

Teorías de aislamiento acústico

El aislamiento acústico en edificios emblemáticos

Por Higiní Arau Puchades

INDICE

- Comportamiento acústico de una pared simple
 - Por debajo de f_c
 - En f_c
 - Por encima de f_c
- Comportamiento acústico de una pared doble
 - Por debajo de f_c
 - Caso A: Paredes ligeras
 - Caso B: Paredes gruesas
 - En f_c y encima f_c

Comportamiento acústico paredes simples

- **El aislamiento acústico R de una pared simple depende principalmente de:**
 - **su masa unitaria: m [Kg./m²]**
 - **Su frecuencia crítica f_c [Hz.]**
 - **Su factor de amortiguamiento η**

Podemos distinguir 3 zonas según la frecuencia crítica

- a) Zona por debajo de la frecuencia crítica:**
- b) Zona de la frecuencia crítica:**
- c) Zona por encima de la frecuencia crítica:**

- **La pared Simple:**

a) Para $f < f_c$:

Autor	Expresión
L. Cremer	$R = R_0 - 10 \log 0.23 R_0$ <i>siendo</i> $R_0 = 20 \log \frac{\omega m}{2 \rho c}$ (F.4.1)
A. London	$R = 20 \log A - 10 \log [ln (1 + A^2)]$ <i>siendo</i> $A = \frac{\omega m}{2 \rho c}$ (F.4.2)
R. Josse y C. Lamure	$R = 20 \log \frac{\omega m}{2 \rho c} - 10 \log \left[\frac{3}{2} + ln \frac{2f}{\Delta f} \right]$ (F.4.3)
Price y Crocker	Expresión complicada que Brekke simplifica.
E.C. Sewell	$R = R_0 - 10 \log^f (ln k \cdot 5) + 20 \log \left[1 - \left(\frac{f}{f_c} \right)^2 \right]$ <i>siendo</i> $R_0 = 20 \log fm - 42$ y k el número de onda (F.4.4)
A.C. Nilsson	$R = 20 \log m + 20 \log f - 49$ (F.4.5)
A. Brekke	Obtuvo la misma expresión que Sewell (véase expresión F.4.4).
H. Arau	Obtuvo la misma expresión que A. London, pero con una corrección sobre la masa: $[1 - (f/f_c)^2]$ para la zona comprendida desde $f_c/2 < f < f_c$ (véase expresión F.4.2).

- **La pared Simple:**

b) Para $f > f_c$:

Autor	Expresión
L. Cremer	$R_0 = 20 \log \frac{\omega m}{2 \rho c} - 10 \log \frac{\pi}{2 \eta} - 10 \log \frac{f_c}{f(1 - \frac{f_c}{f})} \quad (\text{F.4.6})$
A. London	No estudió el caso.
R. Josse y C. Lamure	Obtuvo la misma expresión que L. Cremer (véase expresión F. 4.6).
Price y Crocker	Véase la simplificación efectuada por Brekke.
E.C. Sewell	No disponible.
A.C. Nilsson	$R = 20 \log m + 30 \log f - 10 \log f_c + 10 \log \eta + 5 \log (1 - \frac{f_c}{f}) - 47 \quad (\text{F.4.7})$
A. Brekke	$R = 20 \log m + 30 \log f - 20 \log \sigma + 10 \log \eta - 10 \log f_c - 44$ siendo σ el factor de radiación de la pared. (F.4.8)
H. Arau	Obtuvo la misma expresión que L. Cremer y R. Josse y Lamure (véase expresión F.4.6).

- **La pared Simple:**

c) Para $f = f_c$:

Autor	Expresión
L. Cremer	No disponible.
A. London	No estudió el caso.
R. Josse y C. Lamure	$R = 20 \log \omega m/2\rho c + 10 \log \eta/\pi$ (F.4.9)
Price y Crocker	Muy complicada (por eso no la escribimos).
E.C. Sewell	No disponible.
A.C. Nilsson	No analizada por el autor.
A. Brekke	No analizada por el autor.
H. Arau	Obtuvo la misma expresión que R. Josse y C. Lamure efectuando la simplificación $\Delta f/f = 0.25$ (véase expresión F.4.7).

Comportamiento acústico paredes simples – por debajo de f_c

- Cuánto mayor sea la masa unitaria de una pared mayor será el aislamiento acústico R (en dB) en todo el rango de frecuencias

- Ejemplo:

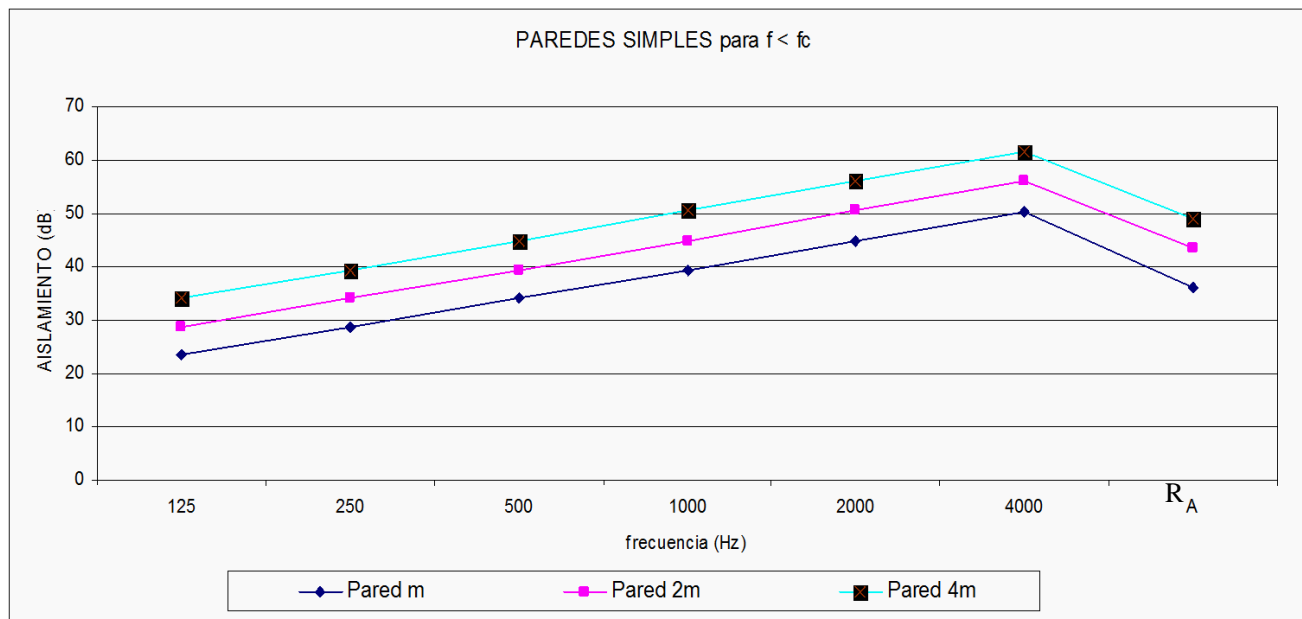
Pared de $m=30\text{Kg./m}^2$ sin rigidez

f_c por encima de 4000Hz.

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, masa = $m = 30$	23.56	28.72	34.04	39.46	44.96	50.47	36.08	38
R dB, masa = $2m = 60$	28.72	34.04	39.47	44.96	50.51	56.07	43.45	44
R dB, masa = $4m = 120$	34.04	39.47	44.96	50.52	56.11	61.72	48.92	49

Tabla 1: Ley de masas en la zona por debajo de la frecuencia crítica

Comportamiento acústico paredes simples – por debajo de f_c

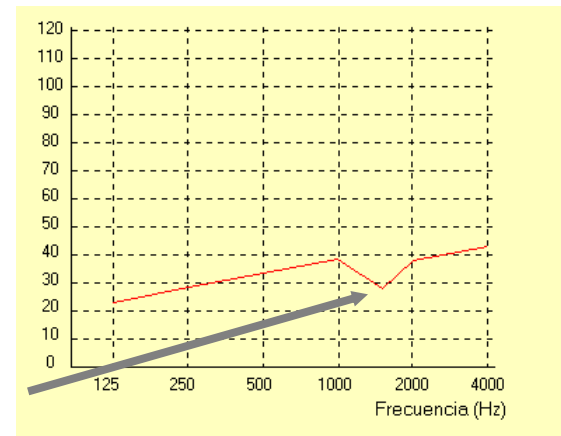


- **Conclusiones:**
 - Al doblar la masa, los valores de aislamiento acústico R aumentan 6dB en la misma frecuencia (Ley de masas)
 - Al doblar la frecuencia, los valores de aislamiento acústico R también aumentan en 6dB
 - Lo ideal sería una pared que tuviera la frecuencia de coincidencia fuera del rango audible i la masa unitaria infinita, cosa que no existe

Comportamiento acústico paredes simples – en f_c

- En f_c , existe un punto de inflexión del aislamiento acústico R en f_c
- f_c depende de:
 - Rigidez dinámica del material constituyente de la pared
 - Densidad de ésta
- El factor de amortiguamiento η es la capacidad que tienen los cuerpos en dejar de vibrar una vez han sido sometidos a una excitación (sonora)
- La caída de R es más elevada cuánto menor sea el factor de amortiguamiento η y viceversa.

Figura 2: Declive del aislamiento R en la zona de la frecuencia crítica



Comportamiento acústico paredes simples

– por encima de f_c

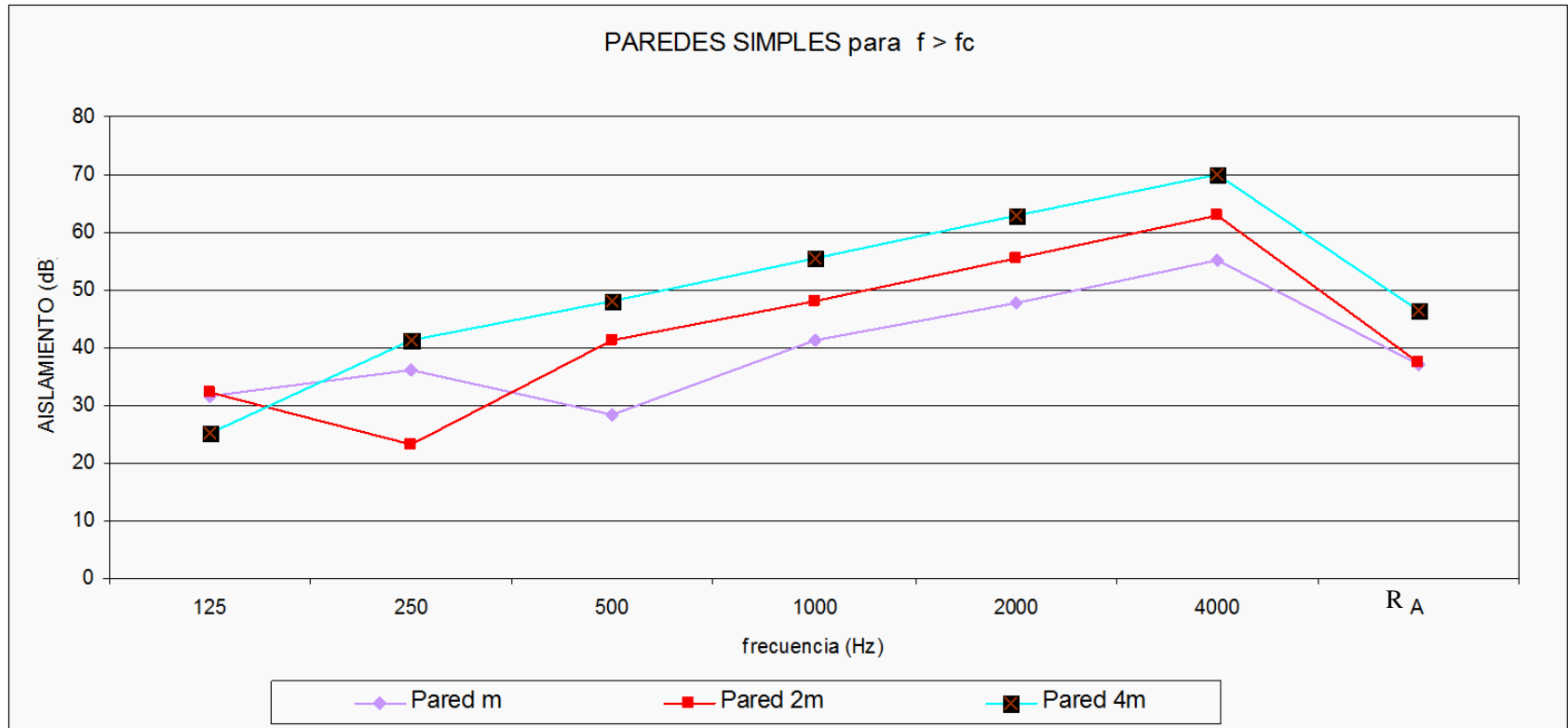
- Análisis de una misma pared duplicando m con el mismo factor η :
 - $m = 100 \text{ Kg./m}^2$, $f_c = 500 \text{ Hz.}$ y $\eta=0.005$
- Al doblar el espesor de la pared la f_c disminuye a la mitad del valor anterior

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, masa = m	31.55	36.23	28.42	41.29	47.79	55.24	36.96	38
R dB, masa = 2m	32.36	23.19	41.29	48.01	55.48	62.87	37.55	40
R dB, masa = 4m	25.23	41.29	48.01	55.48	62.87	69.87	46.42	49

Tabla 2: Comportamiento acústico de R en f_c y por encima de ésta

- El incremento en dB en la primera octava por encima de f_c es es muy elevado dependiendo del declive presente en f_c según el factor de amortiguamiento
- En octavas posteriores el aumento de R es de 7dB al doblar la frecuencia

Comportamiento acústico paredes simples – por encima de f_c



Comportamiento acústico paredes simples – por encima de f_c

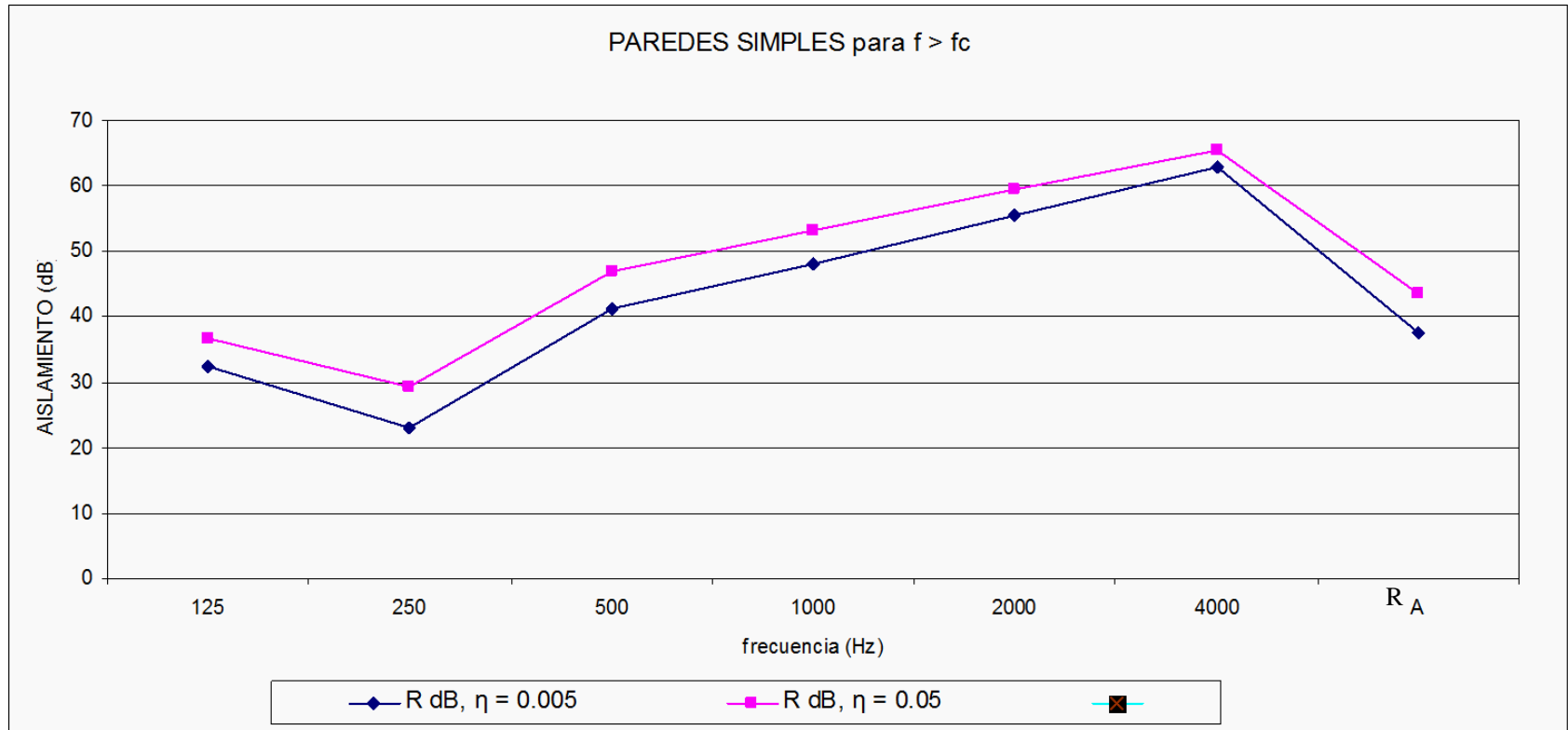
- **Análisis ídem pared caso anterior de masa = 2m con amortiguamiento por 10 ($\eta \times 10 = 0.05$)**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, $\eta = 0.005$	32.36	23.19	41.29	48.01	55.48	62.87	37.55	40
R dB, $\eta = 0.05$	36.83	29.34	47.07	53.20	59.44	65.5	43.60	46

Tabla 3: Influencia del amortiguamiento por encima de la frecuencia crítica

- En la zona de f_c , el declive de R es menos grande y el incremento del factor de amortiguamiento ha producido un incremento de R entre 6 a 3 dB correlativamente con el aumento de la frecuencia
- En octavas posteriores el aumento de R es de 7dB al doblar la frecuencia

Comportamiento acústico paredes simples – por encima de f_c



Comportamiento acústico paredes dobles

- **Compuesto por dos paredes simples y una cavidad de aire entre medio (que se puede rellenar con fibra mineral)**
 - **El material absorbente no aísla nada debido a su ligereza**
- **Existe un efecto masa – muelle – masa**
 - **El efecto muelle es debido a la elasticidad del aire, dónde se establece una frecuencia de resonancia f_0 que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del espesor de la cavidad y proporcional a la raíz de la masa reducida de las dos masas unitarias.**
 - **También existe una frecuencia límite f_L que es inversamente proporcional al espesor de la cavidad del aire. Para evitar el efecto de estas frecuencias se inserta material absorbente en la cavidad.**

• La pared Doble:

a) Para $f < f_c$:

Autor	Expresión
A. London	$\tau = 1 + 4a^2 \cos^2 (\cos \beta - a \cos \sin)^2, \text{ donde } \operatorname{tg} \beta = 1/a \cos = \text{ángulo de incidencia y } a = \omega m / 2\rho c, \tau = 2 \int_0^{\pi/2} \cos \sin d\varphi$ $R = 10 \log 1/\tau \quad (\text{F.4.10})$ <p>(Esta expresión sólo es válida para paredes dobles simétricas.)</p>
R. Josse	<p>Este autor distingue dos casos:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. El de paredes rigurosamente iguales. 2. Paredes de la misma composición, pero de distintos espesores. <p>Así, para el caso 1, obtiene que la diferencia ΔR que existe entre el aislamiento acústico de la pared doble R_{1+2} en relación a la pared simple R, en el caso de que sean rigurosamente iguales:</p> $\Delta R = R_{1+2} - R_1 = 20 \log \frac{\sqrt{\pi m \omega}}{\rho c^2} (\omega_c - \omega) d \quad (\text{F.4.11})$ <p>siendo d el espesor de la cámara de aire.</p> <p>Y para el caso 2, donde las paredes son de distinto espesor tenemos:</p> $\Delta R = R_{1+2} - R_1 = 20 \log \frac{\sqrt{2m\omega}}{\rho c^2} (\omega_c - \omega)^2 d^2 \left(\frac{h_2}{h_1} - 1 \right)^2 \quad (\text{F.4.12})$ <p>donde h_1 y h_2 son los espesores de cada pared.</p>

(Continúa)

- **La pared Doble:**

Autor	Expresión
Métodos SEA aproximación Brekke	<p>Para $f \geq f_1 = c/2d$; d = espesor de la cavidad.</p> $R = R_1 + R_2 + 10 \log \alpha + 10 \log d + 10 \log (l_1 + l_2) l_1 l_2 + 3 \quad (\text{F.4.13})$ <p>Para frecuencias inferiores a la frecuencia de resonancia: $f < f_0/2$ tenemos:</p> $R = 20 \log [(m_1 + m_2)f] - 48 \text{ dB. Donde son:}$ <p>(α = el coeficiente de absorción del material absorbente a incidencia aleatoria del sonido.</p> $R_{0i} = 20 \log f m_i - 42; R_i = R_{0i} - 10 \log (0.23 R_{0i}) \text{ para } i = 1, 2.$ <p>l_1 y l_2 son las dimensiones rectangulares de la pared.) (F.4.14)</p>
H. Arau	$\tau = 2\Delta^2 \int_0^1 x dx \left\{ (1 + A\Delta x / 2 - Cx^2)^2 + (Ax - \Delta)^2 \right\}^{-1}$ <p>$x = \cos \varphi$</p> $A = \omega (m_1 + m_2) / \rho c$ $C = \omega^2 m_1 m_2 / (\rho c)^2$ $\Delta = 2c / \omega L \quad (L \text{ es el espesor de la cavidad})$ <p>Siendo la solución de la integral para el caso $m_1 = m_2$, la que sigue:</p> $\tau = \frac{2\Delta^2}{\Delta^2 + 4} \left[\frac{1}{2A^2} \ln (A^2 + 1) - \frac{2}{A^2 \Delta} \operatorname{tg}^{-1} A - \frac{1}{2A^2} \ln \left[\frac{(A - \Delta)^2 + 1}{\Delta^2 + 1} \right] \right]$ $- \frac{1}{A^2} \left[\Delta - \frac{2(\Delta^2 + 1)}{\Delta} \right] \left \operatorname{tg}^{-1} (A - \Delta) + \operatorname{tg}^{-1} \Delta \right \quad (\text{F.4.16})$

- **La pared Doble:**

2) Para $f > f_c$:

Autor	Expresión
A. London	Caso no analizado.
R. Josse	<p>Para el caso 1:</p> $\Delta R = R_{1+2} - R_1 = 20 \log \frac{\sqrt{\pi m \omega \eta}}{\rho c} \sin(\omega d/c) \quad (\text{F. 4.17})$ <p>Para el caso 2:</p> $\Delta R = 20 \log \frac{\sqrt{2 m \omega}}{\rho c} A - 1 \sin(\omega d/c) \quad (\text{F. 4.18})$ <p>donde $A = h_2/h_1$</p>
Métodos SEA aproximación Brekke	$R = 20 \log(m_1 m_2) - 10 \log(f_{c1} f_{c2}) + 50 \log f - 10 \log S$ $+ 10 \log \left(\frac{c(l_1 + l_2) \alpha_0}{2\pi l_1 l_2 f} \right) + 10 \log \left(\frac{2\pi l_1 l_2 f}{c^2} \right) + 10 \log \eta_1 \eta_2 \quad (\text{F. 4.19})$ $- 10 \log(\sigma_{21} \sigma_{23} \sigma_{43} \sigma_{45}) - 35$ <p>siendo η_i el factor de pérdidas de cada panel y σ_{ij} los factores de radiación de cada subsistema.</p>

- **La pared Doble:**

H. Arau

Caso paredes simétricas:

$$R = 40 \log \frac{\omega m}{\rho c} + 10 \log \frac{\eta^3}{2\pi} \frac{f(1 - f_c/f)}{f_c} \quad (\text{F.4.20})$$

Caso paredes asimétricas:

$$R = R_1 + R_2 + 10 \log \frac{(\eta_1 + \eta_2) \eta_1 \eta_2}{2\pi} + 10 \log \left(\frac{f_{c2}^3 f}{f_{c1}^4} \right) + 10 \log (1 - f_{c2}/f) \quad (\text{F.4.20 bis})$$

donde $R_i = 20 \log \left(\frac{\omega m_i}{\rho c} \right)$ para $i = 1, 2$.

No presentamos en este texto las soluciones obtenidas para el caso de $f_{c1} < f < f_{c2}$.

Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c

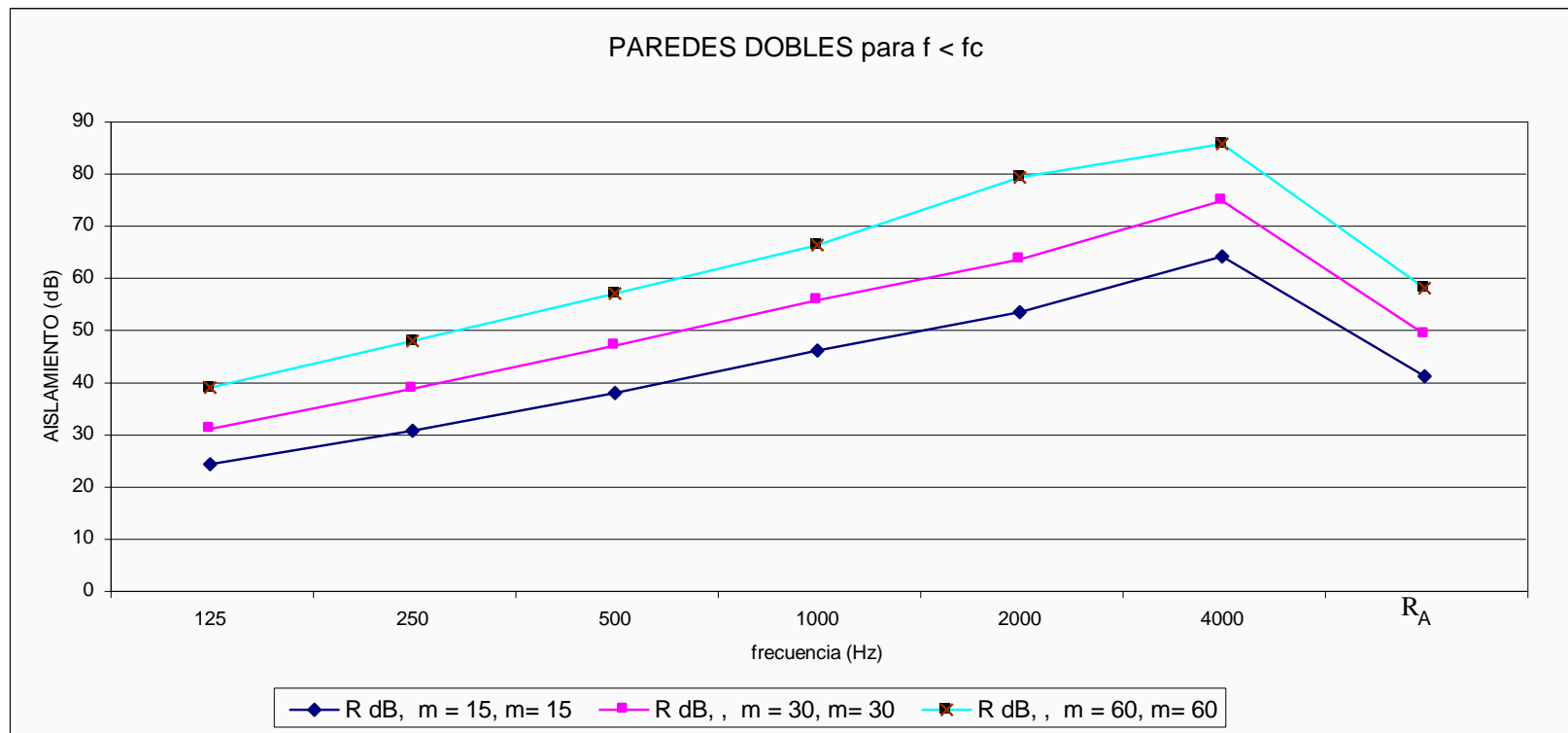
- La ley de masas que obedece es diferente de la correspondiente a la de la pared simple.
- Examinamos el siguiente ejemplo con $L = 10\text{cm}$ sin absorción:

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, $m = 15, m = 15$	23.98	30.37	37.68	45.77	53.18	63.86	40.89	41
R dB, $m = 30, m = 30$	30.71	38.45	46.69	55.50	63.24	74.47	48.85	49
R dB, $m = 60, m = 60$	38.71	47.61	56.69	65.97	79.03	85.38	57.78	58

Tabla 4: Ley de masas en la zona por debajo de la frecuencia crítica

- f_L se encuentra en 1700Hz
- El aumento de R con la frecuencia oscila de 6 a 11dB a medida que la frecuencia incrementa
- El aumento de R cada vez que duplicamos la masa unitaria es similar

Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c



Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c

CASO A: CON PAREDES LIGERAS → qué pasa si doblamos cavidad?

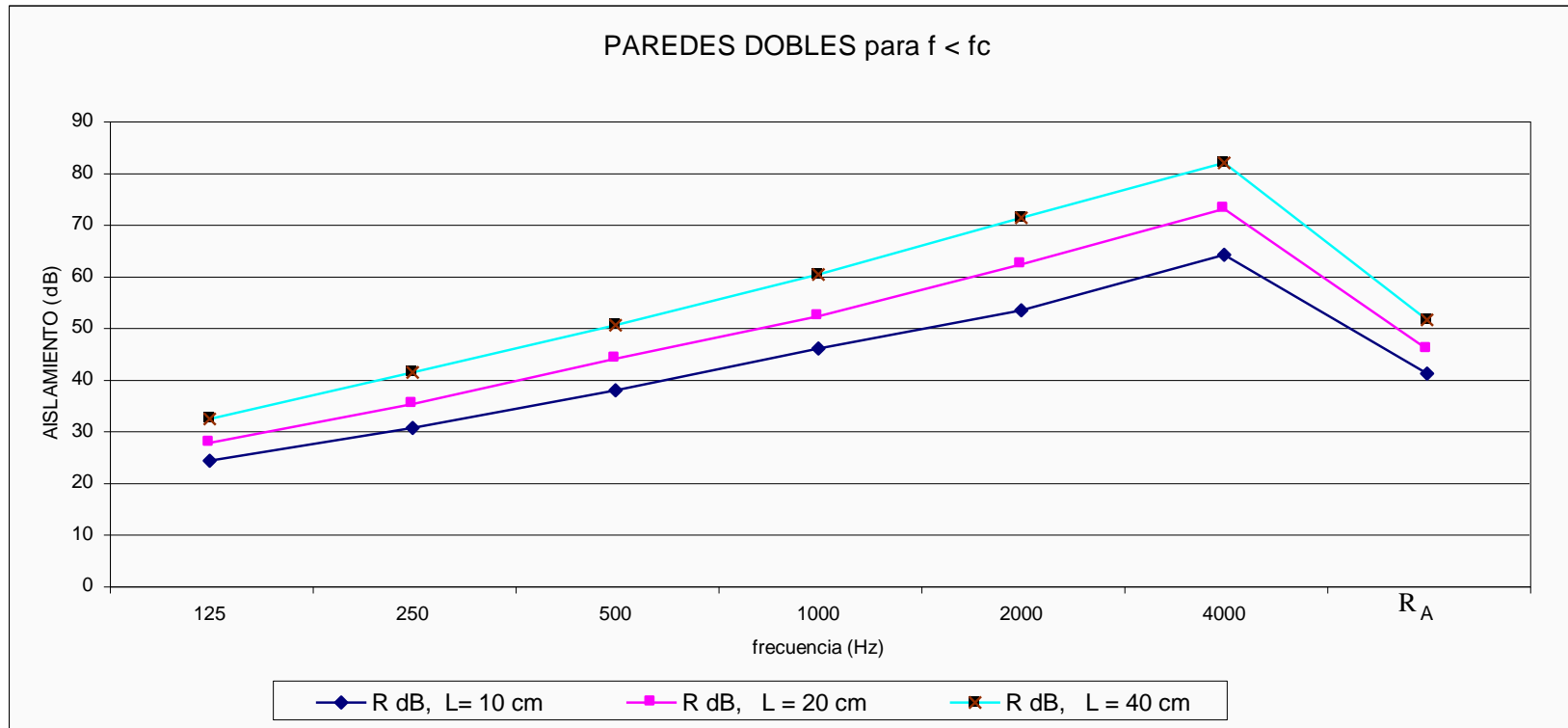
- **L=20cm y $m_1=m_2=15 \text{ Kg./m}^2$ comparado con L=10,20 y 40cm**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, L= 10 cm	23.98	30.37	37.68	45.77	53.18	63.86	40.89	41
R dB, L = 20 cm	27.48	34.98	43.83	52.03	62.09	72.77	45.61	46
R dB, L = 40 cm	32.09	41.12	50.23	60.06	71.05	81.73	51.24	58

Tabla 5: Análisi del aumento de espesor a igualdad de m y sin absorción en la cavidad

- $f_L = 1700\text{Hz}$ (por L1), 850Hz (por L2) y 425 (por L3)
- El aumento de R con la frecuencia va de 4 a 11dB
- El máximo aislamiento de una pared doble se producirá cuánto mayor sea la longitud de la cavidad

Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c



Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c

EFFECTO DE LA COLOCACIÓN DE FIBRA MINERAL EN LA CAVIDAD

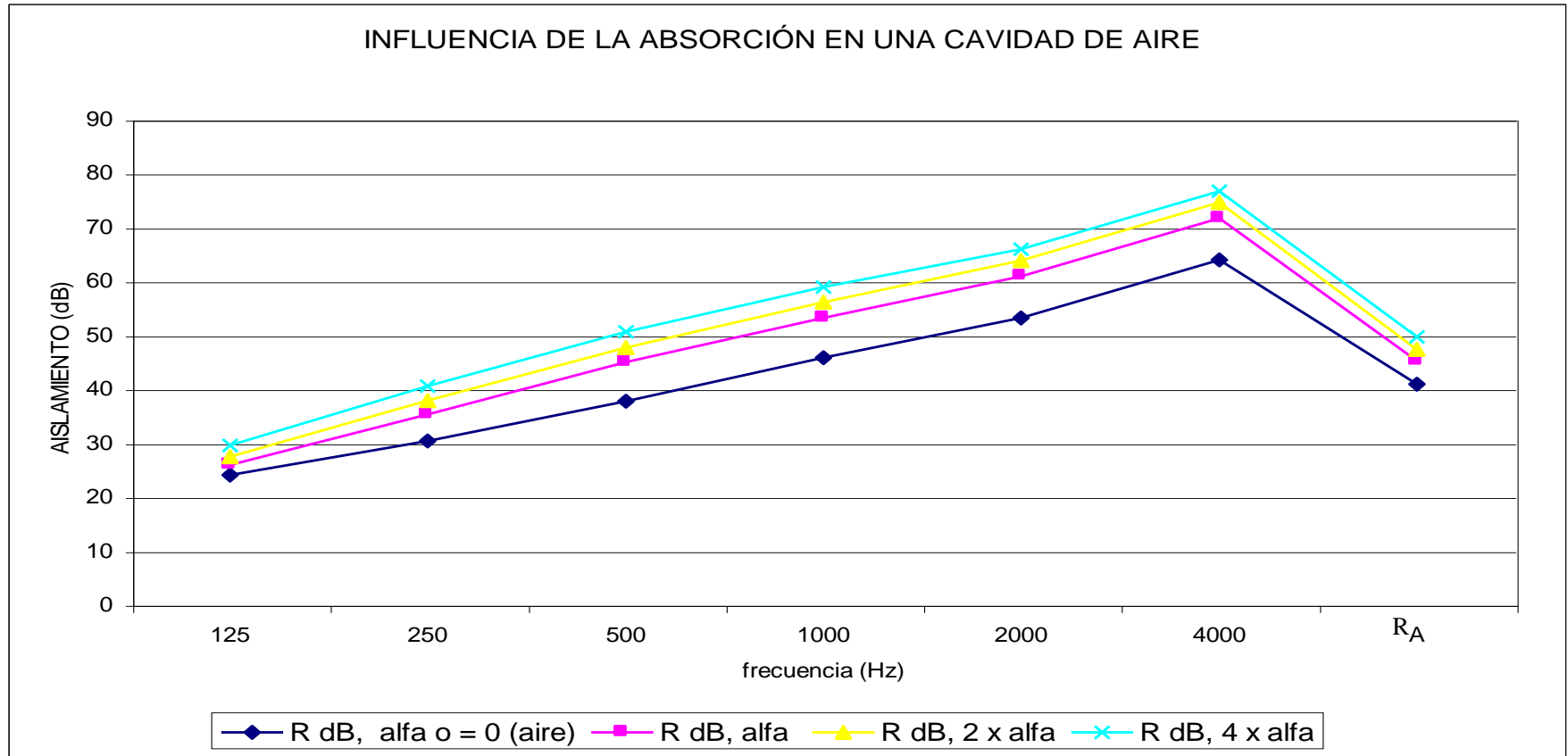
- **L=10cm, m1=m2=15Kg./m² por diferentes alfa:**

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, alfa o = 0 (aire)	23.98	30.37	37.68	45.77	53.18	63.86	40.89	41
R dB, alfa	25.83	35.27	44.89	53.16	60.90	71.60	45.19	46.9
R dB, 2 x alfa	27.44	37.77	47.67	56.01	63.78	74.52	47.25	48
R dB, 4 x alfa	29.51	40.51	50.53	58.90	65.90	76.66	49.61	51

Tabla 7: Influencia de la absorción en una cavidad de aire en paredes gruesas

- Se producen aumentos de R entre 5 – 10dB al poner absorción
- Cada vez que doblamos el alfa el incremento de R es de 3dB

Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c



Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c

CASO B: CON PAREDES GRUESAS

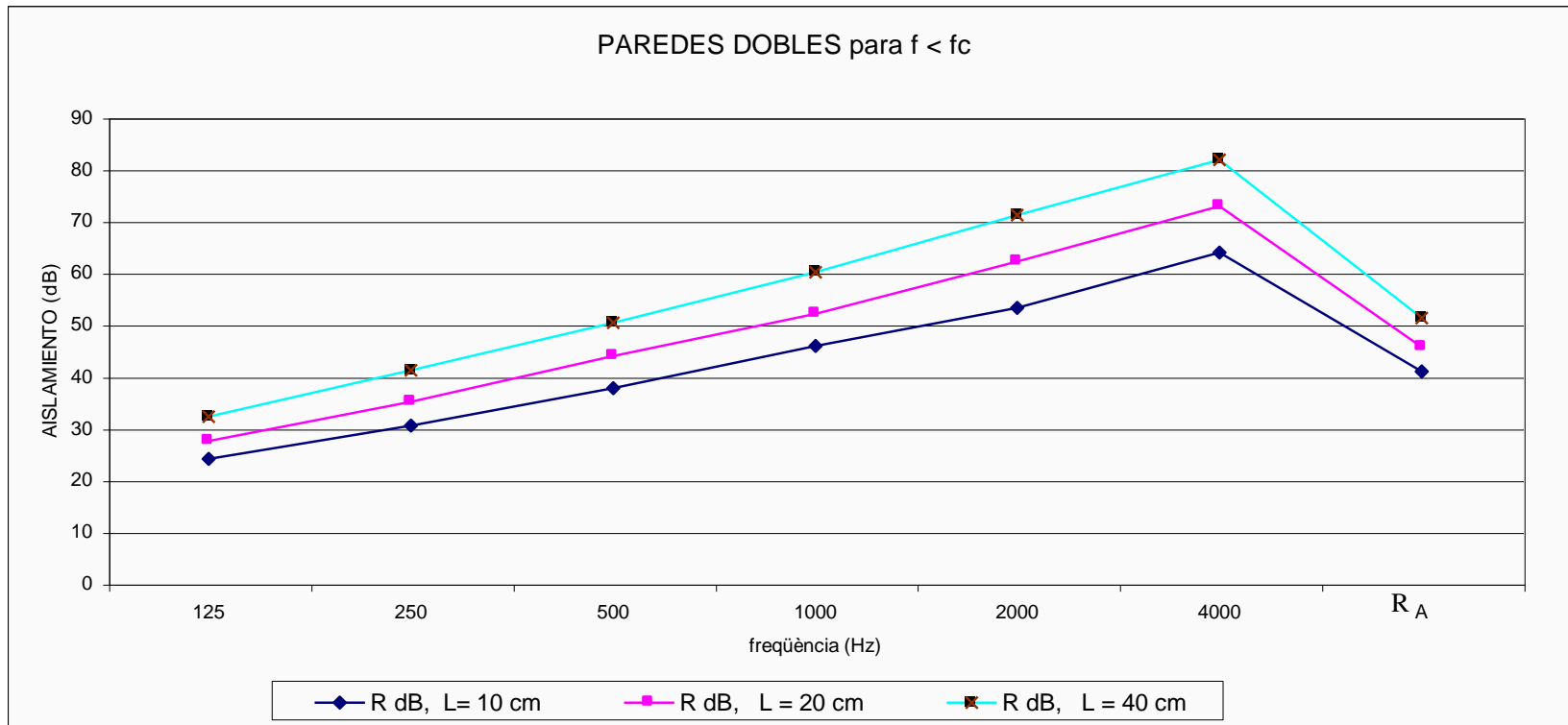
- $L=20\text{cm}$, $m_1=m_2=300\text{Kg./m}^2 \rightarrow f_c=90\text{Hz}$.
- Comparado con pared simple de $m_{\text{unitaria}}=300\text{Kg./m}^2$ y $f_c=45\text{Hz}$

Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, L = 5 cm	49.19	58.51	67.99	78.21	88.92	98.22	68.54	69
R dB, L= 10 cm	49.19	58.51	67.99	78.21	88.92	98.22	68.54	69

Tabla 6: Influencia de la cavidad de aire en paredes gruesas

- El efecto de la cavidad no mejora R cuando las paredes son gruesas

Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas por debajo de f_c



Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas a f_c y por encima

PARED DOBLE ASIMÉTRICA

- **$L=10\text{cm}$, $m_1=30\text{Kg./m}^2$ y $m_2=25\text{Kg./m}^2$ por diferentes alfa:**

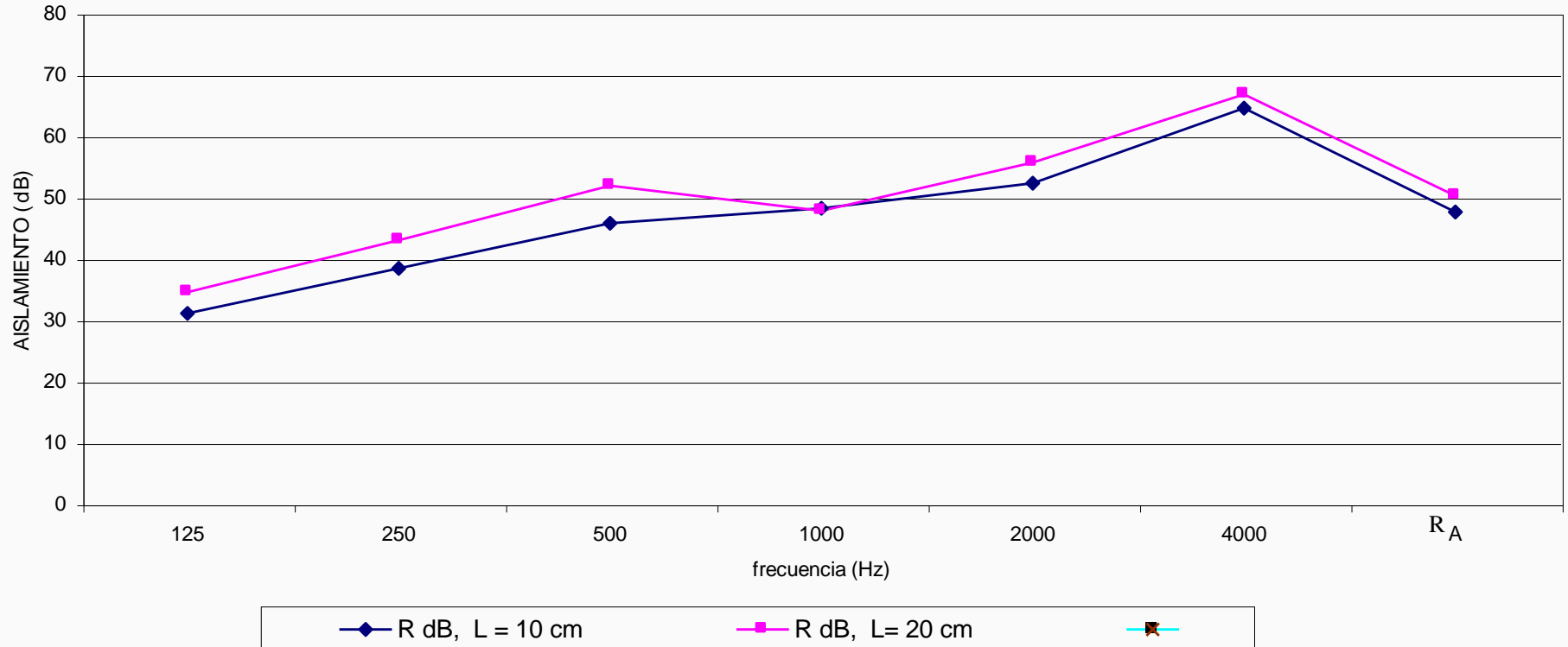
Frecuencia (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	R_A	R_w
R dB, L = 10 cm	31.03	38.32	45.75	48.14	52.24	64.44	47.56	48
R dB, L= 20 cm	34.53	42.92	51.88	47.77	55.58	66.69	50.24	51

Tabla 8: Pared doble con difentes L para $f > f_c$

- Para frecuencias superiores a f_c se producen aumentos de R entre 7 – 10dB
- Para $f < f_c$ el aumento de la cavidad supone un aumento de R aunque cuando llega a f_c se produce lo contrario

Comportamiento acústico paredes dobles – ley de masas a f_c y por encima

PARED DOBLE $f > f_c$



Comportamiento acústico paredes triples

- **Compuesto por tres paredes simples y dos cavidades de aire, una en medio de la pared 1 y 2 y otra entre la 2 y la 3 (que se puede rellenar con fibra mineral)**
- **Existe un efecto masa – muelle – masa- muelle - masa**
 - **El efecto muelle es debido a la elasticidad del aire, dónde se establecen dos frecuencias de resonancia f_0 .**
 - **También existen dos frecuencias límites f_L , que son inversamente proporcional al espesor de cada cavidad del aire. Para evitar el efecto de estas frecuencias se inserta material absorbente en la cavidad.**

- **La pared Triple:**

a) Para $f < f_c$:

Autor	Expresión
SEA Simplificación Brekke	$R = R_1 + R_2 + R_3 + 10 \log d_1 d_2 + 10 \log \alpha_1 \alpha_2 + 20 \log \frac{l_1 + l_2}{l_1 l_2} + 6 \quad (\text{F.4.21})$ <p>donde: d_1 y d_2 = los espesores de cavidad; α_1 y α_2 = los coeficientes de absorción del material de la cavidad R_i para $i = 1$ a 3 los aislamientos acústicos calculados de acuerdo con lo indicado en paredes dobles.</p>
H. Arau	$\tau = \frac{1}{2} \Delta_1^2 \Delta_2^2 \int_0^1 \frac{x dx}{I}; R = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{F.4.22})$ $I = \left[\left(A_3 x - \frac{1}{2} \Delta_2 \right)^2 + 1 \right] \left\{ \left[A_1 + A_2 \right] x - \frac{1}{2} \left(2 + \frac{L_1}{L_2} \right) \Delta_1 \right\}^2$ $+ \left[1 + \left[\frac{A_1}{2} \left(1 + \frac{L_1}{L_2} \right) + \frac{A_2}{2} \right] \Delta_1 x - A_1 A_2 x^2 \right]^2 \}$ <p>donde: $A_i = \omega m_i / \rho c$, para $i = 1, 2, 3$. $\Delta_j = 2c / \omega L_j$, para $j = 1, 2$. L_j = los espesores de la cavidad de aire. $x = \cos \phi$, donde ϕ es el ángulo de incidencia del sonido.</p>

- **La pared Triple:**

b) Para $f > f_c$:

Autor	Expresión
SEA	Brekke no estudió este caso y la exposición de resultados de H. Arau o bien M. Ohta son inapropiados para su presentación en este texto.
H. Arau	<p>Presentamos sólo el caso de triples paredes simétricas, ya que la expresión del caso asimétrico es muy extensa.</p> $\tau = 2\pi \left(\frac{f_c}{f} \right) \left[\left(\frac{\omega m}{\rho c} \right)^5 \eta^5 \left(1 - \frac{f_c}{f} \right) \right]^{-1} \quad (\text{F.4.23})$ <p>$R = 10 \log 1/\tau$</p> <p>Tampoco presentamos las soluciones de τ para los casos: $f_{c1} < f < f_{c2} < f_{c3}$, $f_{c1} < f_{c2} < f < f_{c3}$ por la misma razón de espacio indicada antes.</p>