

COMPARACIÓN DE DOS FORMULACIONES PARA ESTIMAR LA PRESIÓN DINÁMICA EN EL FONDO DE EMBARCACIONES PLANEADORAS

Por: José R. Marín L.

**Facultad de Ing. Marítima y Ciencias del Mar, ESPOL,
Km. 30.5 Vía Perimetral, Guayaquil, jrmarin@espol.edu.ec**

RESUMEN

Se describen y aplican dos formulaciones para estimar la presión dinámica ó de impacto en el fondo de embarcaciones planeadoras, la una publicada por Spencer en 1975, [1], para aplicación en embarcaciones de apoyo, en Aluminio, y, la otra preparada por la sociedad de clasificación ABS en el 2001, [2]. A través del ejemplo incluido en una de las publicaciones se compara su aplicación, y se resalta las concordancias y diferencias entre resultados al aplicar ambas formulaciones. Finalmente a través de otro ejemplo se muestra la potencialidad de subestimar la presión dinámica sobre el fondo de una embarcación planeadora construida para el Oriente ecuatoriano, de 9.65 m de eslora; en esta embarcación se detectó, luego de un corto tiempo de operación, daños permanentes en el planchaje del fondo.

Introducción

La estructura del fondo de una embarcación planeadora debe soportar la presión debida a la acción dinámica relativa del agua sobre la superficie del casco. Este parámetro, en forma simplificada se incrementa con el cuadrado de la velocidad, de manera que para embarcaciones planeadoras puede resultar muy exigente, estructuralmente hablando.

Desde el trabajo clásico de Heller y Jasper, [3], hay algunas referencias que pueden usarse para estimar la presión sobre el fondo de una embarcación planeadora. Sin embargo en nuestro medio no se tiene mucha experiencia sobre el tema, de manera que vale la pena que la comunidad de la Ingeniería Naval Ecuatoriana se familiarice con la aplicación de dos formulaciones para este efecto. Además, valga también la oportunidad para empezar a difundir algunos términos sobre manejo probabilístico de fenómenos dinámicos en el ámbito de los buques.

1. Fuerzas y Presiones de Impacto

Giannotti, [4], describe algunos detalles sobre el fenómeno físico del incremento de presión en el fondo de embarcaciones planeadoras. Menciona por ejemplo que este fenómeno se manifiesta con aguda concentración, enfatizando que la zona de presión máxima puede ser tan pequeña como el diámetro del sensor empleado para algunas mediciones. En la siguiente figura se describe la distribución estimada de presión, notándose que especialmente al inicio del fenómeno, la presencia de un valor pico es muy notorio.

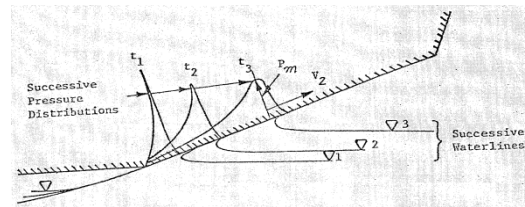


Figura 1.- Distribuciones de presión de impacto como función del tiempo para planchaje local, [4] y [5]

La referencia mencionada previamente explica también que siendo el peso balanceado por la Boyantez, la única fuerza desbalanceada, aquella debida a la acción hidrodinámica, será la causante de la aceleración de la embarcación. De manera que es de esperarse que en las formulaciones aparezca la aceleración vertical como variable en la estimación de la presión dinámica sobre el fondo.

2. Formulación de Spencer, [1]

En 1975, Spencer, [1], publicó un artículo en el que describe un método para estimar la presión en el fondo de embarcaciones de Servicio Costafuera (“Crewboats”). La formulación presentada es aplicable directamente para embarcaciones que tengan las siguientes características:

L/B	4.8
β	16°
LCG	7% L a Popa de Sec. Media
H	0.0833L

Tabla 1.- Valores de los parámetros básicos para la formulación de [1]

donde L es la eslora en flotación, B es la manga en la china, β es el ángulo de astilla muerta, y, H es la altura significativa de la ola.

La fórmula básica para la presión de impacto desarrollada por Spencer es:

$$P = (F_L \times F \times P_i) + P_s \quad (1)$$

donde F_L es un factor de distribución longitudinal, F es un factor de distribución de área, P_i es la presión de impacto, y, P_s es la presión hidrostática. El factor F_L es presentado en forma gráfica, y se reproduce en el apéndice de este trabajo, y, F y P_i pueden calcularse con las siguientes fórmulas:

$$F = 0.1 + 1 / (8.1 A^2 + 15.6 A + 1.1) \quad (2)$$

$$P_i = 6.4 + 6.32 \Delta^{1/3} - 0.091 L + 0.023 V^2 - 0.563 \sqrt{VL}, \text{ (psi)} \quad (3)$$

donde V es la velocidad en nudos.

Finalmente el parámetro A en la fórmula para F , es la razón de aspecto del panel analizado, y se calcula con la siguiente fórmula:

$$A = (\text{Área del panel}) / (25 \Delta / d), \quad (4)$$

donde d es el calado en carga máxima.

Para facilitar el cálculo, la presión hidrostática (psi) puede estimarse con la fórmula:

$$P_s = 0.444 d. \quad (5)$$

Cuando la embarcación analizada no tiene los parámetros en los valores mencionados, debe realizarse correcciones de la siguiente forma:

Parámetro	Valor	Porcentaje de cambio en P_i
L/B	4.0	+6.8
L/B	4.2	+2.3
L/B	4.4	+0.6
L/B	4.6	+0.1
L/B	5	+1.4
β	12°	+6.1
β	20°	-5.6
LCG	9%L Pp S.Med.	+6.9
LCG	5%L Pp S.Med.	-4.7
H/B	0.3	-8.0
H/B	0.5	+4.8

Tabla 2.- Correcciones en la formulación de Spencer, [1]

3. Formulación de ABS (2001), [2]

Para efectos de comparación, se va a aplicar también la formulación de la sociedad de clasificación, ABS, [2], del año 2001, para embarcaciones de Alta Velocidad. Dicha referencia establece que la presión dinámica puede estimarse aplicando la siguiente

fórmula¹, para una sección a la altura del LCG:

$$p_{bcg} = \frac{N_I \Delta}{L_w B_w} [I + n_{cg}] F_D, \quad (6)$$

donde, trabajando en kN/m²: N_I es una constante = 0.1, Δ , el desplazamiento en kg, L_w y B_w , son la eslora en flotación y la máxima manga en flotación, en m, respectivamente, n_{cg} , es la aceleración del CG (promedio de las 1/100 de los valores más grandes), y, F_D es un factor de área de diseño. A su vez, para evaluar n_{cg} , se aplica la siguiente ecuación:

$$n_{cg} = N_2 \left[\frac{12 h_{1/3}}{B_w} + 1.0 \right] \tau [50 - \beta_{cg}] \frac{V^2 (B_w)^2}{\Delta}, g's \quad (7)$$

donde N_2 es una constante =0.0078, $h_{1/3}$ es la altura significativa para el estado de Mar considerado², τ es el ángulo de trimado a la velocidad analizada (no menor de 3°), β_{cg} es el ángulo de astilla muerta a la altura de LCG en °, y, V es la velocidad de diseño de la embarcación en nudos.

Luego, se podría estimar la presión a lo largo de la eslora, empleando la siguiente fórmula:

$$p_{bxx} = \frac{N_I \Delta}{L_w B_w} [I + n_{xx}] \left[\frac{70 - \beta_{xx}}{70 - \beta_{cg}} \right] F_D \quad (8)$$

donde β_{xx} es el ángulo de astilla muerta a la altura de la sección analizada en °, y, n_{xx} es la aceleración de la posición del buque donde se quiere evaluar la presión (promedio de las 1/100 de los valores más

grandes), que puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$n_{xx} = n_{cg} K_V, \quad (9)$$

donde K_V es un factor de distribución de la aceleración vertical.

Sin embargo, para embarcaciones de eslora menor que 61 metros, ABS (2001) establece que la presión a lo largo del fondo puede estimarse por:

$$p_{bxx} = \frac{N_I \Delta}{L_w B_w} [I + n_{cg}] F_D F_V, \text{ kN} / \text{m}^2. \quad (10)$$

donde F_V es un factor de distribución de la aceleración vertical.

Los factores empleados en la formulación de ABS se reproducen en el apéndice de este trabajo.

4. Comparación

Las formulaciones mencionadas fueron aplicadas al ejemplo que se presenta en la primera de ellas, [1], y que se reproduce a continuación. Los datos de la embarcación son:

Eslora Flotación	85 p
Desplaz. Carga Completa	75 ton
Velocidad de diseño	23 kn
Angulo Astilla Muerta	16°
Calado Carga Completa	3.75 p
Separac. Bulárcamas	3.0 p
Separac. Longitudinales	1.0 p

Tabla 3.- Características de embarcación de Servicio Costafuera, [1]

Además [1] especifica que la razón L/B es de 4.2. Se va a asumir que la altura significativa corresponde a la estándar es decir $H=0.0833L=7.08$ pies=2.16 m, y, que el LCG también se encuentra en el valor estándar. Con estos valores, la presión de Impacto básica corregida por la razón L/B es:

¹ Asumiendo que la presión estática es menor que la dinámica

² Promedio de 1/3 de los valores más altos. En el apéndice se reproduce una tabla con valores de alturas significativas en función del Estado de Mar

Presión Impacto Básica	12.59	lb/plg ²
Corrección por L/B	1.023	
Corrección por LCG	1.00	
Presión Impacto Básica Corr	12.88	lb/plg ²

Tabla 4.- Cálculo de la presión de impacto corregida, según [1]

Continuando con el proceso, la razón de aspecto de una plancha del fondo es $A=0.0060$, y por tanto el factor de corrección es $F=0.938$.

Ahora se va a aplicar la formulación propuesta por ABS, [2], y para esto, además de los datos presentados previamente, se va a asumir que el ángulo de trimado τ es 4° . Con estos valores, se obtiene un Área de diseño de la plancha de 1858.1 cm^2 , y el área de referencia de 455920 cm^2 , la razón de aspecto de la plancha es de 0.004 , y el factor de área de diseño, $F_D=0.97$.

Continuando con el proceso de cálculo, la aceleración del centro de gravedad n_{cg} es, aplicando la fórmula (7), 1.48 g's . Aplicando la fórmula (10), considerando que se trata de una embarcación con eslora inferior a 61 m , se podría determinar la presión a lo largo de la eslora.

A continuación se presentan las distribuciones de presión resultantes de ambas formulaciones, evaluadas a lo largo de la eslora. La formulación de ABS emplea el coeficiente F_V , mientras que Spencer aplica el coeficiente F_L . Luego ambos resultados son graficados.

x_{FP}/L	Spencer		ABS L<61m	
	F_L	P_{efect} kN/m ²	F_V	P_{box} kN/m ²
0	0.5	53.22	0.50	56.58
0.2	0.9	86.59	1.00	113.16
0.4	1	94.93	1.00	113.16
0.6	0.85	82.41	0.79	89.45
0.8	0.55	57.39	0.52	58.87
1	0.25	32.36	0.25	28.29

Tabla 5.- Distribuciones de presión empleando las formulaciones de [1] y [2]

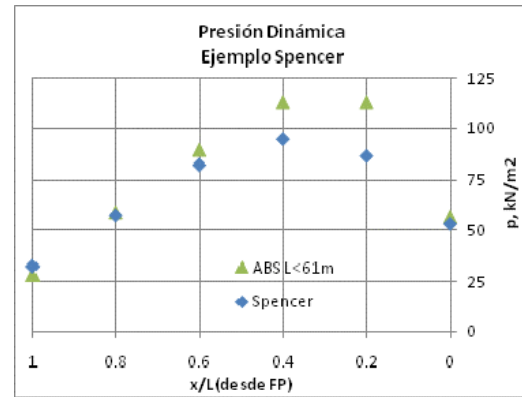


Figura 2.- Comparación de las distribuciones de presión según [1] y [2]

En la figura anterior se nota que las dos formulaciones producen resultados cercanos en la zona de Popa, mientras que en la región de Proa, la formulación de ABS (2001) predice valores mayores en un 30%. La variación a lo largo de la eslora es similar, y esto es el resultado de la distribución de los factores F_V y F_L , como se puede observar en el apéndice de este trabajo.

Debe comentarse que ambas formulaciones emplean un factor que depende de la razón de aspecto de la plancha (Área de la plancha dividida para un Área de referencia). Spencer lo llama F , y ABS, F_D , y su relación con la razón de aspecto se puede observar en el apéndice de este trabajo; se notan diferencias sustanciales entre ellas.

5. Aplicación

Como una aplicación, se ha desarrollado el cálculo de la distribución de presión sobre el fondo de una embarcación que fue construida para operar en el Oriente ecuatoriano. Las dimensiones principales y características requeridas para el cálculo de la presión de impacto sobre el fondo de la embarcación se muestran en la siguiente tabla. Dado que la zona de operación no es mar abierto, se usa una altura significativa de ola de 0.8 m (además es el valor estándar según Spencer), y, se ha asumido el ángulo de trimado como de 4° .

Δ	4450	kg
L_w	9.65	m
B_w	2.90	m
d	0.27	m
v	20	knots
s (spac.long.)	50.0	cm
l (spac.transv.)	60.0	cm
$h_{1/3}$	0.8	m
τ	4	degrees
β_{cg}	8.5	degrees

Tabla 6.- Características principales de lancha para el Oriente ecuatoriano

Con la información provista, según ABS, la aceleración promedio del CG, de los 1/100 valores más altos, n_{cg} , es 2.70 g's, y el factor de área de diseño, F_D es 0.67. Calculando el factor de distribución longitudinal, a continuación se compara la presión dinámica en el fondo, empleando las dos formulaciones aplicadas en este trabajo. Se nota muy buena correlación en los valores calculados aplicando ambas formulaciones.

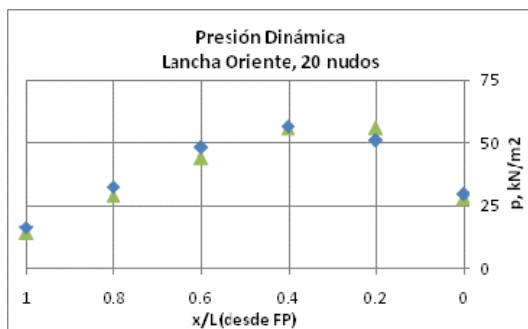


Figura 3.- Distribución de presión en lancha para el Oriente, $v=20$ nudos

Se podría en forma simple determinar el nivel de esfuerzo normal que alcanzaría el material de las planchas debido a esta presión de impacto. Para ello, se podría tomar el Momento flector en la dirección del lado más corto, y estimar el esfuerzo flexural, [6]:

$$\sigma_{max} = k \left(\frac{s}{t} \right)^2 P \quad (11)$$

donde k es una constante que depende de la razón de aspecto de la plancha, s y t , son la

dimensión menor y el espesor de la plancha, respectivamente, y, P es la presión actuante.

Para aplicar la ecuación presentada, (11), se ha tomado como valor extremo, cuando la razón de aspecto de la plancha es mayor que 2, un valor de $k=0.5$. Usando dicha relación, se ha estimado el esfuerzo normal en las planchas del fondo, a lo largo de la eslora del bote, y se presentan en la siguiente tabla y figura:

x_{FP}/L	F_L	p_{efect}	σ
		kN/m ²	N/mm ²
0	0.5	29.5	162.6
0.2	0.9	50.9	280.6
0.4	1	56.3	310.2
0.6	0.85	48.2	265.9
0.8	0.55	32.2	177.3
1	0.25	16.1	88.8

Tabla 7.- Esfuerzo flexural en las planchas del fondo

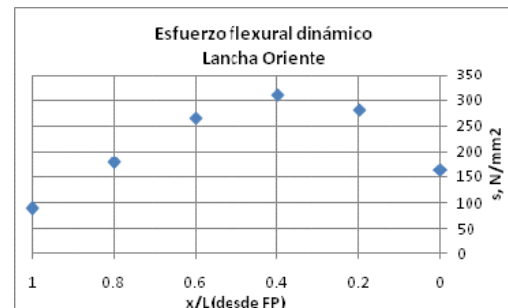


Figura 4.- Variación del esfuerzo flexural en las planchas del fondo a lo largo de la eslora.

Aun cuando no es objetivo de este trabajo, en forma rápida se va a considerar como criterio de diseño de las planchas de fondo a la Fatiga del material, [1]. En forma rápida, dado que esta embarcación fue construida con Aluminio, se podría tomar un valor de 14000 psi (100 N/mm²) como límite de fatiga ("Endurance limit") para la aleación 5086. Luego, en forma muy simplificada, puede establecerse que el fondo de la embarcación muy probablemente va a sufrir daños permanentes, como en realidad sucedió, luego de unos pocos meses de operación.

Comentarios Finales

La estimación de la presión dinámica sobre el fondo de una embarcación planeadora no es un cálculo simple, pero de alguna forma debe ser integrado en el proceso de su diseño. Se han comparado dos formulaciones, y muestran razonable concordancia entre sí, la una viene de una reconocida sociedad de clasificación y la otra es un método que podría considerarse clásico. Luego se ha mostrado a través de dos ejemplos, la forma de evaluación de cada método, esperando que esto haga más fácil a los ingenieros navales la estimación de la respuesta estructural del fondo de embarcaciones planeadoras. Finalmente, en el último ejemplo, al aplicar las formulaciones en una embarcación de 9.65 m de eslora y 20 nudos, se estimaron presiones que llevan a la fatiga del material, como se había reportado en el caso real.

El autor desea dejar claro que no tiene ninguna relación con ABS, y que consiguió copia de la referencia [2] simplemente a través del sitio web www.eagle.abs.

Referencias

- [1] Spencer, J. S., Structural Design of Aluminum Crewboats. Marine Technology, SNAME, 1975
- [2] American Bureau of Shipping, Guide for Building and Classing High-Speed Craft. ABS, 2001
- [3] Heller, S. y Jasper, N., On the Structural Design of Planing Craft. Transacciones de RINA, 1960.

[4] Giannotti, J., High Ship Structural Dynamics: Practical Application to Design. SNAME, Chesapeake Local Section, 1976

[5] Giannotti, J., A Dynamic Simulation of Wave Impact Loads on Offshore Floating Platforms. ASME paper No 75-WA/Oce-4, Diciembre 1975

[6] Hughes, O. F., Ship Structural Design: A Rationally-Based, Computer-Aided Optimization Approach. SNAME, 1988

Apéndices

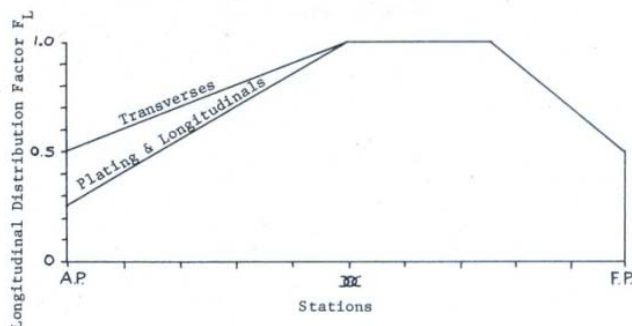
Características de diferentes Estados de Mar

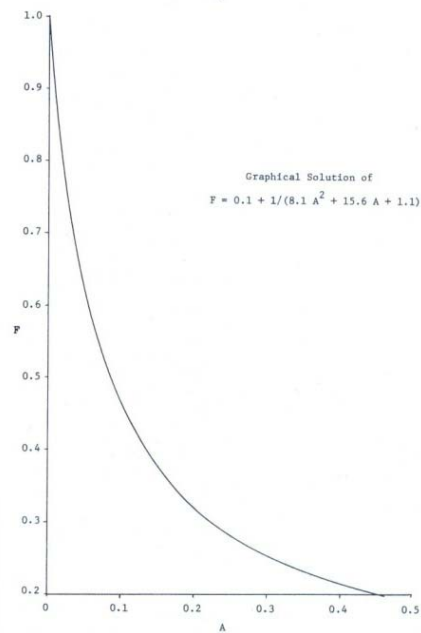
BEAUFORT WIND FORCE SCALE: Specifications and equivalent speeds for use at sea

FORCE	Equivalent miles/hr	Speed knots	Wave m	Height ft	Description	Map Symbols
0	0-1	0-1	0	0	Calm	☉
1	1-3	1-3	.1	.33	Light Air	—
2	4-7	4-6	.2	.66	Light Breeze	—
3	8-12	7-10	.6	2	Gentle Breeze	—
4	13-18	11-16	1	3.3	Moderate Breeze	—
5	19-24	17-21	2	6.6	Fresh Breeze	—
6	25-31	22-27	3	9.9	Strong Breeze	—
7	32-38	28-33	4	13	Near Gale	—
8	39-46	34-40	5.5	18	Gale	—
9	47-54	41-47	7	23	Severe Gale	—
10	55-63	48-55	9	30	Storm	—
11	64-72	56-63	11.5	38	Violent Storm	—
12	73-83	64-71	14+	46+	Hurricane	—

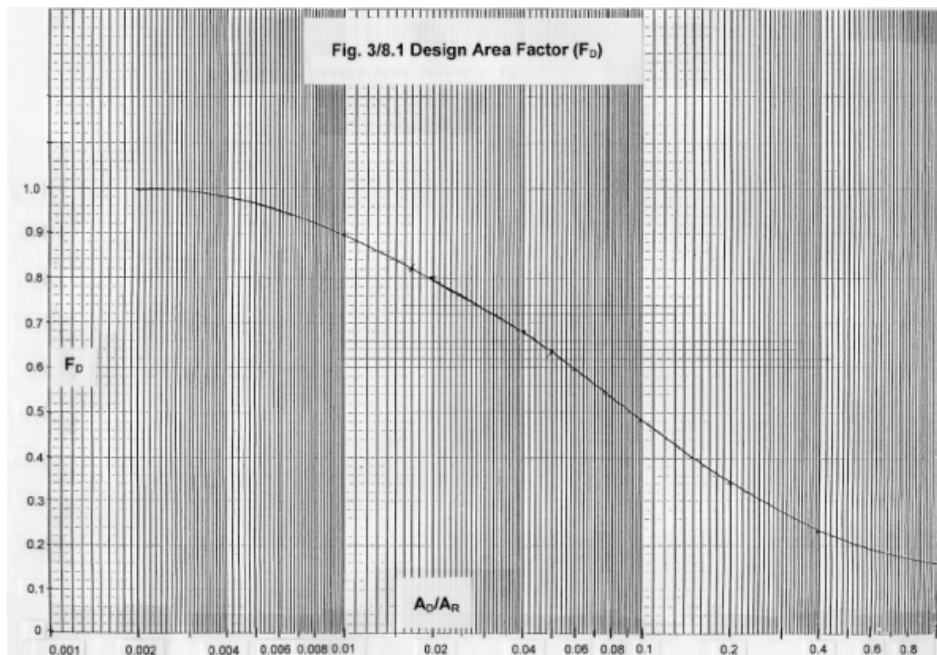
Tomada de: <http://www.seakayak.ws/>

Parámetros en la formulación de Spencer (1975), [1]





Parámetros en la formulación de ABS (2001), [2]



Para entrar en esta figura, ABS define el área de diseño A_D como el área real del panel de plancha, pero dice también que no puede tomarse como mayor que $2s^2$, siendo s la separación entre longitudinales ó refuerzos secundarios (“stiffeners”). El área de referencia A_R , en cm^2 , se calcula como $6.95 \Delta / d$.

Para implementar el proceso de ABS, podría emplearse una hoja electrónica, y el factor F_D podría evaluarse por zonas, como se muestra en la siguiente figura:

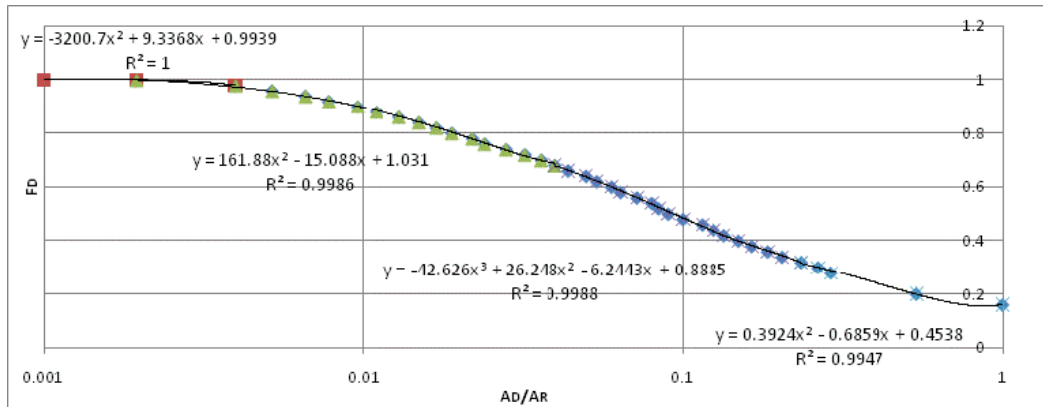


Fig. 3/8.2 Vertical Acceleration Distribution Factor (K_v)

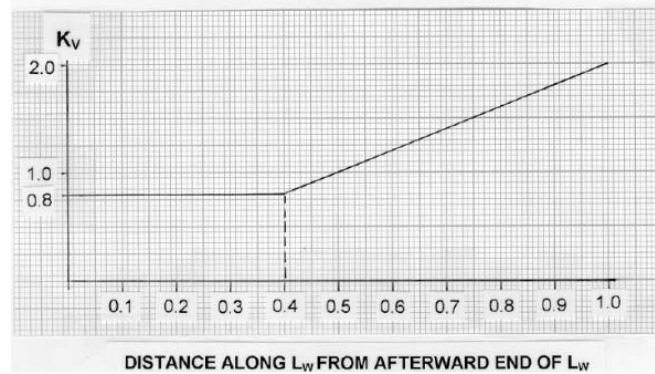


Fig. 3/8.3 Vertical Acceleration Distribution Factor (F_v)

