

Theoretical-experimental assessment of braking systems for inclined lifts according to EN 81:22-2014

Beatriz Valles Fernández

University Institute of Automobile Research (INSIA), Spain

Ángel Luis Martín López

University Institute of Automobile Research (INSIA), Spain

Enrique Alcalá Fazio

University Institute of Automobile Research (INSIA), Spain

ABSTRACT

The inclined lifts, in case of emergency braking, can experience high longitudinal decelerations that can lead to passengers' collisions with lift walls and interior elements.

In 2014 the CEN/TC10 WG1 published the part 22 of the norm series 81 with regard to the construction elements and installation of electrical lifts with inclined trajectory. This norm establishes, amongst other requirements, the maximum and minimum deceleration levels in both longitudinal and vertical directions. Both requirements, in opposite senses and the definition of the braking system, do not cause design difficulties in case of high slopes, but in case of lifts with the slope under a certain level they can be needed, to guarantee the fulfilment of the norm, elements that allow and additional relative displacement between the braking system and the cabin.

To define the performances and the optimal behaviour of these systems it has been defined a simulation model of the dynamical behaviour of the lift under the conditions of the norm tests.

Additionally, in this work it is presented a calculation methodology to define the cabin allowable weight corridor, for each braking effort made by each safety gear model, and the simulations have been validated with the results of tests with different braking efforts, weights and lift slopes.

The present work has been performed in cooperation with Thyssen Krupp Elevadores with the aim of improving the knowledge of the brake dynamics of inclined lifts.

1. INTRODUCTION

Inclined elevators in case of emergency braking, may experience a strong longitudinal deceleration, which can carry passengers to collide with the walls and interior elements of the cabin. EN 81-22: 2014 "safety standards for the construction and installation of inclined electric lifts", contemplates this possibility, limiting the maximum longitudinal deceleration and, at the same time requiring a minimum vertical deceleration to avoid cabin collision. Both requirements are contrary, limiting the acceleration of the car at its maximum value, as well at its minimum. These limitations do not imply a serious problem in the case of elevators with steep slopes, but in the case of lifts with slopes below a certain threshold, it is not

possible to ensure compliance with the standard without the help of elements that allow a relative displacement between the braking system and cab.

The inclined elevators exhibit a different dynamic movement of that of the vertical lift by the angle of inclination. It is precisely the inclination angle which causes, in emergency braking, longitudinal decelerations that make different the dynamic of both types of elevators. In the reference standard EN 81-22: 2014 [1], in section 5.6.8.4, the maximum and minimum deceleration in the cabin are set during safety gear actuation in a lift with at rated load:

$$a_h \leq 0,5 \cdot g \quad (1)$$

$$0,1 \cdot g \leq a_v \leq 1 \cdot g \quad (2)$$

Being a_h and a_v the horizontal and vertical acceleration measures respectively.

In the case of vertical elevators standards EN 81-20: 2014 and EN 81-50: 2014 impose a minimum deceleration of about 0.6 g, deceleration value used to determine the maximum weight that a particular safety gear can stop.

It is easy to see how the required minimum value of vertical acceleration for vertical lifts is significantly higher than the minimum required for inclined lifts in the same vertical direction. However, although the minimum acceleration required is lower, the inclined lifts have two upper limits deceleration: one in the vertical direction (1g) and a second in the horizontal one (0.5g). While the limit in horizontal direction promotes safety by reducing the possibility that passengers collide with the front walls of the cabin, the upper limit in the vertical direction does not have a clear precedent. Moreover EN 81-22: 2014 states that the inclined lifts are those whose car travels on guides inclined at an angle between 15° and 75°. This range of inclination is broad enough to question whether some independent inclination limits provide a degree of protection sufficiently uniform. It is demonstrated in the course of this work that required limits set a safety criterion fairly constant except for very low (close to the lower limit 15°) inclinations.

2. OBJECTIVE

The aim of this study is to evaluate the possibility of deducing analytically the behavior of an specific safety gear approved according vertical lift standards (EN 81-20: 2014 and EN 81-50: 2014), in a test executed according the requirements for inclined lifts (EN lift 81: 22: 2014).

The requirements defined in the reference standards used in vertical and inclined lifts are different. In the case of inclined lifts, accelerations permitted range in vertical and horizontal direction is set. However, in a particular vertical lifts cabin acceleration value it is set. The acceleration value for vertical lifts cab lies within the permitted range for inclined lifts vertical acceleration. For this reason it is considered feasible to use the results parachutes approval for vertical lifts to know what their behavior inclined lifts. This approach may include, if deemed necessary, additional braking safety and performance elements that elevators should have.

The objective has been addressed through an initial analytical approach and its subsequent verification of the hypotheses y through a comprehensive test plan. For the experimental validation it was defined test plan considering the main operating parameters of braking systems and different angles of inclination of the elevators.

3. NOMENGLATURE

- a Cab acceleration measured in the direction of movement of the elevator (m/s²)
- a_h Cab acceleration in the horizontal direction (m/s²)
- a_v Cab acceleration in the vertical direction (m/s²)
- C1 Safety factor applied to the braking effort to improve the minimum weight that can slow down below the upper limits of deceleration of EN 81-22.
- C2 Coeficiente de seguridad aplicado al esfuerzo de frenado para minorar el mínimo peso que se puede frenar por encima del límite superior de deceleración de la EN 81-22
- g Aceleración gravitatoria en la tierra 9.81(m/s²)
- F_f Esfuerzo nominal de frenado del paracaídas en dirección vertical (m/s²)
- N Número máximo de pasajeros en el ascensor
- P Suma de los pesos de la cabina vacía y los componentes soportados por la cabina, es decir, parte del cordón de maniobra y cables/cadenas de compensación (si las hay) etc. (N)
- P_{min} Peso mínimo del ascensor vacío que puede ser frenado con valores de deceleración inferiores a los límites máximos de la EN81-22
- (P+Q)_{max} Peso máximo del ascensor cargado que puede ser frenado con valores de deceleración superiores al mínimo de la EN81-22
- Q Carga nominal (N)
- Θ Ángulo de inclinación del ascensor (rad)

3. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

Dadas los límites de deceleración definidos por la norma EN 81:22:2014, si tenemos en cuenta el ángulo de inclinación de la plataforma (θ) y la aceleración en la dirección de deslizamiento del carro (a) estos límites quedan definidos por las ecuaciones:

$$a_h = a \cdot \cos\theta \leq 0.5 \cdot g \quad (3)$$

$$0,1 \cdot g \leq a_v = a \cdot \sin\theta \leq g \quad (4)$$

Si se aplica el esfuerzo de frenado en el centro de masas del conjunto cabina-estribo y se considera el equilibrio de fueras en la dirección del movimiento, see Fig. 1(a) se obtiene:

$$F_f - (P + Q) \cdot \sin\theta = P/g \cdot a \quad (5)$$

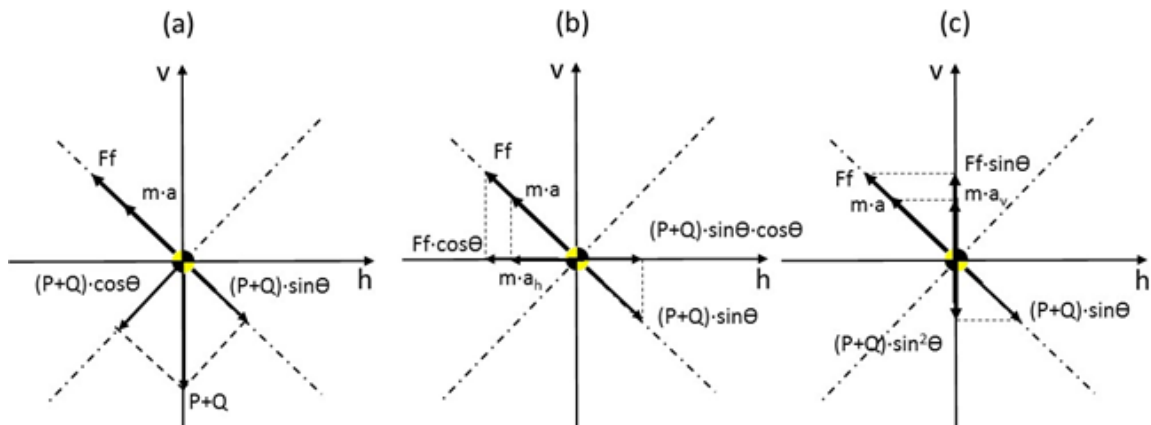


Figure 1- (a) equilibrio de fuerzas en la dirección de movimiento; (b) proyección de fuerzas en la dirección horizontal; (c) proyección de fuerzas en la dirección vertical

Proyectando los esfuerzos en las direcciones horizontal (h) (Fig. 1 (b)) y vertical (v) (Fig. 1 (c)) se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$(P + Q) \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = Ff \cdot \cos\theta + m \cdot a_h \quad (6)$$

$$(P + Q) \cdot \sin^2\theta = Ff \cdot \sin\theta + m \cdot a_v \quad (7)$$

Si consideramos las siguientes hipótesis:

- Al aumentar la carga Q disminuye la deceleración para un mismo valor del esfuerzo de frenado, la restricción de aceleración horizontal de la norma (ecuación n°1) proporciona el menor valor del peso (P) del conjunto cabina-estribo obteniéndose Pmin. Así combinando las ecuaciones n° 3 y n°6 se obtiene:

$$P_{min} \geq \frac{Ff \cdot \cos\theta}{0.5 + \sin\theta \cdot \cos\theta} \quad (8)$$

- Por el mismo motivo, la limitación superior de la restricción de aceleración vertical de la norma (ecuación n° 2) proporciona un segundo valor límite inferior del peso (P) del conjunto cabina-estribo obteniéndose Pmin. Por tanto, del límite superior de las ecuaciones n° 4 la n° 7 se puede determinar que:

$$P_{min} \geq \frac{Ff \cdot \cos\theta}{0.5 + \sin\theta \cdot \cos\theta} \quad (9)$$

Por tanto el valor del peso mínimo que se puede decelerar cumpliendo los límites establecidos viene dado por la expresión:

$$P_{min} \geq \max \left\{ \frac{Ff \cdot \sin\theta}{1 + \sin^2\theta} \mid \frac{Ff \cdot \cos\theta}{0.5 + \sin\theta \cdot \cos\theta} \right\} \quad (10)$$

- Sin embargo, la limitación inferior de la restricción de aceleración vertical de la norma (ecuación n° 2) al ser un valor mínimo de deceleración, limita el máximo peso que se puede decelerar con ese dicho esfuerzo de frenado proporcionando

(combinando el límite inferior de las ecuaciones nº 3 y nº 7), por tanto, el valor $P+Q$ ($(P+Q)_{max}$)

$$(P + Q)_{max} \geq \frac{Ff \cdot \sin\theta}{0.1 + \sin^2\theta} \quad (11)$$

En estas ecuaciones es preciso indicar que esfuerzo de frenado (Ff) ejercido por los paracaídas progresivos es función de la elasticidad de los muelles de apriete de las zapatas y de la compresión de dichos elementos elásticos cuando el paracaídas es accionado. Se puede afirmar, por tanto, que el esfuerzo es función del sistema de seguridad (conjunto Guías-paracaídas) y que es independiente del ángulo de inclinación del ascensor. En el presente trabajo se ha utilizado como valor del esfuerzo de frenado el nominal de cada paracaídas medido en caída vertical y se ha comprobado en los resultados experimentales que la deceleración obtenida es la correspondiente al valor del esfuerzo de frenado medido en dirección vertical.

En el planteamiento realizado hasta el momento se han aplicado los valores umbrales de deceleración definidos en la norma EN 81:22:2014. Sin embargo, el cumplimiento de estos requisitos está condicionado por las desviaciones del Ff normales en cualquier proceso productivo. Para considerar la influencia de estas desviaciones, tanto desde un punto de vista de control de la producción, como de garantía de seguridad y cumplimiento en ensayos, se ha considerado adecuado aplicar unos coeficientes de seguridad $C1$ (siendo $C1 \geq 1$) y $C2$ ($C2 \leq 1$) a los valores del esfuerzo de frenado en las ecuaciones nº 10 y nº 11.

$$P_{min} \geq \max \left\{ \frac{C1 \cdot Ff \cdot \sin\theta}{1 + \sin^2\theta} \mid \frac{Ff \cdot \cos\theta}{0.5 + \sin\theta \cdot \cos\theta} \right\} \quad (12)$$

$$(P + Q)_{max} \geq \frac{C2 \cdot Ff \cdot \sin\theta}{0.1 + \sin^2\theta} \quad (13)$$

Los valores de los coeficientes establecidos para evitar la dispersión de los procesos productivos pueden ser definidos mediante estudios de capacidad de los procesos.

Las ecuaciones definidas anteriormente para calcular P_{min} y $(P+Q)_{max}$ se pueden adimensionalizar e independizar del esfuerzo de frenado dividiendo por dicho parámetro:

$$P_{min}/Ff \geq \max \left\{ \frac{C1 \cdot \sin\theta}{1 + \sin^2\theta} \mid \frac{\cos\theta}{0.5 + \sin\theta \cdot \cos\theta} \right\} \quad (14)$$

$$(P + Q)_{max}/Ff \geq \frac{C2 \cdot \sin\theta}{0.1 + \sin^2\theta} \quad (15)$$

Quedando por tanto definidos los límites de peso en vacío y cargado de un ascensor inclinado que un paracaídas concreto puede detener mediante las ecuaciones nº 14 y nº 15. Estos límites están determinados por funciones, que dependen únicamente del ángulo de inclinación y de los coeficientes de seguridad del fabricante, y son proporcionales al esfuerzo de frenado del paracaídas. La siguiente figura muestra gráficamente los límites establecidos por la norma para cada inclinación y la distancia entre ambos límites en el rango de inclinación $[15^\circ-75^\circ]$ representa el porcentaje del esfuerzo de frenado que supone la carga

máxima que puede transportar el ascensor.

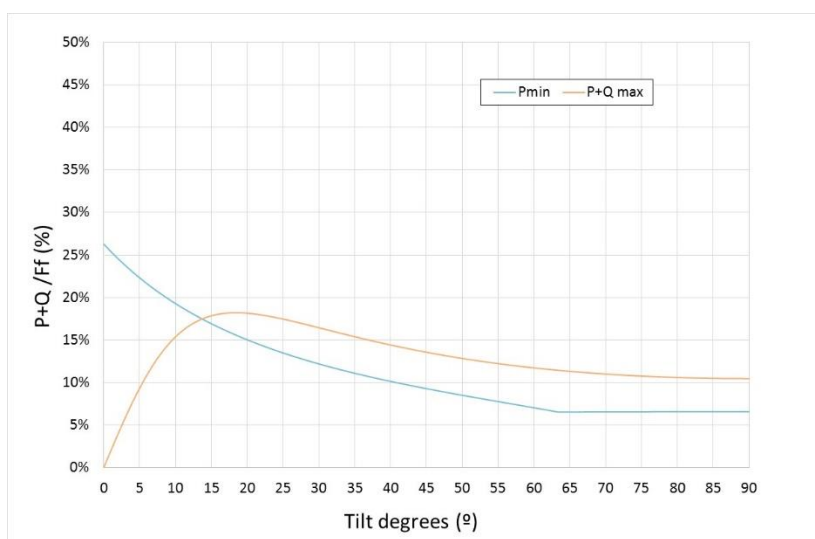


Figure 2 - Límites de P+Q/Ff en función de la inclinación

Para finalizar este planteamiento teórico, dado que el parámetro de mayor importancia en un ascensor es su capacidad de transporte de personas se determina el número máximo de ocupantes mediante la expresión:

$$N = \frac{Q}{75} = \frac{\frac{Ff \cdot C2 \cdot \sin\theta}{0.1 + \sin^2\theta} - \max\left\{\frac{C1 \cdot Ff \cdot \sin\theta}{1 + \sin^2\theta} \mid \frac{Ff \cdot \cos\theta}{0.5 + \sin\theta \cdot \cos\theta}\right\}}{75} \quad (16)$$

Dado que la ecuación anterior es una función aritmética de los límites de peso del ascensor establecidos previamente es, también y al igual que estos, proporcional al esfuerzo de frenado.

$$N/Ff_{max} = \frac{\frac{C2 \cdot \sin\theta}{0.1 + \sin^2\theta} - \max\left\{\frac{C1 \cdot \sin\theta}{1 + \sin^2\theta} \mid \frac{\cos\theta}{0.5 + \sin\theta \cdot \cos\theta}\right\}}{75} \quad (16)$$

Expresión que igualmente sólo depende del ángulo de inclinación del ascensor y de los coeficientes de seguridad C1 y C2 definidos por el fabricante.

4. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Los ensayos de caída del ascensor se han realizado en la plataforma de elevación lateral del INSIA. El sistema de inclinación de la plataforma permitió realizar ensayos a diferentes inclinaciones con un mismo sistema de simulación de ascensor inclinado. Sobre la plataforma se instaló el simulador experimental de ascensor diseñado y fabricado por THYSSENKRUPP España. El sistema está formado por un carro, con sus raíles, guías y sistema de paracaídas y topes finales de compresión (see Fig. 3).

Mediante al accionamiento hidráulico de la plataforma se han ajustado diferentes ángulos de inclinación del ascensor para la realización de los ensayos. En la siguiente figura se muestra una imagen del conjunto ya instalado.



Figure 3 - Imágenes del ascensor sobre la plataforma de vuelco de INSIA con los diferentes ángulos de inclinación

Para la validación experimental de las hipótesis teóricas presentadas en el presente artículo, se desarrolló una secuencia de ensayos teniendo en cuentas tres inclinaciones $14,5^\circ$, $23,9^\circ$ y $44,5^\circ$ y la utilización de cuatro modelos de un mismo tipo de paracaídas progresivos, lo que permitió ensayar con distintas configuraciones de P+Q y ajustes de paracaídas.

En las siguientes gráficas se muestra la variación del esfuerzo de frenado en función de la masa y el ángulo.

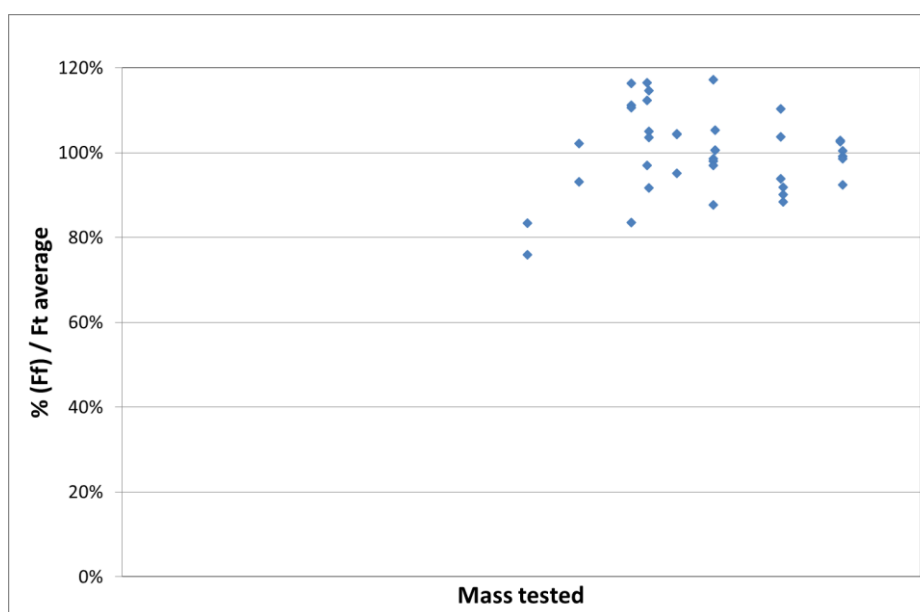


Figure 4 - Relación entre el esfuerzo de frenada máximo teórico y la masa ensayada

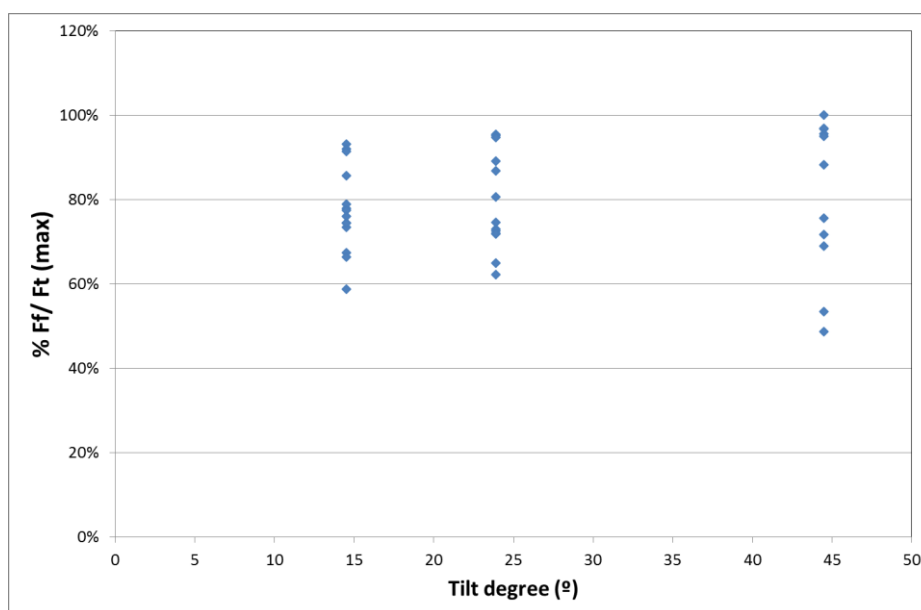


Figure 5 - Relación entre el esfuerzo de frenado máximo teórico y la masa ensayada / ángulo de inclinación de la plataforma

A raíz de los resultados obtenidos en las gráficas anteriores (Fig. 4), se observa que no se puede establecer una relación entre el esfuerzo de frenado y el ángulo de inclinación de la plataforma o la masa ensayada. Por tanto, el esfuerzo de frenado obtenido en los ensayos no varía significativamente al modificar dichas variables.

A partir del esfuerzo de frenado máximo obtenido en los ensayos y teniendo en cuenta las restricciones indicadas en la norma EN 81-22:2014 así como los coeficientes de seguridad impuestos por el fabricante, se puede calcular el rango de P+Q adecuado en función del ángulo de la plataforma de ensayo.

En la siguiente figura se muestra, para cada tipo de paracaídas, los resultados obtenidos, marcados en verde o rojo en función de si cumplieron con los límites establecidos en la norma EN 81:22:2014. Además se ha representado los límites establecidos por la norma y definidos en las ecuaciones n° 14 y n° 15.

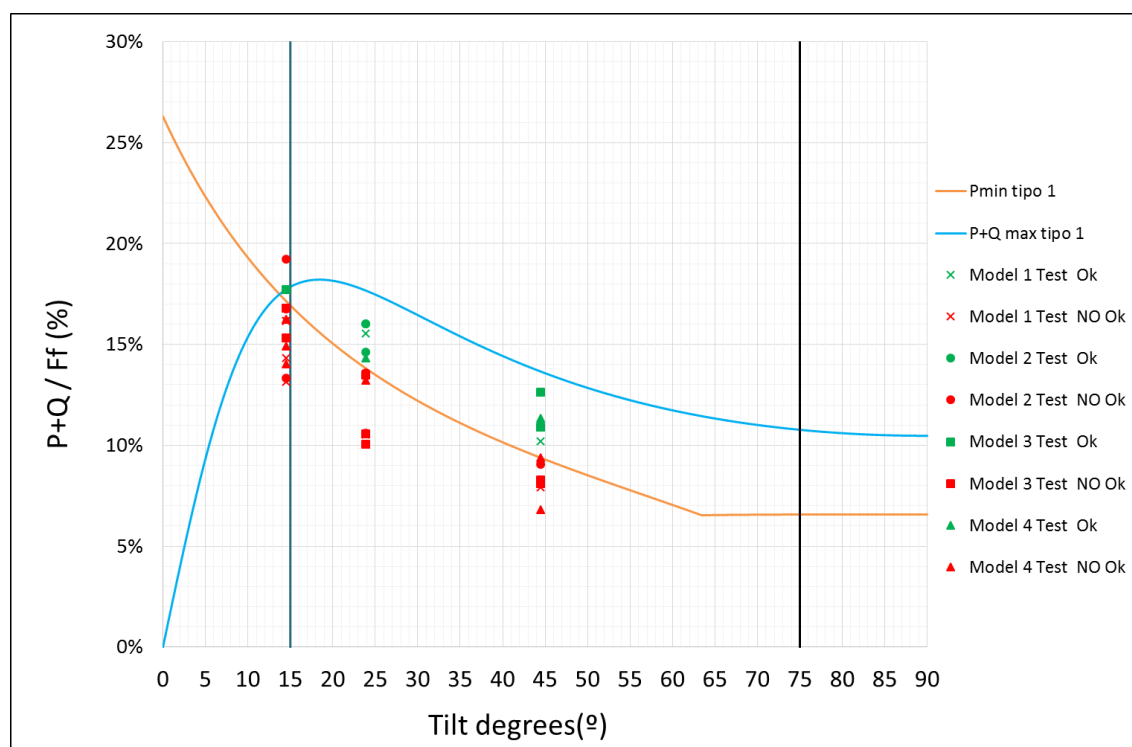


Figure 6 - Resultados de los ensayos para cada modelo de paracaídas y predicción del cumplimiento de los ensayos realizados

Como se puede comprobar en el gráfico anterior (Fig. 6), los límites definidos por las ecuaciones n° 14 y n° 15 predicen a la perfección el comportamiento de todos los tipos de paracaídas ensayados, que han sido ajustados para un distintos valores de P+Q.

En todos los casos, el valor mínimo de ángulo de inclinación de la plataforma para que se puedan cumplir los requisitos de la norma de referencia es de 14°, puesto que para valores menores se produce una incongruencia debido a que el valor máximo de P+Q es menor que el mínimo de P, valor por debajo de la mínima inclinación permitida según la norma.

5. ESTIMACIÓN DEL P+Q ADECUADO

A partir de estos resultados se puede calcular el número de pasajeros máximo (Q) que puede llevar el ascensor cumpliendo con los requisitos de la norma de referencia, en la siguiente figura se muestra dicho valor para los tipos de paracaídas y ángulos de la plataforma ensayados.

En la siguiente figura (Fig. 11) se muestra la variación del número de pasajeros en función del ángulo de inclinación de la plataforma para cada modelo de paracaídas ensayado. Se observa que en todos los casos, existen distintos tramos de variación del número de pasajeros (distintas pendientes):

- Se puede observar que el número de pasajeros aumenta con el ángulo de la plataforma, hasta un valor que coincide para todos los modelos de paracaídas.
- En el intervalo entre 14° y 29° se observa un crecimiento del número de pasajeros muy rápido.

- Entre 30° y 45° el número máximo de pasajeros es prácticamente constante.
- A partir de 45° vuelve a producirse una tendencia de aumento del número de pasajeros hasta 63° que coincide con el cambio de restricción del valor de P_{min} , a partir de esta inclinación, el valor está limitado por la ecuación 10 (límite superior de aceleración vertical).
- A partir de 64° se produce un descenso paulatino del número máximo de pasajeros.

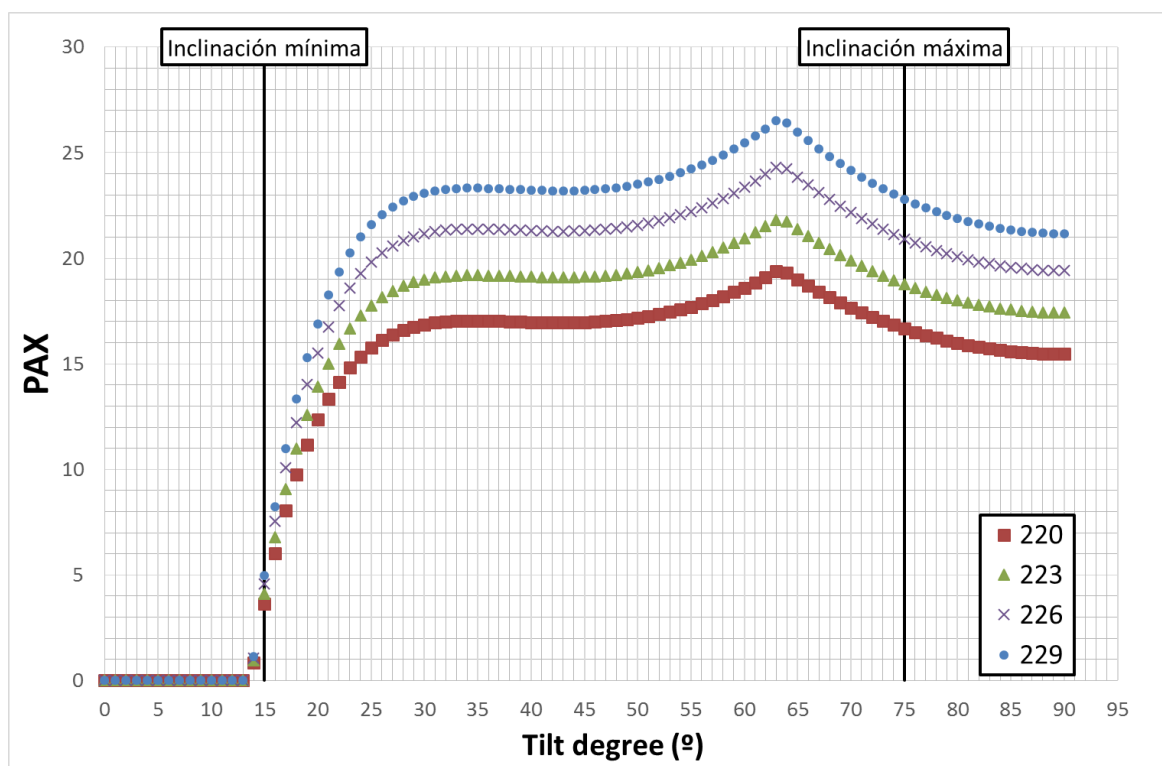


Figure 7 - Número de pasajeros máximo que cumplen con los criterios de la norma de referencia

6. CONCLUSIONES

Mediante la realización de ensayos a diferentes modelos de un mismo tipo de paracaídas progresivo homologado para utilizar en ascensores verticales, se ha evaluado su utilización en ascensor inclinado cumpliendo con los requerimientos definidos por la norma EN 81:22:2014.

Se ha desarrollado un análisis de los requisitos definidos en la norma EN 81:22:2014. En el desarrollo teórico expuesto se ha determinado que los límites de aceleración vertical y horizontal indicados, están definidos por funciones, que dependen únicamente del ángulo de inclinación y de los coeficientes de seguridad del fabricante, y son proporcionales al esfuerzo de frenado del paracaídas.

A partir del esfuerzo de frenado máximo obtenido en los ensayos verticales para la homologación del paracaídas como componentes según las normas EN 81-20:2014 y EN 81-50:2014, y teniendo en cuenta las restricciones indicadas en la norma EN 81-22:2014 así