente del ángulo de escora que produce el movimiento de pesos.

Tanto los momentos escorantes como las «tg θ» para los distintos movimientos de pesos se deben ir anotando en el llamado «diagrama de



EXPERIENCIA DE ESTABILIDAD 11-2-12

TOMA DE CALADOS

LECTURA DE CALADOS PARA ADRIZADO

HORA DE COMIENZO=..... HORA DE TERMINACION=.....

COSTADO	PROA NO.	PROA LECTURA	CENTRO NO.	CENTRO LECTURA	POPA NO.	POPA LECTURA
BR	1	4595	1	4575/4560	1	
	2	4595	2	4575/4550	2	
	3	4595	3	4590/4555	3	
ER	1		1	4520/4545	1	4455
	2		2	4525/4555	2	4455
	3		3	4525/4550	3	4450

LECTURA DE CALADOS ANTES DE LA PRUEBA

HORA DE COMIENZO=..... HORA DE TERMINACION=.....

COSTADO	PROA LECTURA	PROA MEDIA	CENTRO LECTURA	CENTRO MEDIA	POPA LECTURA	POPA MEDIA
BR	4580		4545		4495	
	4585	4583'3	4555	4553'3	4490	4496'6
	4585		4560		4490	
ER	4595		4555		4490	
	4595	4595	4550	4550	4495	4491'6
	4595		4545		4498	
MEDIA						

LECTURAS DE CALADOS DESPUES DE LA PRUEBA

HORA DE COMIENZO=..... HORA DE TERMINACION=.....

COSTADO	PROA LECTURA	PROA MEDIA	CENTRO LECTURA	CENTRO MEDIA	POPA LECTURA	POPA MEDIA
BR	4580		4545		4500	
	4580	4580	4545	4548'3	4495	4496'6
	4580		4555		4495	
ER	4605		4555		4500	
	4600	4603'3	4550	4551'6	4495	4495
	4605		4550		4490	
MEDIA						

Figura 5a. Anotación de calados.

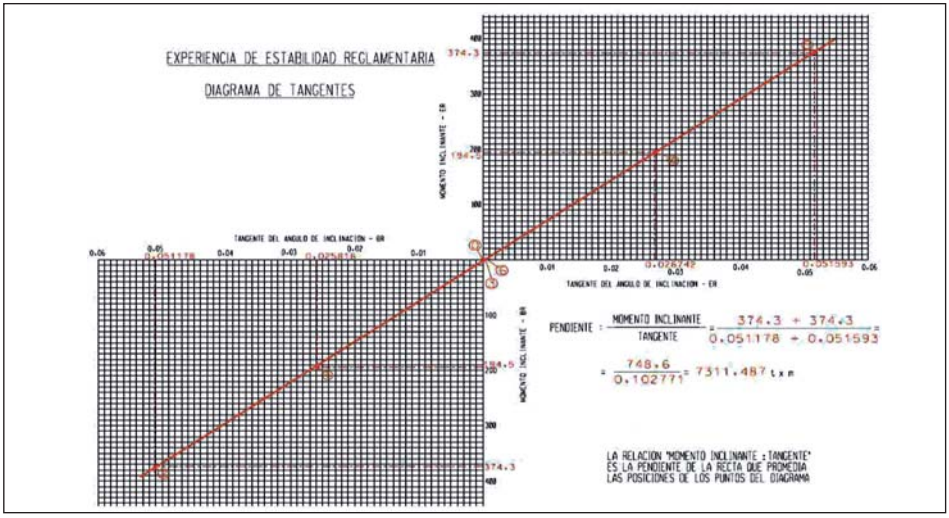


Figura 6. Diagrama de tangentes.

tangentes», en el que se observan en ordenadas los momentos y en abcisas las tangentes de θ.

Una vez anotados todos los movimientos de pesos, se traza una recta que sea promedio.

Control de pesos

Los «pesos sólidos a deducir» incluirán municiones, víveres, pañoles, personal, equipo del astillero, carga, aviones, pesos, equipo de la experiencia, etc. Si existen pesos a bordo que no estén colocados en su lugar apropiado, se anotará el peso y situación del centro de gravedad al efectuarse la experiencia. Estas partidas se anotan como «pesos cuyo emplazamiento varía».

Durante la realización de la prueba no debe embarcar o desembarcar personal o material alguno sin autorización del responsable de la experiencia. Y se deben controlar los siguientes puntos:

— El personal a bordo será el mínimo estrictamente necesario para la realización de la prueba.
— Durante las mediciones, todo el personal permanecerá en posiciones fijas previamente establecidas.
— Se comprobará la escora y, en caso necesario, se adrizará el buque.

Figura 7. Movimiento de pesos.

— Se comprobará la inexistencia de líquidos en sentinas.
— Se sondarán todos los tanques, comprobándose que los posibles tanques de lastre estén llenos al 100 por100 (a rebosar).
— Se hará toma de los calados en las marcas de proa, centro y popa, simultáneamente proa babor y popa estribor, proa estribor y popa babor, centro babor y centro estribor.
— Se marcará el cero (0) de escora con los pesos en la posición 1 indicada en el dibujo correspondiente.
  Aunque los pesos adoptarán generalmente siete posiciones, los movimientos de pesos para la determinación de las tangentes serán seis.
— Se tomarán las lecturas de desviaciones de péndulos para cada movimiento, así como en el estabilógrafo (naviclín).
— Para la comprobación de las tangentes obtenidas en cada inclinación, se representarán gráficamente en un diagrama y, en caso de desvío apreciable de la línea recta, se repetirá el movimiento y la lectura de desviación de péndulos.
— Como finalización de la prueba, se realizará nuevamente una lectura de calados y una toma de sondas.

Densidad del agua

Cuando se haga la experiencia se determinará la densidad del agua en la que flota el buque, tomando muestras en distintos puntos y a diversas profundidades, con objeto de obtener el desplazamiento a partir de la densidad real del agua.

Para ello el personal encargado tomará varias muestras de agua del mar en las zonas próximas a la proa, centro y popa del buque y a varias profundidades, en torno al mismo, para determinar la densidad media de dicho elemento, así como la temperatura del mismo en el momento de la prueba. Con el mismo fin tomarán muestras y temperaturas de los líquidos previstos en tanques de DFM, agua técnica y agua de lastre, cuya relación se facilitará por el departamento correspondiente.

Movimiento de pesos

Los pesos empleados en la experiencia se moverán transversalmente para producir, al menos, dos inclinaciones a babor y dos a estribor. Después de cada movimiento se anotará la distancia recorrida por cada peso desde su posición original a la final. Por último, los pesos se trasladarán a su posición original. El traslado de pesos será lento y uniforme, a fin de evitar la tendencia del buque al balance.

Medida de las inclinaciones

Para medir las inclinaciones se suelen emplear tres péndulos colocados a proa, centro y popa del buque; el peso se sumerge en un balde de aceite a fin de amortiguar posibles oscilaciones que dificultarían las lecturas.

Antes de proceder a los traslados de pesos debe hacerse coincidir el hilo del péndulo con el cero de la regleta.

Las lecturas para determinar las inclinaciones del buque deberán tomarse cuando estén los pesos en su posición inicial, después de cada uno de los movimientos y una vez vueltos a su posición inicial.

En el momento de tomar lecturas en los péndulos, el personal que quede a bordo deberá estar en su posición original, se aligerará el amarre del buque, previamente se habrán largado los cables, mangueras, conexiones de tierra y se habrá retirado la plancha. La toma de lecturas se hará en todos los péndulos a la vez.

Determinación del período de balance

Para comprobar que la experiencia de estabilidad está bien hecha, puede determinarse el período de balance del buque. El balance del buque puede provocarse de la forma siguiente:

— Moviéndose un grupo de hombres de banda a banda, sincronizados con el balance. Una vez conseguido este, los hombres se estacionan a crujía mientras se cronometra el período de balance. En los portaaviones puede utilizarse el movimiento de vehículos automóviles en la cubierta de vuelo.
— Colocando un peso en una banda mediante una grúa y elevándolo rápidamente.
— Aplicando, mediante una grúa, una fuerza hacia arriba en las proximidades de la cuaderna maestra y aflojando rápidamente una vez conseguido el balance, se mide mediante un cronómetro el tiempo total de tres o cuatro períodos completos y el período de balance se determina dividiendo el tiempo total por el número de balances.

La altura metacéntrica puede determinarse a partir del período de balance mediante la fórmula:

$$GM = \left(\frac{f.B}{\mathrm{T}}\right)^2$$

donde:

— *GM* = altura metacéntrica en pies.
— *B* = manga máxima del buque en pies.
— T = duración de un balance completo (Br a Er y Er a Br) en segundos.
— *f* = factor de corrección (20 por 100 de su carga = 0,78; 10 por 100 de su carga = 0,75; 5 por 100 de su carga = 0,73).

Es conveniente realizar varias pruebas de comprobación del período de balance. Si este es muy elevado, será indicativo de que el barco «se duerme»y de que existe poca estabilidad. Un período medio, entre 8 y 12 segundos, puede ser un buen indicador. Períodos más cortos pueden convertir al buque en muy estable, pero hacer que la vida a bordo sea demasiado incómoda (barco «peonza»).

Libro de experiencia de estabilidad

Los datos obtenidos en la experiencia de estabilidad se vierten en este libro, de forma que, partiendo del estado de carga del buque en el momento de

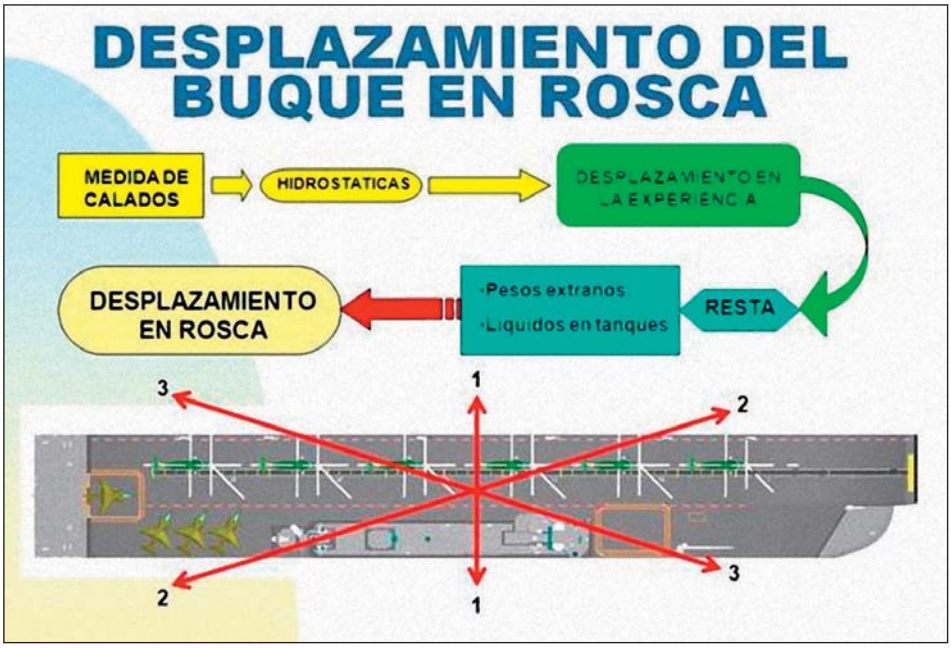


Figura 8. Resumen de la experiencia.

la experiencia, y una vez conocida la distribución de los pesos en ese momento, se llegue a la situación «A» de buque en rosca mediante las relaciones de «pesos a completar», «pesos a deducir» y «pesos a situar de nuevo». A partir de la situación de «buque en rosca» se calculan los datos para las restantes condiciones de carga mediante cálculos numéricos.

El libro consta de dos partes: la parte primera, titulada «Datos de la experiencia de estabilidad», contiene las observaciones y cálculos para determinar el desplazamiento y el centro de gravedad del buque en rosca. La parte segunda, llamada «Datos de estabilidad», contiene la información relativa a las características del buque en las condiciones operativas.

Conclusiones

El peso del buque, es decir, su desplazamiento, es un dato vital en el proyecto del buque, que debe coincidir con el peso real del barco una vez construido, teniendo en cuenta los márgenes analizados en el artículo del control de pesos. Y para ello se debe realizar un estudio exhaustivo del mismo, durante toda su construcción, para que no haya desagradables sorpresas cuando el proceso esté muy avanzado, y ya sea muy dificultosa la marcha atrás.

La experiencia de estabilidad será la operación que nos confirme que ese dato «vital» calculado se corresponde con la realidad.

La fragata F-105 *Cristobal Colón* fue un buen ejemplo que demostró que realizando un buen control de pesos se puede llegar al producto adecuado con unos márgenes de construcción inferiores a los que se habían adoptado tradicionalmente, con el consecuente ahorro, como se pudo comprobar al realizar su experiencia de estabilidad.

En la figura 8 se puede observar un resumen de todo el proceso de la experiencia.